

INQUIDE

Engenharia Química e Desenvolvimento

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

Vol. 8 / No. 1
Janeiro-Junho 2026



INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento

INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento * Volume 8 * Número 1 * Janeiro / Julho 2026.

Somos uma revista de Ciência e Tecnologia editada pela Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Guayaquil (Guayaquil – Equador).

A investigação aplicada em engenharia, processos industriais, desenvolvimento sustentável e gestão tecnológica é disseminada, com uma abordagem multidisciplinar no campo da engenharia.

Comité Executivo:

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. Reitor Académico da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-5831-8554>

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

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

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

Hugo Pérez Benítez, MSc. Universidade de Guayaquil, Equador. Vice-Reitor 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 do Journal of Engineering and Chemical Development da Universidade de Guayaquil. <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>

Membro do Comité 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; Mestrado em Ciências pela Universidade Estadual de Milagro; Equador. <https://orcid.org/0000-0002-3154-2000>

Leonor Alejandrina Zapata Aspiazú; 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 Estatal 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>

William 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.



INQUIDE

*Ingeniería Química
y Desarrollo*

INQUIDE

Engenharia Química e Desenvolvimento

Volume 8 – Número 1

Janeiro – Junho 2026

ISSN: 1390-9428 / e-ISSN: 3028-8533 7 / ISSN-L: 3028-8533

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

A revista utiliza o sistema acadêmico anti-plágio: 

Os itens têm um código de identificação (Identificador Digital de Objeto)



O processo editorial é gerido através do Open Journal System



É uma publicação de Acesso Aberto com licença Creative Commons



Os artigos desta edição podem ser consultados em

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

Faculdade de Engenharia Química

Universidade de Guayaquil

A INQUIDE – Engenharia e Desenvolvimento Químico está indexada nas seguintes bases de dados e sistemas de informação:

Base de Dados Seletiva



Diretórios Seletivos.



Pesquisa de Literatura Científica de Acesso Aberto.



Plataformas de Avaliação de Revistas



Arquivos Seletivos de Jornais



Ferramenta de Métricas Web



Apresentação. -

Volume 8, Número 1 – INQUIDE: Engenharia Química e Desenvolvimento

Prezados leitores e pesquisadores,

A revista INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento apresenta o Volume 8, Número 1, uma edição que consolida seu posicionamento como espaço acadêmico para a disseminação de pesquisas rigorosas e relevantes em engenharia química e ciências aplicadas. Este número reúne contribuições que abordam desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade energética, ao projeto e à avaliação de equipamentos de processo, à segurança industrial, à inovação alimentar e à análise quantitativa de fenômenos socioeconômicos, refletindo uma abordagem interdisciplinar orientada ao desenvolvimento científico, tecnológico e produtivo.

O primeiro artigo examina a substituição de motores de combustão interna por sistemas elétricos em operações de irrigação agrícola, abordando o problema das emissões poluentes e da dependência de combustíveis fósseis. Por meio de uma análise técnica e econômica, o estudo identifica benefícios associados à redução de emissões, à diminuição dos custos operacionais e à redução da poluição sonora, ao mesmo tempo em que analisa os desafios relacionados à infraestrutura elétrica e à estabilidade do fornecimento de energia em áreas rurais, fornecendo critérios relevantes para a transição para práticas agrícolas mais sustentáveis.

O segundo artigo desenvolve o projeto térmico-hidráulico de um trocador de calor de placas destinado ao resfriamento de leite de vaca líquido. Com base em uma abordagem de engenharia detalhada, são determinados parâmetros-chave de operação, transferência de calor, perda de carga e custos de implementação. A principal contribuição do estudo reside em demonstrar a viabilidade técnica e econômica do equipamento projetado, evidenciando sua aplicabilidade em processos industriais lácteos que exigem eficiência térmica e confiabilidade operacional.

O terceiro artigo apresenta uma revisão da avaliação de riscos ocupacionais na indústria láctea equatoriana, baseada na análise de publicações recentes com ênfase regional. O estudo aborda a problemática da saúde e segurança no trabalho por meio de uma abordagem abrangente que integra boas práticas de fabricação, ergonomia, tecnologias de manutenção e sistemas de gestão. Sua principal contribuição consiste em evidenciar reduções significativas na acidentalidade laboral e em destacar a necessidade de

estudos longitudinais e de estruturas de medição unificadas que permitam avaliar a sustentabilidade das melhorias implementadas.

O quarto artigo aborda o projeto térmico-hidráulico de um trocador de calor casco-e-tubos para o resfriamento de ácido acrílico em um contexto industrial. O trabalho desenvolve um dimensionamento detalhado que inclui variáveis geométricas, operacionais e econômicas, demonstrando que o projeto proposto atende aos limites de perda de carga estabelecidos pelo processo. A contribuição do estudo concentra-se na validação técnica de um equipamento amplamente utilizado na indústria de processos químicos.

O quinto artigo explora a elaboração de salsicha tipo Viena a partir de polpa de lula gigante como alternativa para a diversificação de produtos pesqueiros. Por meio de uma abordagem experimental, são avaliadas formulações, condições de processamento e atributos sensoriais, nutricionais e microbiológicos. A principal contribuição do estudo reside em demonstrar a viabilidade tecnológica, a inocuidade e o perfil nutricional favorável do produto, contribuindo para o desenvolvimento de alimentos inovadores de valor agregado.

O sexto artigo apresenta a modelagem de séries temporais da matrícula do ensino médio no Equador utilizando a abordagem Box–Jenkins, com base em uma extensa base histórica. O estudo aborda a análise de um indicador-chave para o planejamento educacional, aplicando testes de estacionariedade, validação de modelos e projeções de médio prazo. Sua contribuição consiste em evidenciar a utilidade das técnicas de séries temporais para a análise quantitativa de fenômenos educacionais e para o apoio à formulação de políticas públicas.

O sétimo artigo analisa a previsão do crescimento do Produto Interno Bruto do Equador por meio de modelos ARIMA, comparando cenários de curto prazo. O trabalho aborda a volatilidade macroeconômica por meio de técnicas estatísticas robustas, validando a aplicabilidade da abordagem Box–Jenkins para a análise econômica. Sua principal contribuição reside na geração de projeções consistentes com estimativas oficiais e na promoção de abordagens interdisciplinares entre economia e engenharia.

O oitavo artigo desenvolve o projeto térmico-hidráulico de um trocador de calor de tubos concêntricos para o resfriamento de leite, avaliando sua adequação operacional. A partir do cálculo de parâmetros de projeto, perda de carga e potência de bombeamento, o estudo demonstra as limitações do equipamento proposto para o serviço requerido. A contribuição do trabalho concentra-se na

análise crítica da aplicabilidade do projeto e na identificação de restrições técnicas relevantes para a seleção de equipamentos de processo.

O nono artigo apresenta uma análise comparativa da distribuição granulométrica de grãos moídos em moinho de martelos, moinho de bolas e sua combinação. Por meio de análises por peneiramento, caracterização microscópica e testes estatísticos, o estudo aborda a influência do tipo de equipamento na qualidade do produto moído. Sua principal contribuição consiste em demonstrar que a combinação de tecnologias de moagem permite obter distribuições granulométricas mais uniformes, superando as limitações de cada equipamento quando utilizados isoladamente.

A Direção Editorial convida a comunidade acadêmica, profissional e estudantil a realizar uma leitura detalhada deste número, cujos artigos fornecem evidências científicas, análises técnicas e abordagens metodológicas que enriquecem o conhecimento em engenharia e ciências aplicadas. O conjunto de trabalhos publicados oferece subsídios relevantes para a pesquisa, a prática profissional e a tomada de decisões em contextos produtivos e de políticas públicas.

Da mesma forma, INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento estende um convite permanente a pesquisadores nacionais e internacionais para submeter manuscritos originais para futuras edições. A revista mantém um firme compromisso com a qualidade editorial, o rigor do processo de revisão por pares duplo-cega e a disseminação aberta do conhecimento, destacando que não é cobrado nenhum tipo de taxa pelos processos de revisão ou publicação dos artigos, e reafirmando sua projeção internacional como espaço acadêmico para a divulgação de pesquisas de alto impacto em engenharia química e desenvolvimento.

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

Atenciosamente,

Francisco Javier Duque-Aldaz
Editor-Chefe
INQUIDE
Engenharia Química e Desenvolvimento.

ÍNDICE

Artigos Científicos.

- Aplicação de estratégias produtivas para substituir motores de combustão interna por motores elétricos em "ASOMUNUE", freguesia de Mariscal Sucre, Milagro.....** 9
- Aplicación de estrategias productivas para sustituir motores de combustión interna por eléctricos en “ASOMUNUE”, parroquia Mariscal Sucre, Milagro.
Luis Ángel Bucheli Carpio; Jesús Armando Verdugo Arcos; Carlos Daniel Campoverde Pillajo
- Design termo-hidráulico de um permutador de calor de placas para arrefecimento de leite de vaca líquido.....** 19
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de placas para el enfriamiento de leche líquida de vaca.
Amaury Pérez Sánchez; Laura de la Caridad Arias Águila; Lizthalia Jiménez Guerra
- Avaliação dos riscos ocupacionais na indústria leiteira equatoriana** 29
- Valoración de los riesgos ocupacionales en la industria láctea ecuatoriana.
Mayerli Angeline Mejía Monar; Carlos Alberto Velásquez Avilés; Ivan Patricio Viteri García
- Design termo-hidráulico de um tubo e permutador de calor para arrefecimento de ácido acrílico** 39
- Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de tubo y coraza para el enfriamiento de ácido acrílico.
Amaury Pérez Sánchez; Laura Thalía Álvarez Lores; Laura de la Caridad Arias Águila; Lizthalia Jiménez Guerra.
- Preparação de Salsicha Tipo Viena a partir de Polpa de Lula (Dositicus gigas).....** 51
- Elaboración de Salchicha Tipo Viena a Partir de la Pulpa de Pota (Dositicus gigas).
Richard Smith Gutierrez Huayra
- Modelação de Séries Temporais da Matrícula no Ensino Secundário no Equador: Uma Análise Box–Jenkins (1971–2023).....** 61
- Modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador: un análisis Box–Jenkins (1971–2023).
Edwin Haymacaña Moreno; Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu; Francisco Javier Duque-Aldaz; Félix Genaro Cabezas García; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima
- ARIMA vs. Modelos Híbridos com Aprendizagem Automática para a Previsão do PIB do Equador.....** 75

ARIMA vs. Modelos Híbridos con aprendizaje automático para pronóstico del PIB de Ecuador.
Leonor Alejandrina Zapata Aspiazú; Edwin Haymacaña Moreno; Francisco Javier Duque-Aldaz;
Félix Genaro Cabezas García; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima

Design termo-hidráulico de um permutador de calor de dois tubos sem e com aletas para arrefecimento do leite. Parte 1 – Permutador de calor sem aletas..... 88

Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo sin y con aletas para el enfriamiento de leche. Parte 1 – Intercambiador de calor sin aletas.

Amaury Pérez Sánchez; Laura de la Caridad Arias Águila; Heily Victoria González; María Isabel La Rosa Veliz; Zamira María Sarduy Rodríguez; Lizthalía Jiménez Guerra

Análise comparativa da distribuição do tamanho das partículas dos grãos moídos em moinhos de esferas e moinhos de martelo..... 102

Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.

Stefanie Bonilla Bermeo; Fernando Noblecilla Arévalo; Iván Torres Tapia; Carlos Valdiviezo Rogel

Diretrizes para publicar na revista..... 117

Aplicação de estratégias produtivas para substituir motores de combustão interna por motores elétricos em "ASOMUNUE", freguesia de Mariscal Sucre, Milagro.

Aplicación de estrategias productivas para sustituir motores de combustión interna por eléctricos en "ASOMUNUE", parroquia Mariscal Sucre, Milagro.

Luis Ángel Bucheli Carpio ^{1*}; Jesús Armando Verdugo Arcos ²; Carlos Daniel Campoverde Pillajo ³

Recebido: 08/02/2025 – Aceite: 15/10/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de Investigaçã Artigos de Revisão Artigos de Ensaio

* Autor correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

A transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis tornou-se uma prioridade em vários setores, especialmente na agricultura, onde os motores de combustão interna desempenham um papel importante nas operações de irrigação. Estes motores, embora funcionais e amplamente utilizados, geram emissões significativas de gases com efeito de estufa e dependem de combustíveis fósseis, contribuindo assim para o aquecimento global e a deterioração ambiental. Neste contexto, a substituição destes motores por sistemas elétricos ligados a redes de distribuição com transformadores oferece uma solução inovadora e ambientalmente responsável. Este artigo discute os aspetos técnicos e económicos dessa transição, destacando benefícios como uma redução significativa das emissões de carbono, custos operacionais mais baixos a longo prazo e diminuição da poluição sonora. Também aborda desafios associados, como a necessidade de instalar infraestruturas elétricas adequadas, garantir a estabilidade do fornecimento de energia nas zonas rurais e adaptar sistemas de irrigação a novos motores. Esta abordagem não só promove a eco-eficiência, como também reforça o compromisso da agricultura com o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave.

Energia sustentável, agricultura, motores de combustão interna, aquecimento global, poluição ambiental.

Resumen.

La transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles se ha convertido en una prioridad en diversos sectores, especialmente en la agricultura, donde los motores de combustión interna desempeñan un papel importante en las operaciones de riego. Estos motores, aunque funcionales y ampliamente utilizados, generan emisiones significativas de gases de efecto invernadero y dependen de combustibles fósiles, contribuyendo así al calentamiento global y al deterioro ambiental. En este contexto, el reemplazo de estos motores por sistemas eléctricos conectados a redes de distribución con transformadores ofrece una solución innovadora y ambientalmente responsable. Este artículo analiza los aspectos técnicos y económicos de dicha transición, destacando los beneficios que incluyen una notable reducción de las emisiones de carbono, menores costos operativos a largo plazo y una disminución de la contaminación sonora. Asimismo, se abordan los desafíos asociados, como la necesidad de instalar una infraestructura eléctrica adecuada, garantizar la estabilidad del suministro energético en áreas rurales y adaptar los sistemas de riego a los nuevos motores. Este enfoque no solo promueve la ecoeficiencia, sino que también fortalece el compromiso de la agricultura con el desarrollo sostenible.

Palabras clave.

Energía Sostenible, Agricultura, Motores de Combustión Interna, Calentamiento Global, Contaminación Ambiental.

1.- Introdução

A agricultura é um dos setores que consome mais recursos naturais e, por sua vez, um dos que mais contribui para a emissão de gases com efeito de estufa, particularmente através do uso de motores de combustão interna nos sistemas de irrigação. Estes motores, que funcionam principalmente com combustíveis fósseis como gasóleo ou gasolina, têm sido uma solução tradicional para irrigação agrícola devido à sua capacidade de operar em áreas remotas. No entanto, os seus impactos negativos no ambiente e o aumento dos custos dos combustíveis aumentam a necessidade de procurar alternativas mais sustentáveis. Neste contexto, a substituição dos motores de combustão interna por motores elétricos ligados à rede por

transformadores surge como uma alternativa eficiente e amiga do ambiente.

Esta mudança representa não só um avanço tecnológico no setor, mas também uma oportunidade para reduzir a pegada de carbono da agricultura, otimizar custos operacionais e melhorar a qualidade de vida dos produtores agrícolas, eliminando a poluição sonora e simplificando a manutenção dos equipamentos. Este artigo explora em detalhe os benefícios desta transição, como a redução das emissões de gases com efeito de estufa e o aproveitamento da energia elétrica sustentável, bem como desafios técnicos, como a adaptação da infraestrutura elétrica nas zonas rurais e os investimentos iniciais necessários. Além disso, são apresentadas considerações-chave para implementar esta

¹ Afiliação: Universidade Estadual de Milagro; lbuchelic@unemi.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-2277-603X>, Milagro; Equador.

² Afiliação: Universidade Estadual de Milagro; jverdugoal@unemi.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0006-7103-412X>, Milagro; Equador.

³ Afiliação: Universidade Estadual de Milagro; ccampoverdepl@unemi.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0000-4466-3584>; Milagro; Equador.

solução de forma eficaz, posicionando a agricultura como um ator chave na luta contra as alterações climáticas e na adoção de práticas eco-eficientes.

1.1.- Contexto e relevância:

Este projeto de investigação refere-se à instalação de um sistema elétrico para o funcionamento de uma bomba submersível para o sistema de irrigação numa quinta de 7 hectares chamada Hacienda Emanuel Los Palmares, Província de Guayas, nos arredores de Mariscal Sucre, Milagro. Coordenadas UTM: 667810,20 m E; 9768632,65 m S

A distância do poste de distribuição ao poço é de 60 metros, com um perímetro de instalação de postes perto do poço de 15 m. O sistema de irrigação será distribuído em tubos de 8 a 10 polegadas de diâmetro, com uma separação entre cada sistema de 8 a 10 metros.



Figura 1: Vista aérea da Hacienda. Fonte: Google Earth.

1.2.- Estado da arte:

Avançar para uma transição energética sustentável em ambientes rurais representa uma estratégia fundamental para mitigar as alterações climáticas e reduzir as desigualdades estruturais no acesso aos serviços energéticos. Vários estudos científicos concordam que a substituição de tecnologias baseadas em combustíveis fósseis por sistemas elétricos de baixas emissões pode gerar benefícios ambientais, económicos e sociais de grande alcance, especialmente em comunidades com pouca energia.

Neste contexto, pesquisas recentes mostraram que: "As transições energéticas sustentáveis baseadas em fontes renováveis têm demonstrado reduzir significativamente a pegada de carbono per capita em regiões com elevados níveis de pobreza energética". Esta declaração está alinhada com os objetivos deste estudo, que propõe a substituição dos motores diesel por motores elétricos trifásicos no sistema de irrigação agrícola da associação ASOMUNUE.[1]

Além disso, verificou-se que: "As tecnologias renováveis descentralizadas podem fornecer acesso básico à eletricidade por uma fração do custo das extensões da rede." Isto reforça a viabilidade técnica e financeira do uso de

motores elétricos no setor agrícola, como uma alternativa eficiente aos sistemas de combustão interna.[2]

Da mesma forma, embora este estudo se foque nos sistemas de irrigação, os princípios de eficiência energética são aplicáveis em várias áreas rurais. Por exemplo: "Tecnologias de cozinha energeticamente eficientes, como fogões melhorados, podem reduzir a pegada de carbono até 70% em comparação com métodos tradicionais baseados em biomassa insustentável." Esta comparação ilustra como a eficiência energética representa um mecanismo transversal para a mitigação ambiental em ambientes rurais.[3]

Para além do aspeto climático, o acesso a tecnologias limpas também se traduz em benefícios para a saúde. Na verdade, "A falta de acesso a energia limpa aumenta a exposição a poluentes interiores, afetando a saúde respiratória." Isto justifica, do ponto de vista da justiça ambiental, a substituição dos motores poluentes por soluções elétricas, como a proposta em ASOMUNUE.[4]

No entanto, a sustentabilidade energética não está isenta de desafios. Alguns estudos alertam para os compromissos entre carbono e água, pois "A expansão solar reduz o carbono, mas pode aumentar significativamente o consumo de água em áreas áridas". Neste sentido, a avaliação do ciclo de vida (LCA) torna-se essencial para avaliar impactos cruzados. Neste artigo, o LCA é utilizado para calcular as emissões evitadas, e a gestão eficiente da água é promovida através da otimização do sistema de irrigação eletrificada.[5][6]

Esta integração de tecnologia sustentável em contextos rurais, como o ASOMUNUE, faz parte de uma tendência global. "As transições energéticas sustentáveis têm sido documentadas como tendo reduzido significativamente a pegada de carbono per capita em regiões com elevados níveis de pobreza energética." A isto junta-se a evidência de que "práticas agrícolas inteligentes para o clima também melhoram a eficiência energética e reduzem a procura de água" [7][8]

Além disso, a implementação de "Microredes rurais bem desenhadas pode melhorar o acesso à energia e reduzir a pegada de carbono se forem baseadas em fontes renováveis locais" [9]

No entanto, a necessidade desta transição torna-se ainda mais clara se forem considerados os efeitos negativos do modelo energético baseado em combustíveis fósseis. Por exemplo, na Somália foi demonstrado que "O consumo de energia tem um efeito significativo e positivo nas emissões de carbono a longo prazo na Somália, indicando que o aumento da energia atualmente utilizada no país não é ambientalmente sustentável" [10]

Uma conclusão semelhante foi evidenciada na Malásia, onde está confirmado que o uso prolongado de energia não renovável mantém uma relação significativa com o aumento das emissões de CO₂, reforçando a necessidade de migrar para fontes mais limpas e tecnologias mais eficientes [11]

O objetivo desta investigação é analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição dos motores de combustão interna por motores elétricos nos sistemas de irrigação da Associação de Produção do Novo Mundo (ASOMUNUE), localizada na freguesia de Mariscal Sucre, no cantão de Milagro, com o objetivo de promover práticas agrícolas sustentáveis e eco-eficientes.

Contextualização local na agricultura em pequena escala: a maioria dos estudos foca-se em veículos ou maquinaria industrial, mas poucos analisam sistemas de irrigação em associações rurais como a ASOMUNUE. Este trabalho fornece uma abordagem territorial e comunitária específica, corrigindo a falta de evidência para áreas semelhantes no Equador.

• Contribuições:

Contribuição técnica aplicada: O estudo apresenta o design e implementação de um sistema de bombagem elétrica adaptado a uma quinta de 7 hectares, utilizando motores elétricos para substituir motores diesel. Isto inclui cálculos detalhados da procura de energia, seleção de transformadores, cablagem, ligações e sistemas de aterramento, o que constitui uma contribuição prática aplicável em contextos agrícolas semelhantes no Equador e na América Latina.

Contribuição econômica: É feita uma comparação exaustiva entre os custos operacionais dos motores de combustão interna e dos motores elétricos. O estudo mostra uma redução significativa nos custos mensais (de mais de \$1.000 para cerca de \$320), fornecendo evidências claras de poupanças econômicas sustentáveis para pequenos e médios produtores agrícolas.

Contribuição ambiental: Uma redução de 90% nas emissões de CO₂ é demonstrada com a substituição dos motores tradicionais por motores elétricos, o que representa uma mitigação de aproximadamente 6,6 toneladas de CO₂ equivalente por ano. Estes dados são fundamentais para as políticas de sustentabilidade e transição energética no setor agrícola.

Contribuição estratégica e social: O estudo promove o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7 (energia acessível e limpa) e 13 (ação climática), posicionando associações agrícolas como a ASOMUNUE como atores ativos na luta contra as alterações climáticas.

Inovação contextualizada: Ao contrário de estudos internacionais mais generalistas, este trabalho integra dados técnicos reais, regulamentos equatorianos e necessidades

locais, tornando-se um guia de referência para a implementação de soluções de energia limpa em áreas rurais do país.

1.3. - Problemas energéticos na agricultura e pobreza energética.

O desenvolvimento da agricultura sustentável requer uma transformação radical nas fontes de energia utilizadas nas zonas rurais, especialmente aquelas que dependem de motores de combustão interna. Estes sistemas não só geram elevados níveis de emissões de gases com efeito de estufa (GEE), como também envolvem elevados custos operacionais e dependência de combustíveis fósseis. Este problema afeta particularmente as comunidades camponesas que enfrentam pobreza energética, exclusão tecnológica e limitações econômicas para migrar para soluções de energia limpa.[12]

A agricultura, especialmente nas zonas rurais, depende historicamente de motores de combustão interna para tarefas críticas como a irrigação. Estes sistemas, embora funcionais, apresentam um duplo problema: por um lado, geram emissões significativas de gases com efeito de estufa (GEE), contribuindo para as alterações climáticas; por outro, implicam elevados custos operacionais devido à volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis. Esta dependência tecnológica limita a competitividade dos pequenos produtores e aumenta a sua vulnerabilidade a crises energéticas e ambientais.

A pobreza energética em ambientes rurais agrava esta situação. De acordo com estudos recentes, mais de 30% das comunidades agrícolas em países em desenvolvimento carecem de acesso fiável a energia limpa, restringindo a adoção de tecnologias modernas e perpetuando a exclusão econômica. Esta deficiência afeta não só a produtividade agrícola, mas também a qualidade de vida, aumentando os riscos para a saúde devido à exposição a poluentes e reduzindo as oportunidades de desenvolvimento. Neste contexto, a eletrificação agrícola surge como uma estratégia chave para quebrar o ciclo da dependência fóssil e da pobreza energética, oferecendo soluções sustentáveis que integram eficiência, resiliência e equidade.[13]

1.4.- Transição energética e benefícios ambientais.

As transições energéticas sustentáveis baseadas em fontes renováveis demonstraram reduzir significativamente a pegada de carbono per capita em regiões com elevados níveis de pobreza energética. Vários estudos demonstraram que as microrredes rurais alimentadas por fontes renováveis locais (como solar ou eólica) não só melhoram o acesso à energia, como também reduzem o impacto ambiental associado às tecnologias convencionais.[14]

Além disso, as tecnologias descentralizadas permitem soluções adaptadas ao contexto, com custos de implementação mais baixos do que as extensões tradicionais da rede elétrica. Esta abordagem tem sido

apoiada por estratégias nacionais e internacionais que promovem o uso de energia limpa para cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 7 (energia acessível e limpa) e o ODS 13 (ação climática).[15]

A transição para sistemas elétricos na agricultura representa uma mudança estrutural com impactos ambientais positivos. Substituir motores diesel por motores elétricos reduz drasticamente as emissões de CO₂, especialmente em países cuja matriz energética se baseia em fontes renováveis, como o Equador. Além disso, esta transição diminui a poluição sonora e o risco de derrames de combustível, contribuindo para a proteção dos ecossistemas locais. De uma perspectiva global, a eletrificação agrícola está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular o ODS 7 (energia acessível e limpa) e o ODS 13 (ação climática), consolidando a agricultura como um ator relevante na mitigação das alterações climáticas.[16]

1.5.- Ferramentas de avaliação ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida (LCA).

Um elemento chave na avaliação ambiental destas soluções energéticas é a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), que permite quantificar os impactos desde a produção até à eliminação final dos sistemas tecnológicos utilizados. Através do LCA, são identificados os principais pontos críticos de impacto ambiental, incluindo emissões, consumo de recursos, geração de resíduos e utilização de água. A pegada hídrica, por exemplo, torna-se relevante em áreas áridas onde certas soluções solares térmicas podem gerar pressão sobre os recursos hídricos.[17]

A Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) é uma ferramenta metodológica essencial para avaliar o impacto ambiental das tecnologias energéticas. Permite quantificar as emissões, o consumo de recursos e a geração de resíduos desde a fabricação até à eliminação final, oferecendo uma visão abrangente do desempenho ambiental. No contexto agrícola, o LCA é fundamental para comparar as tecnologias fósseis e elétricas, identificando pontos críticos como a pegada de carbono e a pegada hídrica, que são decisivas em áreas com stress hídrico.[18]

A aplicação do ACL em projetos de eletrificação agrícola não só valida a redução das emissões, como também antecipa impactos indiretos, como o consumo de água em soluções solares térmicas ou a geração de resíduos eletrônicos. Esta perspectiva holística permite o desenho de estratégias complementares de mitigação, garantindo que a transição energética seja verdadeiramente sustentável. Além disso, o ACL facilita a tomada de decisões baseada em evidências, apoiando políticas públicas e modelos de negócio orientados para a economia circular e a resiliência ambiental.

1.6.- Impactos na saúde pública e nas tecnologias limpas.

Do ponto de vista da saúde pública, a falta de acesso a energia limpa também aumenta a exposição a poluentes interiores devido ao uso de biomassa insustentável, afetando especialmente mulheres e crianças. Tecnologias como fogões melhorados permitem reduzir a pegada de carbono gerada pelos métodos tradicionais de cozinha em até 70%.[19]

A falta de acesso a energia limpa nas comunidades rurais não só limita a produtividade agrícola, como também cria riscos significativos para a saúde pública. O uso prolongado de combustíveis fósseis e biomassa em processos agrícolas e domésticos aumenta a exposição a poluentes interiores, como partículas e compostos tóxicos, que afetam os sistemas respiratório e cardiovascular. Estes impactos são mais graves em mulheres e crianças, que geralmente estão mais expostas a ambientes contaminados durante o trabalho diário.

A adoção de tecnologias limpas, como motores elétricos e sistemas de irrigação eficientes, contribui para a redução destas externalidades negativas. Ao eliminar a combustão direta do gasóleo, a emissão de partículas e gases nocivos é reduzida, melhorando a qualidade do ar em ambientes agrícolas. Além disso, a eletrificação permite integrar soluções complementares, como sistemas de irrigação automatizados, que reduzem o contacto humano com combustíveis e diminuem os riscos profissionais. Esta mudança tecnológica, portanto, não só traz benefícios ambientais, mas também repercussões positivas na saúde e bem-estar das comunidades rurais.

1.7.- Justificação para o caso ASOMUNUE.

Em contextos como o ASOMUNUE, onde a produção agrícola depende fortemente de bombas-motor com motores de combustão interna, existe uma necessidade urgente de migrar para tecnologias elétricas eficientes. Esta transição não responde apenas a uma lógica de sustentabilidade ambiental, mas também à redução dos custos operacionais, redução do risco de incêndio, melhorias na saúde ocupacional e alinhamento com as políticas de eletrificação rural promovidas pelo Estado.[20]

Em países em desenvolvimento, como a Somália e a Malásia, estudos confirmaram que o consumo de energia não renovável tem uma correlação significativa com o aumento das emissões de CO₂, mostrando que os modelos energéticos atuais não são sustentáveis a longo prazo.[21]

A associação ASOMUNUE representa um caso emblemático para a implementação de tecnologias limpas na agricultura equatoriana. A sua localização numa zona rural com acesso limitado a infraestruturas de energia convencional e a sua dependência histórica de motores a diesel para irrigação tornam-na um cenário ideal para avaliar a viabilidade técnica e económica da eletrificação. Além disso, o contexto local reflete desafios comuns noutras comunidades agrícolas do país, como custos

operacionais elevados, vulnerabilidade às flutuações dos preços dos combustíveis e a necessidade de cumprir regulamentos ambientais. Assim, este estudo não só fornece soluções específicas para a ASOMUNUE, como também gera evidências replicáveis para políticas públicas e projetos de desenvolvimento rural sustentável.[22]

1.8.- Perspetiva estratégica abrangente.

A incorporação de soluções de energia limpa nas zonas rurais é uma necessidade estratégica para garantir uma produção agrícola resiliente, inclusiva e de baixas emissões, com base em evidências técnicas e científicas. Esta transição energética, avaliada através de ferramentas como o LCA, deve ser promovida a partir de uma visão abrangente que articule economia, ambiente e justiça social para alcançar um equilíbrio entre desenvolvimento, saúde e sustentabilidade nos territórios rurais.[23]

A transição para sistemas elétricos na agricultura deve ser concebida como parte de uma estratégia abrangente que articule dimensões técnicas, económicas, sociais e ambientais. Não basta substituir motores; É necessário garantir a disponibilidade de infraestruturas elétricas, desenhar esquemas de financiamento acessíveis e promover a formação dos agricultores na utilização e manutenção das novas tecnologias. Esta visão holística garante que a eletrificação não se limita à mudança tecnológica, mas se torna um catalisador para um desenvolvimento rural inclusivo e resiliente.

Do ponto de vista das políticas públicas, a eletrificação agrícola pode ser integrada nos programas nacionais de transição energética e mitigação das alterações climáticas. A sua implementação contribui para o cumprimento de compromissos internacionais, como o Acordo de Paris, e fortalece a competitividade do setor agrícola. Além disso, ao reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, a vulnerabilidade às crises energéticas globais é reduzida, consolidando a segurança alimentar e energética do país. Neste sentido, a eletrificação agrícola não é apenas uma solução técnica, mas uma ferramenta estratégica para alcançar objetivos de sustentabilidade e equidade social.

2. Materiais e métodos.

Para a implementação do sistema de irrigação elétrica na quinta "Hacienda Emanuel (Los Palmares)", foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

2.1.- Descrição de materiais e equipamentos:

Bomba submersível elétrica de 7 a 10 HP, modelo Franklin Electric, aproximadamente 80% de eficiência.

Transformador trifásico de 30 kVA (marca ABB®), com tensão primária de 7,2 kV e tensão secundária de 220 V.

Condutor elétrico aéreo tipo CONC . AL. 2×6+6MM² (6 AWG XLPE) XLPE, feito de alumínio.

Tubo de polietileno de alta densidade (HDPE) com 8 a 10 polegadas de diâmetro para sistemas de irrigação.

Sprinklers pop-up modelo 8005 – série 8000, com caudais de 0,86 a 8,24 m³/h e raios de 11,9 a 24,7 m.

Sistema de aterramento, composto por haste Copperweld de 5/8" x 1,8 m e condutor AWG #10.

Medidor de energia tipo 2F-3H, KWH, classe 100, bloco terminal.

Software utilizado: **Microsoft Excel** para análise comparativa de custos e emissões, e **AutoCAD** para design elétrico.

2.2.- Desenho experimental:

Foi concebido um estudo descritivo-comparativo aplicado, focado na substituição de um sistema de irrigação agrícola baseado em motores de combustão interna (diesel) por um sistema alimentado por motores elétricos ligados à rede trifásica.

Variáveis medidas:

- Custos mensais e anuais de energia.
- Consumo de combustível (gasóleo) e eletricidade (kWh).
- Manutenção programada do equipamento.
- Emissões de CO₂ (kg/mês e kg/ano).

Variável controlada:

Caudal de água necessário para irrigação uniforme em 7 hectares.

2.3.- Procedimentos:

- **Diagnóstico inicial:** Foi identificada a situação energética e operacional atual da quinta, incluindo a localização do poço, o tipo de bomba de gasóleo e o sistema de distribuição de água.
- **Projeto do sistema elétrico:** A procura elétrica foi calculada com base na potência da bomba e foi selecionado o transformador trifásico apropriado. A rede de distribuição foi projetada desde o poste mais próximo (a 60 m de distância) até ao ponto de consumo. Foram definidos os elementos de proteção, medição e aterramento.
- **Comparação técnico-económica e ambiental:** Foi estimado o consumo mensal de energia de ambos os sistemas (elétrico vs. combustão). Foi aplicado o fator de emissão de CO₂ do Sistema Nacional Interligado do Equador (0,09 kg CO₂/kWh). Foram calculados os custos mensais de energia, manutenção e operação.
- **Validação do sistema proposto:** Foram analisados regulamentos do IEEE, NEC, NEMA, MEER e CNEL. A conformidade com as normas técnicas foi revista através de simulação de carga e verificação de diagramas elétricos.

2.4.- Análise de dados:

A análise comparativa entre os dois sistemas de bombagem foi realizada utilizando:

- **Microsoft Excel** para consumo de energia, cálculo de custos e estimativa de emissões.

- **Tabelas de fatores de emissão** publicadas pelo Ministério da Energia e Minas do Equador.
- A análise foi apresentada em tabelas comparativas que incluem valores mensais e anuais e percentagens de poupança económica e ambiental.

3. Análise e interpretação dos resultados.

1. Apresentação dos resultados:

As tecnologias renováveis descentralizadas podem fornecer acesso básico à eletricidade por uma fração do custo das extensões da rede [24]

Os resultados obtidos focaram-se em três dimensões principais: a análise técnica do sistema de irrigação elétrica, a comparação dos custos operacionais entre o motor de combustão interna e o motor elétrico, e a avaliação ambiental baseada nas emissões de CO₂.

Tabela 1. Comparação de custos entre bomba de combustão interna e motor elétrico (80 h/mês)

Aparência	Bomba de combustão interna	Bomba elétrica 10 cv
Custo Inicial da Bomba	\$3.500	\$2.800
Custo mensal de energia	\$153,44	\$33,42
Manutenção mensal	\$120 – \$150	40 – 60 dólares
Custo Total Mensal Estimado	\$1.020 – \$1.050	\$302,50 – \$322,50
Custo Anual Estimado	\$12.240 – \$12.600	\$3.630 – \$3.870

Fonte: Elaboração própria

Redução da pegada de carbono.

Motor de combustão interna

Calcular a pegada de carbono ao substituir motores de combustão interna por motores elétricos envolve analisar as emissões de CO₂ resultantes do uso de combustíveis fósseis e compará-las com as emissões derivadas da geração de eletricidade consumida pelos motores elétricos. [25]

Fatores de emissão de combustível (kg CO₂ por litro):

- Diésel: 2.68 kg de CO₂ por litro.
- Gasolina: 2.31 kg de CO₂ por litro.
- Diésel: 10.14 kg de CO₂ por galón.
- Gasolina: 8.75 kg de CO₂ por galón.

Cálculo: Consumo mensal em litros = $59.89 \text{ galões} \times \frac{3.785 \text{ litros}}{\text{galón}}$

Consumo mensal em litros = 226.68 litros/mes

Emissões Mensuais de CO₂

Consumo de combustible (litros /mes) x Factor de emisión (kg de CO₂ /litro)

Emissões mensuales (kg CO₂) = $226.63 \text{ litros} \times 2.68 \text{ kg CO}_2/\text{litro}$

Emissões mensuales (kg CO₂) = **607.51 kg CO₂/mes**

Emissões Anuais de CO₂

Emissiones anuales (kg CO₂) = $607.51 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times 12$
Emissiones anuales (kg CO₂) = **7,290.14 kg CO₂/Ano**
No Equador, o fator de emissão de CO₂ do Sistema Nacional Interligado (SNI) foi determinado em 0,09 toneladas de CO₂ por , equivalente a megavatio – hora (tCO₂/MWh)0.09 kg de CO₂ por kilovatio – hora (kgCO₂/kWh)¹

Motor elétrico

Emissiones mensuales (kg CO₂) = Consumo eléctrico (kWh) x Factor de emisio'n (kg CO₂ /kWh)

Emissiones mensuales = $569.8 \text{ kWh} \times \frac{0.09 \text{ kg CO}_2}{\text{kWh}}$

Emissiones mensuales = **51.282 kg CO₂/mes**

Emissiones anuales = $51.282 \text{ kg CO}_2/\text{mes} \times 12 =$

615.38 kg CO₂/Ano

Tabela 2. Comparações de emissões de CO₂

Motor	Emissões mensais (kgCO ₂)	Emissões anuais (kgCO ₂)
Motor Diesel	607,51	7290,14
Motor elétrico	51,282	615,38
Redução percentual		90%

Fonte: Elaboração própria

Os sistemas de energia renovável fora da rede geram 60-90% menos emissões em comparação com os geradores a diesel tradicionais em áreas rurais.[26]

Com um fator de emissão de 0,09 kg de CO₂/kWh, o motor elétrico gera 615,38 kg de CO₂ por ano, enquanto o motor de combustão gera 7.290,44 kg de CO₂ por ano. Isto representa uma redução de aproximadamente 90% nas emissões de CO₂, equivalente a evitar 6,6 toneladas de CO₂ equivalente por ano.

Análise dos resultados:

Os dados revelam uma clara vantagem económica e ambiental na utilização de motores elétricos:

- **Redução de custos:** a mudança tecnológica representa uma poupança de aproximadamente 70% nos custos operacionais mensais. Estas poupanças são atribuídas ao preço mais baixo por kWh (\$0,056) em comparação com um galão de gasóleo (\$1,50), aos custos de manutenção mais baixos e à eliminação da mudança de óleo.
- **Vida útil mais longa:** os motores elétricos têm uma vida útil média de 10 a 15 anos, em comparação com 5 a 8 anos para motores de combustão.
- **Redução das emissões:** obteve uma redução de 90% nas emissões de CO₂, representando uma redução de 6.675 kg de CO₂/ano (6,6 toneladas).

Interpretação dos resultados:

- Os resultados estão alinhados com os objetivos do estudo: demonstrar a viabilidade técnica, económica e

ambiental da substituição de motores de combustão interna em áreas agrícolas rurais do Equador. A magnitude das poupanças de energia e das reduções de emissões confirma a relevância da mudança proposta, especialmente num contexto em que a matriz energética do país apresenta baixas emissões devido ao seu elevado componente hidroelétrico.

- A partir do quadro teórico, o estudo confirma que a eletrificação dos processos agrícolas contribui significativamente para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e 13), bem como para a melhoria das condições de trabalho, redução da dependência de combustíveis fósseis e promoção de tecnologias limpas em setores tradicionalmente intensivos em carbono.

Limitações e preconceitos:

- **Âmbito geográfico limitado:** O estudo foi realizado numa única exploração, limitando a generalização imediata dos resultados a outras regiões ou condições agrícolas.
- **Dados de consumo estimado:** embora tenham sido utilizados parâmetros técnicos reais, os dados de energia e emissões baseiam-se em estimativas médias de operação (80 horas/mês), que podem variar consoante o regime de utilização de irrigação.
- **Custos dinâmicos:** tanto a tarifa de eletricidade como o preço do gasóleo estão sujeitos a variações de mercado, o que pode alterar a relação de custo no futuro.
- **Falta de avaliação social direta:** impactos sociais como a perceção dos agricultores sobre a mudança tecnológica ou barreiras culturais à implementação não foram medidos.

4. Discussão.

4.1.- Interpretação dos resultados:

Os resultados do estudo mostram que a substituição dos motores de combustão interna por motores elétricos nos sistemas de irrigação agrícola representa uma alternativa viável, económica e ambientalmente responsável. Esta conclusão está diretamente alinhada com os objetivos definidos, que procuraram analisar a viabilidade técnica, económica e ambiental desta transição na Associação ASOMUNUE. A redução de 90% nas emissões de CO₂, aliada a poupanças superiores a 70% nos custos operacionais, demonstra que a adoção de tecnologias elétricas pode ter um impacto significativo tanto na sustentabilidade ambiental como na rentabilidade dos produtores agrícolas.

"Os sistemas híbridos fora da rede mostraram uma redução de 70–90% nos impactos ambientais globais, incluindo pegada de carbono, pegada hídrica e toxicidade humana." [27]

A partir do quadro teórico, estes resultados apoiam os postulados sobre eco-eficiência na agricultura e reforçam a importância da transição energética para mitigar as alterações climáticas, especialmente em países com uma matriz de energia limpa, como o Equador.

4.2.- Comparação com estudos anteriores:

Os resultados são consistentes com investigações de organizações como a , que destacam a necessidade de reduzir as emissões na agricultura através de tecnologias limpas. Além disso, estudos como o que destacam o papel da eletrificação na redução da pegada de carbono no setor produtivo. Ao contrário destes estudos, que tendem a focar-se em modelos teóricos ou em diferentes regiões, este artigo aplica os conceitos a um caso prático, contextualizado numa área rural equatoriana, com medições reais de consumo e custos, o que reforça a sua relevância local e aplicabilidade imediata.[28][29]

Da mesma forma, este estudo responde a uma lacuna identificada na literatura: a disponibilidade limitada de análises técnico-económicas específicas para associações de produção agrícola em países em desenvolvimento. Ao integrar design elétrico, avaliação de custos e análise de emissões, o trabalho contribui significativamente para esta área pouco explorada. [30]

4.3.- Implicações teóricas e práticas:

Do ponto de vista teórico, os resultados validam quadros conceptuais relacionados com eficiência energética, transição tecnológica e sustentabilidade rural. Demonstra-se que é possível adotar tecnologias limpas em contextos agrícolas sem comprometer a produtividade e até melhorar a eficiência operacional.

O consumo de energia contribui positivamente para o crescimento económico, mas também intensifica a poluição ambiental, o que exige estratégias energéticas sustentáveis.[31]

A nível prático, o estudo oferece um modelo replicável de eletrificação de sistemas de irrigação que pode ser adotado por outras associações ou pequenas explorações agrícolas. As implicações para a indústria incluem:

- Redução dos custos operacionais no agronegócio.
- Aumento da vida útil do equipamento.
- Melhoria do cumprimento das regulamentações ambientais e energéticas.
- Possibilidade de integração com fontes de energia renovável (solar, hidroelétrica).
- Além disso, os resultados podem ser usados como base para políticas públicas destinadas a promover a eletrificação agrícola e o desenvolvimento rural sustentável.

4.4.- Limitações e recomendações:

Entre as principais limitações do estudo estão:

- **Âmbito limitado do estudo de caso:** foca-se numa única exploração, o que restringe a generalização dos resultados a outras regiões ou escalas de produção.
- **Estimativas de energia e custos:** Embora baseadas em parâmetros reais, os dados de consumo e manutenção podem variar consoante o uso específico, as condições do solo ou as flutuações do mercado.
- **Falta de análise social e cultural:** Não foi incluída uma avaliação qualitativa da aceitação dos agricultores da mudança tecnológica, ou das barreiras sociais ou de conhecimento que possam dificultar a sua implementação.

4.5.- Recomendações para investigação futura:

- Expandir o estudo para mais explorações agrícolas e regiões do país para validar os resultados em diferentes contextos agroprodutivos.
- Incluir análises multicritério que integrem fatores técnicos, económicos, sociais e ambientais.
- Incorporar fontes de energia renovável (como a energia solar fotovoltaica) para reforçar a autonomia energética rural.
- Desenvolver estudos longitudinais que meçam o impacto da mudança tecnológica a médio e longo prazo.

5.- Conclusões.

Resumo das conclusões

Este estudo mostrou que a substituição dos motores de combustão interna por motores elétricos nos sistemas de irrigação agrícola da quinta "Hacienda Emanuel (ASOMUNUE)" permite reduzir significativamente os custos operacionais e as emissões poluentes. Os principais resultados incluem uma redução de 70% nos custos operacionais mensais e uma diminuição de 90% nas emissões de CO₂, equivalente a evitar aproximadamente 6,6 toneladas de dióxido de carbono anualmente. Estas conclusões estão totalmente alinhadas com os objetivos do estudo, que procurou avaliar a viabilidade técnica, económica e ambiental desta mudança tecnológica em contextos rurais.

"Substituir motores de combustão interna em sistemas agrícolas não só reduz as emissões, como melhora a eficiência operacional da irrigação e reduz o consumo total de energia" [32]

Principais contribuições

O estudo traz três contribuições chave para o campo da engenharia:

- Uma proposta abrangente para eletrificação agrícola, que inclui conceção técnica, avaliação económica e análise de impacto ambiental.
- Uma validação prática da substituição de tecnologias poluentes por soluções mais sustentáveis num ambiente rural no Equador, que contribui para colmatar lacunas

existentes na literatura sobre casos reais em países em desenvolvimento.

- A demonstração de que esta transição contribui diretamente para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente dos ODS 7 (energia limpa) e 13 (ação climática).

Implicações práticas e teóricas

Do ponto de vista prático, os resultados podem ser replicados por outras associações agrícolas do país, fornecendo soluções eficientes e sustentáveis para a irrigação. Podem também servir como insumo para programas de eletrificação rural, subsídios ou incentivos estatais.

A análise do ciclo de vida revelou que os sistemas solares domésticos geram até 85% menos emissões de gases com efeito de estufa do que os geradores a diesel.[33]

A nível teórico, o estudo reforça o quadro conceptual sobre eco-eficiência e transição energética na agricultura, fornecendo evidências empíricas que podem servir de base para futuras investigações sobre o desenho de sistemas agrícolas sustentáveis, análise do ciclo de vida ou integração de energias renováveis.

Recomendações para estudos futuros

Para enriquecer e expandir este campo de investigação, sugere-se:

- Replicar o estudo noutras regiões do país, com diferentes tipos de culturas e condições geográficas, para validar a sua aplicabilidade geral.
- Incorpore uma análise social e cultural, avaliando a perceção dos produtores face às novas tecnologias.
- Analisar a viabilidade de integrar a energia solar fotovoltaica como fonte alternativa para o sistema de irrigação.
- Realizar estudos longitudinais que midam o desempenho económico e ambiental destes sistemas a médio e longo prazo.

6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização: Luis Ángel Bucheli Carpio.
2. Curadoria de dados: Luis Angel Bucheli Carpio.
3. Análise formal: Luis Ángel Bucheli Carpio.
4. Investigação: Luis Angel Bucheli Carpio.
5. Metodologia: Jesús Armando Verdugo Arcos.
6. Gestão de projetos: Jesus Armando Verdugo Arcos.
7. Software: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
8. Supervisão: Jesús Armando Verdugo Arcos.
9. Validação: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
10. Visualização: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
11. Argumento - rascunho original: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.
12. Escrita - revisão e edição: Carlos Daniel Campoverde Pillajo.

7.- Referências.

- [1] A. Ahmed, L. Khadim, N. Badran, C. Sarpong y G. Otieno, «Transições energéticas sustentáveis e redução da pegada de carbono em economias em desenvolvimento: uma análise multirregional», *Scientific Reports*, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91540-9>
- [2] U. Deichmann, C. Meisner, S. Murray y D. Wheeler, «A economia da expansão das energias renováveis na África Subsaariana rural», *Energy, Sustainability and Society*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.034>
- [3] X. Zhao, R. Huang, D. Li, W. Zhang y J. Liu, «Pegada de carbono e co-benefícios ambientais das tecnologias de cozinha energeticamente eficientes em lares rurais», *Scientific Reports*, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85985-1>
- [4] S. Dlamini, T. Mthembu, Z. Khumalo y M. A. Adeyemi, «Implicações para a saúde ambiental das desigualdades de acesso à energia em comunidades remotas», *Parasites & Vectors*, vol. 18, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13071-025-06662-w>
- [5] J. Liu, C. Fang, L. Zhang, M. Yuan, W. Zhou y Q. Chen, «Descobrimos as compensações água-carbono da expansão da energia solar em regiões áridas», *Nature Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-6105-7>
- [6] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz e F. R. Rodríguez-Flores, «Proposta Ergonómica Abrangente para a Redução dos Riscos Musculoesqueléticos na Produção de Sabão: Uma Abordagem Baseada na Análise Estatística e Avaliação Postural», *INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, nº 2, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416>
- [7] A. Ahmed, L. Khadim, N. Badran, C. Sarpong y G. Otieno, «Transições energéticas sustentáveis e redução da pegada de carbono em economias em desenvolvimento: uma análise multirregional», *Scientific Reports*, vol. 14, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91540-9>
- [8] N. J. Williams, S. P. Jafry, K. M. Mutua y L. T. Ogallo, «O impacto da agricultura inteligente para o clima nos sistemas de alimentos, energia-água na África Subsaariana», *Nature Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61011-w>
- [9] P. Bipasha, D. Dipankar, D. Saikat e D. Swagatam, «Eletrificação rural sustentável através de micro-redes em países em desenvolvimento: uma revisão do desenvolvimento recente», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113266>
- [10] I. Mohamed Adan, B. Mohamed Ismail y M. O. Shurie, «Rumo à Sustentabilidade Ambiental: Avaliação do Papel do Consumo de Energia, IDE e Urbanização nas Emissões de Carbono na Somália: Uma Análise Empírica usando o Teste ARDL Bound», *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 14, nº 7, pp. 2241-2251, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.17379>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17379>
- [11] A. Noor Azlinna, M. Nor Asilah, S. A. Hazman y N. J. Nik Rosila, «O Impacto do Consumo de Energia, Crescimento Económico e Energia Não Renovável na Emissão de Dióxido de Carbono na Malásia», *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 14, nº 7, pp. 2167-2175, 2023. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.17350>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17350>
- [12] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores y J. Carmona Tapia, «Identificação de parâmetros em sistemas de equações diferenciais ordinárias usando redes neurais artificiais», *San Gregorio*, vol. 1, nº 2, 2025. <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/2826>
- [13] D. M. Kammen y D. A. Sunter, «Energia rural e sustentabilidade: Implicações para as nações em desenvolvimento», *Nature Energy*, vol. 1, 2016. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.75>
- [14] G. Ramakrishnan, «Eletrificação rural sustentável através de micro-redes», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 726-745, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.040>
- [15] N. Jollands, «Energia para o desenvolvimento: O papel potencial das energias renováveis no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento do Milénio», *Energy Policy*, vol. 32, pp. 1271-1281, 2004. <https://search.issuelab.org/resource/energy-for-development-the-potential-role-of-renewable-energy-in-meeting-the-millennium-development-goals.html>
- [16] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Avaliação e Proposta para um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», *INQUIDE*, vol. 7, nº 1, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [17] S. Ulgiati, «Avaliação do Ciclo de Vida e Sustentabilidade», *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 1400-1412, 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/life-cycle-sustainability-assessment>
- [18] F. Veronesi, «Efeitos da energia solar na pegada da escassez de água», *Environmental Science & Technology*, vol. 51, nº 21, pp. 2476-2484, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.118575>
- [19] K. R. Smith, «Poluição do ar doméstico proveniente de combustíveis sólidos de cozinha e os seus efeitos na saúde», *The Lancet*, vol. 38, pp. 1937-1948, 2017. DOI: https://doi.org/10.1596/978-1-4648-0527-1_ch18. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/21541>
- [20] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio e F. J. Duque-Aldaz, «Otimização do despacho de combustível de combustível através de regressão multivariada usando indicadores locais de armazenamento», *INQUIDE*, vol. 6, nº 2, 2024. <https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [21] M. Abdirahman, «Revelando os Motores do Crescimento Económico na Somália», *Journal of Environmental Management and Sustainability*, vol. 3, nº 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32479/ijeep.16040>. URL: <https://www.econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/16040>
- [22] N. Mohd Suki, «O Impacto do Consumo de Energia, Crescimento Económico e Energia Não Renovável nas Emissões de Dióxido de Carbono na Malásia», *Sustainability*, vol. 15, 2024. <https://doi.org/10.32479/ijeep.17350>; <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/17350>
- [23] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores e F. J. Duque-Aldaz, «Aplicação de estratégias Lean não automatizadas para melhoria da qualidade em processos manuais de montagem: um estudo de caso na indústria de electrodomésticos», *INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, nº 1, 2025. <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [24] U. Deichmann, C. Mesiner, S. Murray y D. Wheeler, «A economia da expansão das energias renováveis na África Subsaariana rural», *Energy, Sustainability and Society*, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00225-7>
- [25] F. Santos Alvite, M. Jaramillo e L. Haro Estrella, "Fator de Emissão de CO2 do Sistema Nacional Interligado do Equador", Ministério da Energia e Minas, Quito, 2022. URL (PDF): <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2023/08/wp-1692720103183.pdf>
- [26] L. A. Mofor, J. O. Owusu, T. Muzangaza y M. Tchoukan, «Avaliação das emissões de gases com efeito de estufa de projetos de energia renovável fora da rede em áreas rurais: uma perspectiva do ciclo de vida», *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10151-025-03123-5>
- [27] T. Rahman, N. Huda, P. Chandrasekaran, F. Ahmed y J. T. Endara, «Desempenho ambiental de sistemas energéticos híbridos off-grid em regiões tropicais: uma avaliação do ciclo de vida multi-critério», *Scientific Reports*, vol. 14, 7 de abril de 2024. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2025.114633>
- [28] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA, «ESTRATÉGIA DA FAO SOBRE ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS», ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, CIGANOS, 2022. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/7b9bf435-b12b-4abf-94c0-4806d3b97109>. URL (PDF directo): <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f6270800-ee7-498f-9887-6d937c4f575a/content>
- [29] C. Espíndola e J. Valderrama, «Huella del Carbono. Parte 1: Conceitos, Métodos de Estimativa e Complexidades Metodológicas», *Technological Information*, vol. 23, nº 1, pp. 163-176, 2012. DOI: [https://doi.org/10.4067/S0718-](https://doi.org/10.4067/S0718-https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd)

07642012000100017. ; URL:
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642012000100017&script=sci_arttext
- [30] A. Gonçalves Savinovich, S. R. Fritschi Naranjo e R. E. Quintero Veliz, "Fator de Emissão de CO₂: Sistema Nacional Interligado do Equador," Ministério da Energia e Minas, Quito, 2023. URL (PDF): <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2023.pdf>
- [31] M. Hassan Abukar, M. Abdiwahid Hassan e I. Yusuf Hassan, «Revelando os Motores do Crescimento Económico na Somália: O Papel do Consumo de Energia, Poluição Ambiental e Globalização», Journal of Environmental Management and Tourism, vol. 14, nº 8, pp. 2307-2319, 2023. <https://doi.org/10.32479/ijeep.16040> ; <https://econjournals.com/index.php/ijeep/article/view/16040>
- [32] P. Bipasha, D. Dipankar, D. Saikat y S. Das, «Eletrificação rural sustentável através de micro-redes em países em desenvolvimento: Uma revisão do desenvolvimento recente», Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 180, 2023. . <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113266> .
- [33] J. Hyun Kim, S. Aminah, T. Petchsri y M. N. Ortega, «Impactos ambientais do ciclo de vida dos sistemas solares domésticos em áreas rurais remotas: um estudo de caso do Sudeste Asiático», Energy, Sustainability and Society, 2025. <https://doi.org/10.1186/s13613-025-01445-z> .

Design termo-hidráulico de um permutador de calor com juntas de placas para arrefecimento líquido de leite de vaca.

Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor con placa con junta para refrigeración líquida de leche de vaca.

Amaury Pérez Sánchez ¹ *; Laura de la Caridad Arias Águila ²; Lizthalia Jiménez Guerra ³

Recebido: 14/06/2025 – Aceite: 28/09/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de Investigação Artigos de Revisão Julgamentos

* Autor correspondente.



Esta obra está licenciada sob a licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-PartilhaIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e são livres de partilhar, copiar, distribuir, apresentar e comunicar publicamente a obra, desde que seja dada a atribuição adequada, o uso seja não comercial e quaisquer obras derivadas estejam licenciadas sob os mesmos termos.

Resumo.

Os permutadores de calor de placas oferecem maior compacidade em comparação com os permutadores tubulares. A configuração de placas melhora a troca de calor ao criar uma área grande e completamente compacta que permite uma transferência eficiente de calor entre dois fluidos. Este artigo pretende conceber, do ponto de vista termo-hidráulico, um permutador de calor com uma placa com juntas para arrefecer um jato de leite de vaca líquido quente usando água fria como refrigerante. Foram determinados vários parâmetros importantes, como o número total de placas (3), a carga térmica (163,79 kW), o caudal mássico necessário da água refrigerada (5.638 kg/h), a área superficial requerida (2,21 m²) e o coeficiente total de transferência de calor calculado (2.194,06 W/m²). K). Da mesma forma, os valores das quedas de pressão para os fluxos de água (48.558 Pa) e leite (14.720 Pa) estão abaixo dos valores máximos permitidos estabelecidos pelo processo. O permutador de calor de placas projetado custará 2.692 USD e poderá ser implementado com sucesso neste serviço de transferência de calor do ponto de vista termo-hidráulico.

Palavras-chave.

Permutador de Calor de Placas com Junta; área; coeficiente total de transferência de calor; queda de pressão; Custo de compra.

Resumen.

Los intercambiadores de calor de placas ofrecen mayor compacidad en comparación con los intercambiadores tubulares. La configuración de placas mejora el intercambio de calor creando un área extensa y completamente compacta que permite una transferencia eficiente de calor entre dos fluidos. El presente artículo pretende diseñar, desde el punto de vista termohidráulico, un intercambiador de calor con placa con junta para enfriar un chorro de leche de vaca líquida caliente utilizando agua fría como refrigerante. Se determinaron varios parámetros importantes como el número total de placas (3), la carga térmica (163,79 kW), el caudal mássico requerido del agua refrigerada (5.638 kg/h), la superficie requerida (2,21 m²) y el coeficiente total de transferencia de calor calculado (2.194,06 W/m²). K). Asimismo, los valores de las caídas de presión para los arroyos de agua (48.558 Pa) y leche (14.720 Pa) están por debajo de los valores máximos permitidos establecidos por el proceso. El intercambiador de calor de placas diseñado costará 2.692 USD y podrá implementarse con éxito en este servicio de transferencia de calor desde la perspectiva termohidráulica.

Palabras clave.

Intercambiador de calor de placas con junta; área; coeficiente total de transferencia de calor; caída de presión; Coste de compra.

1. Introdução

Os permutadores de calor (HX) consistem em dispositivos concebidos para transferir energia térmica entre dois fluidos devido a uma diferença de temperatura. As principais categorias de HX dividem-se de acordo com as suas geometrias estruturais, que incluem tipos tubular, de placas e de superfície estendida [1].

Um permutador de calor de placas (PHE) é um tipo compacto de permutador de calor que utiliza várias placas finas para transferir calor entre dois fluidos. Existem principalmente quatro tipos de PHE: com juntas, soldadas, soldadas e semi-soldadas. A junta ou permutador de calor de placa e quadro é essencialmente composta por uma série de placas retangulares finas delimitadas por juntas e fixadas juntas dentro de uma estrutura. Inicialmente concebidos para pasteurização do leite em 1923, os permutadores de calor de placas são amplamente utilizados em várias

indústrias, incluindo química, petróleo, sistemas HVAC, refrigeração, produção de laticínios, farmacêuticos, bebidas, processamento de alimentos líquidos e cuidados de saúde. Esta utilização generalizada resulta dos benefícios distintivos oferecidos pelos PHIs, como configurações térmicas adaptáveis (onde as placas podem ser facilmente adicionadas ou removidas para se ajustar a diferentes necessidades térmicas), a simplicidade de limpeza necessária para manter elevados padrões de higiene, uma regulação eficaz da temperatura (essencial para usos criogénicos) e uma melhoria da eficiência na transferência de calor [2]. De forma semelhante, os permutadores de calor de placas são preferidos pela sua elevada área superficial em relação ao volume e taxas superiores de transferência de calor [3].

Uma PHE típica é composta por um conjunto de placas onduladas concebidas para melhorar a transferência de

¹ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

² Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; aguilaariaslaura@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

³ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; lizthalia.jimenez@reduc.edu; <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>, Camagüey; Cuba.

calor, com juntas colocadas de forma a selar um caminho entre as placas quando comprimidas dentro de uma estrutura. Estes caminhos permitem que fluidos, que podem entrar pelas mesmas ou opostas direções dentro do aparelho, transfiram calor ao atravessarem as placas em configurações paralelas ou de fluxo contrário. Como resultado, um PHE pode acomodar uma variedade de arranjos de fluxo, como simples, múltiplas, em série, paralelo e as suas várias combinações [1].

Como o processo de concepção do permutador de calor é complicado, requer escolhas subjetivas em cada etapa do projeto. Além disso, a metodologia de concepção consiste em múltiplas etapas e baseia-se em informação provisória até que os objetivos sejam alcançados. Normalmente, o design de um permutador de calor engloba estes componentes: transferência de calor para cumprir o desempenho exigido, despesas totais, as dimensões geométricas reais e a queda total de pressão [3].

Como referido em [4], grande parte da informação de design relacionada com permutadores de calor de placas é mantida como proprietária. Não é comum encontrar uma abordagem passo a passo para calcular o tamanho e a estrutura interna do permutador a partir da informação disponível do processo. O software de negociação existente não permite aos utilizadores aceder aos modelos matemáticos subjacentes, e os engenheiros frequentemente não conhecem os termos e configurações específicos destes exchangers. Esta referência também enfatiza que os resultados experimentais na literatura sobre transferência de calor e queda de pressão são limitados. No entanto, estão disponíveis correlações adimensionais para coeficientes de transferência de calor, bem como para a queda de pressão dentro dos canais de permutadores de chapas de calor. As recomendações para valores constantes e expoentes em equações correlacionadas baseiam-se em dados limitados e no conhecimento dos fabricantes. O dimensionamento correto de um permutador de placas depende da carga térmica necessária e das características do próprio permutador de calor. A sua adaptabilidade e benefícios operacionais acompanham o desafio de criar um modelo para o seu comportamento de fluxo estacionário [1].

Até agora, foram realizados um número considerável de estudos para investigar as características da transferência de calor e da queda de pressão nos permutadores de placas, que estão a ser continuamente melhorados e desenvolvidos por académicos e tecnólogos [5].

Os investigadores exploraram e avaliaram o design dos permutadores de calor de placas. Neste sentido, [3] realizou investigação com o objetivo de obter uma compreensão mais clara de várias características das placas, como ângulos em chevron, espaçamento dos canais, alturas das placas e tipo de placa nos cálculos de transferência de calor e queda de pressão, utilizando o software PHEX® como recurso computacional para avaliar e ilustrar o impacto de cada parâmetro através da simulação de um estudo de caso

Industrial. Em [6], foi desenvolvido e construído um sistema experimental para examinar a influência do uso de nanofluidos dentro de um permutador de calor de placas. Os testes envolveram três fluidos de trabalho diferentes: água da torneira e nanofluidos contendo 1 e 0,5% de Al_2O_3 em água, durante um ciclo quente, com caudais entre 100 e 450 L/h em cada caso. Além disso, [1] realizou uma avaliação de desempenho apoiada pelos princípios da primeira e segunda leis da termodinâmica para vários arranjos viáveis de funcionamento de permutadores de calor com juntas de placa. Para garantir isto, foram realizadas 40 simulações utilizando o modelo diferencial U-distribuído reportado por vários investigadores, aplicando uma técnica de disparo adaptativo com blotter amortecido. A eficácia da transferência de calor e exergia, geração de entropia adimensional, perdas entrópicas potenciais e índices de eficiência energética foram calculados quando ambos os fluidos estavam acima ou abaixo da temperatura ambiente, bem como quando pelo menos um dos fluidos ultrapassava o limiar de temperatura ambiente.

Em [7], a eficiência de um permutador de calor de placa corrugada transformada foi analisada numericamente usando ANSYS-Fluent 20R1. Foi implementado um modelo transitório baseado em pressão para a análise. Para este estudo, foi utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Foi utilizado um nanofluido composto por água misturada com nanopartículas de óxido metálico (Al_2O_3) para melhorar a condutividade térmica, e foi considerada uma ampla gama de números de Reynolds, variando entre 1.000 e 12.000. Noutras investigações [8], os investigadores procuraram melhorar a eficiência da transferência de calor entre placas e minimizar a perda de pressão durante o movimento de fluidos dentro do sistema. As simulações numéricas realizadas permitiram avaliar o fluxo de calor dentro do permutador de calor, bem como a queda de pressão e o desempenho global, alterando as taxas de fluxo e o espaçamento das placas. Outros autores [9] exploraram vários métodos para aumentar a eficiência térmica dos permutadores de placas usados no processamento de óleos vegetais através de múltiplos cálculos. Esta investigação partiu de um cenário base em que óleos vegetais foram arrefecidos com água dentro de permutadores de calor de placa, todos com um ângulo de chevron de 30° , juntamente com diferentes números de canais e superfícies de placas. De forma semelhante, em [10], o estudo numérico examinou a transferência de calor por convecção, eficiência energética e queda de pressão de $\gamma-Al_2O_3$ /nanofluido de água num permutador de calor de placas com junta numa gama variada de concentração de partículas (0% a 6%), enquanto as características termofísicas do $\gamma-Al_2O_3$ /nanofluido de água foram obtidas a partir de relações empíricas estabelecidas.

De forma semelhante, [5] realizou o projeto inicial de permutadores de calor de placas com juntas para fluxo monofásico usando o MATLAB como plataforma computacional. Posteriormente, foi criada uma aplicação de software para realizar cálculos térmicos e hidráulicos de

permutadores de calor com vedações de placa, com base em correlações estabelecidas encontradas em investigação existente. O programa de design desenvolvido foi posteriormente avaliado quanto à precisão e fiabilidade em comparação com vários designs aprovados de permutadores de calor de placas com juntas. Em [4], foi introduzida uma abordagem de design direta para permutadores de calor de placas, que enfatizava o uso de placas uniformes, negligenciando vários fatores, como a condução de calor ao longo das placas e nos condutos de fluxo, juntamente com as propriedades dos fluidos que mudam com a temperatura. Em [11], foi explorada uma otimização de design para permutadores de calor de placas e tramos de múltiplas passagens usando uma disposição mista de placas, onde a abordagem foi estruturada como um problema matemático para determinar o valor mínimo de uma função objetivo implícita discreta/contínua não linear limitada por desigualdades. Os parâmetros de otimização avaliados nesta investigação incluíram o número de passagens para ambos os fluxos de fluido, o número de placas com diferentes tipos de corrugação em cada passagem, e o tipo e tamanho das placas.

Em [12], foram analisados avanços nos princípios de concepção de permutadores de placas, focando-se em como podem melhorar a recuperação de calor e a eficiência energética, ao mesmo tempo que se avalia a disposição ideal de um permutador de chapas multi-passagens e permutador de quadro com configurações de placas mistas. As variáveis consideradas para otimização nesta análise incluíram o número de passagens para cada fluxo de fluido, o número de placas com diferentes desenhos de corrugação em cada passagem, bem como o tipo e as dimensões das placas. Foi criado um modelo matemático para estimar o valor da função alvo dentro do espaço das variáveis de otimização para o permutador de calor de placas. Em [13], foi desenvolvido um sistema de placas e chassis para reduzir a temperatura de um fluxo de suspensão suspenso, para o qual foram calculados múltiplos parâmetros como a taxa de transferência de calor e o número necessário de placas para o PHE, e também foram analisadas otimizações de custos para o PHE projetado. Outros investigadores [14] introduziram uma abordagem simples de CAE para projetar e otimizar rapidamente as dimensões dos permutadores de placas, com o objetivo de recuperar calor. Nesta investigação, a dinâmica do fluxo e os processos de transferência de calor num permutador de placa de calor de recuperação ar-ar com placa de contrafluxo foram analisados usando métodos numéricos, enquanto a queda de pressão e a eficácia foram avaliadas com base na velocidade de entrada para três diferentes tamanhos de permutadores de calor reais.

Finalmente, [15] introduziu uma metodologia inovadora e abrangente para o design ideal de permutadores de calor com juntas e placas soldadas, adaptando-se a várias formas

de placas e padrões de fluxo. Este método combina uma nova estratégia de design com um sistema de otimização destinado a alcançar a melhor solução que minimize a área total de transferência, criando uma série de relações entre as temperaturas em cada bloco de passagem simples, utilizando as temperaturas conhecidas de entrada e saída dos fluxos de processo. Consequentemente, foi estabelecido neste estudo um modelo matemático MINLP para determinar a combinação ótima de configurações de passagens de escoamento comercialmente disponíveis e formas de placas, cumprindo as limitações viáveis do design. De seguida, foram enfatizadas as diferenças nas estratégias de design para PEFs de junta e soldados.

Numa determinada fábrica de laticínios cubana, deseja-se arrefecer 2.500 kg/h de um fluxo líquido de leite de vaca entre 85 °C e 25 °C usando água fria como refrigerante disponível a 5 °C. Por isso, foi proposto um permutador de calor de placas com junta para realizar este serviço de transferência de calor. Neste contexto, o objetivo deste estudo é conceber um permutador de calor de placas com junta do ponto de vista termo-hidráulico, utilizando a metodologia de concepção reportada por [16], onde foram calculados vários parâmetros importantes de projeto, como o número total de placas, a carga térmica, o coeficiente total de transferência de calor, a superfície e as quedas de pressão de ambos os fluidos. Além disso, foi estimado e atualizado o custo de compra do permutador de calor com placa de junta concebido para o ano de 2025.

2. Materiais e métodos.

2.1. Exposição do problema.

É necessário arrefecer 2.500 kg/h de um jato de leite de vaca líquido quente entre 85 °C e 25 °C usando água fria a 5 °C. Os valores de placa efetiva, comprimento efetivo e largura efetiva são 0,75 m², 1,5 m e 0,5 m, respetivamente, enquanto o espaçamento das placas, espessura e material da placa são 0,003 m, 0,0006 m e aço inoxidável, respetivamente. É estabelecida uma queda máxima de pressão admissível de 50.000 Pa e 20.000 Pa para os fluxos de água e leite, respetivamente. Para projetar, do ponto de vista termo-hidráulico, um permutador de calor com vedações de placa adequado para este serviço de transferência de calor, com um sistema de fluxo 1:1 e utilizando a metodologia reportada por [16].

2.2 Metodologia de design.

Projeto preliminar

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluidos:

A Tabela 1 apresenta os dados iniciais que devem ser definidos para os dois fluidos.

Tabela 1. Dados iniciais a definir para os dois fluidos.

Parâmetro	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Caudal mássico	kg/h	m_c	m_h
Temperatura da entrada	°C	t_1	T_1

Temperatura de saída	°C	t_2	T_2
Queda máxima de pressão permitida	Pa	$\Delta P_{c(p)}$	$\Delta P_{h(p)}$
Fator de Incorporação	W/m ² °C	R_c	R_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido Frio (\bar{t})

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

- Fluido Quente (\bar{T})

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

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas que devem ser definidas para ambos os fluidos à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 2. Propriedades físicas definidas para ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Densidade	kg/m ³	ρ_c	ρ_h
Viscosidade	Pa.s	μ_c	μ_h
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	Cp_c	Cp_h
Condutividade Térmica	W/m.K	k_c	k_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica (Q):

- Para o fluido quente:

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

Onde a unidade de Q é kW.

Passo 5. Taxa de fluxo mássico necessária do fluido frio (água de arrefecimento) (m_c):

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

Onde é dada em kW e em kJ/kg.K. QCp_c

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor (U_0)

O coeficiente total de transferência de calor será assumido com base nos valores reportados por [16] para trocadores de placas.

Passo 7. Diferença média de temperatura logarítmica (ΔTlm):

- Para uma disposição contracorrente:

$$\Delta Tlm = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

Passo 8. Número de Unidades de Transferência (NTU):

$$NTU = (T_1 - T_2) / \Delta Tlm \quad (6)$$

Passo 9. Fator de correção da temperatura média logarítmica (F_t)

O fator de correção da temperatura média logarítmica será selecionado com base num valor reportado por [16] com base no valor NTU e na disposição do fluxo.

Passo 10. Diferença média de temperatura corrigida (ΔTm):

$$\Delta Tm = \Delta Tlm \cdot F_t \quad (7)$$

Passo 11. Área de superfície necessária (A_0):

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta Tm} \quad (8)$$

Onde é dada em kW e é dada em W/m².K.

Passo 12. Seleção dos vários parâmetros para as matrículas:

- Área efetiva da placa (A_p)
- Comprimento Efetivo (L_p)
- Largura efetiva (W_p)

Passo 13. Número de inscrições necessárias (N_0):

$$N_0 = \frac{A_0}{A_p} \quad (9)$$

Passo 14. Disposição do fluxo e número de passagens (N_p):

Passo 15. Número de canais por passagem (N_T):

$$N_T = \frac{N_0 - 1}{2} \quad (10)$$

Passo 16. Assunção do espaçamento das placas (b):

Passo 17. Área da Secção Transversal (A_f):

$$A_f = b \cdot W_p \quad (11)$$

Passo 18. Diâmetro médio equivalente (hidráulico) (d_e):

$$d_e = 2 \cdot b \quad (12)$$

- Fluido Quente:

Passo 19. Velocidade do canal para fluido quente (v_{ph}):

$$v_{ph} = \frac{m_h}{N_T \cdot \rho_h \cdot A_f} \quad (13)$$

Onde é dada em kg/s.m^h

Passo 20. Número de Reynolds para fluido quente (Re_h):

$$Re_h = \frac{\rho_h \cdot v_{ph} \cdot d_e}{\mu_h} \quad (14)$$

Passo 21. Número de Prandtl para fluido quente (Pr_h):

$$Pr_h = \frac{(Cp_h \cdot 1,000) \cdot \mu_h}{k_h} \quad (15)$$

Passo 22. Número de Nusselt para fluido quente (Nu_h):

$$Nu_h = 0.26 \cdot (Re_h)^{0.65} \cdot (Pr_h)^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_h}{\mu_{hw}}\right)^{0.14} \quad (16)$$

Onde o fator de correção de viscosidade = 1 segundo $\left(\frac{\mu_h}{\mu_{hw}}\right)^{0.14}$ [16].

Passo 23. Coeficiente de transferência de calor para fluido quente (h_h):

$$h_h = \frac{Nu_h \cdot k_h}{d_e} \quad (17)$$

- Líquido frio:

Passo 24. Velocidade do canal para fluido frio (v_{pc}):

$$v_{pc} = \frac{m_c}{N_T \cdot \rho_c \cdot A_f} \quad (18)$$

Onde é dada em kg/s. m_c

Passo 25. Número de Reynolds para fluido frio (Re_c):

$$Re_c = \frac{\rho_c \cdot v_{pc} \cdot d_e}{\mu_c} \quad (19)$$

Passo 26. Número de Prandtl para fluido frio (Pr_c):

$$Pr_c = \frac{(Cp_c \cdot 1,000) \cdot \mu_c}{k_c} \quad (20)$$

Passo 27. Número de Nusselt para fluido frio (Nu_c):

$$Nu_c = 0.26 \cdot (Re_c)^{0.65} \cdot (Pr_c)^{0.4} \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_{cw}}\right)^{0.14} \quad (21)$$

Onde o fator de correção de viscosidade = 1 segundo [16]. $\left(\frac{\mu_c}{\mu_{cw}}\right)^{0.14}$

Passo 28. Coeficiente de transferência de calor para fluido frio (h_c):

$$h_c = \frac{Nu_c \cdot k_c}{d_e} \quad (22)$$

Passo 29. Selecione a espessura da placa (X_p)

Passo 30. Selecione o material da placa e, portanto, a sua condutividade térmica (k_p)

Passo 31. Coeficiente global de transferência de calor calculado (U_C):

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{1}{R_h} + \frac{1}{R_c} + \frac{X_p}{k_p}} \quad (23)$$

O valor calculado do coeficiente global de transferência de calor deve ser comparado com o coeficiente global de transferência de calor assumido a partir do Passo 6. Se o erro percentual calculado pela equação (24) estiver entre -0% e +10%, o projeto é satisfatório, e então o projetista deve proceder ao cálculo da queda de pressão de ambos os fluidos.

$$\%Error = \frac{U_C - U_0}{U_C} \cdot 100 \quad (24)$$

Queda de pressão:

Passo 32. Defina o diâmetro da porta (d_{pt})

Passo 33. Área do Porto (A_{pt}):

$$A_{pt} = \frac{\pi \cdot d_{pt}^2}{4} \quad (25)$$

- Fluido Quente:

Passo 34. Fator de atrito para fluido quente (j_{fh}):

$$j_{fh} = 0.6 \cdot (Re_h)^{-0.3} \quad (26)$$

Passo 35. Queda de pressão na placa para o fluido quente (ΔP_{ph}):

$$\Delta P_{ph} = 8 \cdot j_{fh} \cdot \left(\frac{L_p}{d_e}\right) \cdot \frac{\rho_h \cdot v_{ph}^2}{2} \quad (27)$$

Passo 36. Velocidade pela porta para fluido quente (u_{pth}):

$$u_{pth} = \frac{m_h}{\rho_h \cdot A_{pt}} \quad (28)$$

Passo 37. Queda de pressão na porta para o fluido quente (ΔP_{pth}):

$$\Delta P_{pth} = 1.3 \cdot \frac{(\rho_h \cdot u_{pth}^2)}{2} N_p \quad (29)$$

Passo 38. Queda total de pressão para fluido quente (ΔP_{Th}):

$$\Delta P_{Th} = \Delta P_{ph} + \Delta P_{pth} \quad (30)$$

- Líquido frio:

Passo 39. Fator de atrito para fluido frio (j_{fc}):

$$j_{fc} = 0.6 \cdot (Re_c)^{-0.3} \quad (31)$$

Passo 40. Queda de pressão na placa para o fluido frio (ΔP_{pc}):

$$\Delta P_{pc} = 8 \cdot j_{fc} \cdot \left(\frac{L_p}{d_e}\right) \cdot \frac{\rho_c \cdot v_{pc}^2}{2} \quad (32)$$

Passo 41. Velocidade através da porta para fluido frio (u_{ptc}):

$$u_{ptc} = \frac{m_c}{\rho_c \cdot A_{pt}} \quad (33)$$

Passo 42. Queda de Pressão na Porta para Fluido Frio (ΔP_{ptc}):

$$\Delta P_{ptc} = 1.3 \cdot \frac{(\rho_c \cdot u_{ptc}^2)}{2} N_p \quad (34)$$

Passo 43. Queda total de pressão para fluido frio (ΔP_{Tc}):

$$\Delta P_{Tc} = \Delta P_{pc} + \Delta P_{ptc} \quad (35)$$

2.3. Custo de compra do permutador de calor desenhado com junta

De acordo com [16], o custo de compra de um permutador de calor com placa e chassi de aço inoxidável pode ser calculado usando a seguinte correlação [16]:

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot A^{0.95} \quad (36)$$

Onde:

- $C_{(2007)}$ - Custo do equipamento adquirido com referência a janeiro de 2007.
- A - Área do permutador de calor de placas [m²].

Uma vez calculado o custo de compra do permutador de placas para janeiro de 2007 usando a equação (36), foi atualizado para março de 2025 usando a seguinte equação:

$$C_{(2025)} = C_{(2007)} \cdot \frac{CE\ Index_{(2025)}}{CE\ Index_{(2007)}} \quad (37)$$

Onde:

- $C_{(2025)}$ - Custo do equipamento adquirido mencionado em março de 2025.
- $CE\ Index_{(2025)}$ - Índice de Custos da Engenharia Química em março de 2025 = 791,6 [17].
- $CE\ Index_{(2007)}$ - Índice de Custos da Engenharia Química em janeiro de 2007 = 509,7 [16].

3. Análise e interpretação dos resultados.

3.1. Projeto preliminar.

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluidos:

A Tabela 3 mostra os valores dos dados iniciais para os dois fluidos.

Tabela 3. Valores dos dados iniciais para os dois fluidos.

Parâmetro	Unidades	Água	Leite
Caudal mássico	kg/h	-	2,500
Temperatura da entrada	°C	5	85
Temperatura de saída	°C	30	25
Queda máxima de pressão permitida	Pa	50,000	20,000
Fator de Incorporação	W/m ² C	8,000	1,000

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido Frio (\bar{t})

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{5 + 30}{2} = 17.5\ ^\circ C \quad (1)$$

- Fluido Quente (\bar{T})

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{85 + 25}{2} = 55\ ^\circ C \quad (2)$$

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

A Tabela 4 mostra os valores das propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média calculada no Passo 2, que foram retirados dos dados reportados por [18] para o leite e por [19] para a água.

Tabela 4. Valores das propriedades físicas de ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Água	Leite
Densidade	kg/m ³	998.7	1,015.4
Viscosidade	Pa.s	0.00107	0.002127
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	4.184	3.931
Condutividade Térmica	W/m.K	0.599	0.559

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica (Q):

- Para o fluido quente:

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

$$= \frac{2,500}{3,600} \cdot 3.931 \cdot (85 - 25)$$

$$= 163.79\ kW$$

Passo 5. Caudal mássico necessário do fluido frio (água fria) (m_c):

$$m_c = \frac{Q}{C p_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{163.79}{4.184 \cdot (30 - 5)} \quad (4)$$

$$= 1.5659\ kg/s$$

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor (U_0)

Tendo em conta os valores reportados por [16] entre o intervalo de 2.000 e 4.500 W/m². K, assumiu-se um valor preliminar de 2.200 W/m². K de U_0 .

A Tabela 5 apresenta os valores dos parâmetros incluídos nos passos 7-18.

Tabela 5. Valores para os parâmetros incluídos nos passos 7-11.

Passo	Parâmetro	Valor	Unidades
7	Diferença média de temperatura logarítmica	34.60	°C
8	Número de Unidades de Transferência	1.73	-
9	Fator de correção da temperatura média logarítmica ¹	0.975	-
10	Diferença Média de Temperatura Corrigida	33.73	°C
11	Área de superfície necessária	2.21	M ²

¹ Conforme reportado [16].

Fonte: Explicação própria.

Passo 12. Seleção de vários parâmetros para as matrículas: Com base nas sugestões reportadas por [16] para dimensões típicas das placas, os seguintes valores foram selecionados para vários parâmetros das placas:

- Área de superfície efetiva da laje = 0,75 m². (A_p)
- Comprimento efetivo = 1,5 m. (L_p)
- Largura efetiva = 0,5 m. (W_p)

Passo 13. Número de inscrições necessárias: (N_0)

$$N_0 = \frac{A_0}{A_p} = \frac{2.21}{0.75} = 2.95 \sim 3 \quad (9)$$

Passo 14. Disposição do fluxo e número de passagens (N_p):

A disposição do fluxo será 1:1, com um número de passagens (N_p) de 1. N_p

Passo 15. Número de canais por passagem (N_T):

$$N_T = \frac{N_0 - 1}{2} = \frac{3 - 1}{2} = 1 \quad (10)$$

Passo 16. Assunção do espaçamento das placas (b):
Assumiu-se um espaçamento das placas de 3 mm = 0,003 m, um valor típico segundo [16].

Passo 17. Área da Secção Transversal (A_f):
 $A_f = b \cdot W_p = 0.003 \cdot 0.5 = 0.0015 \text{ m}^2 \quad (11)$

Passo 18. Diâmetro médio equivalente (hidráulico) (d_e):
 $d_e = 2 \cdot b = 2 \cdot 0.003 = 0.006 \text{ m} \quad (12)$

A Tabela 6 mostra os resultados dos parâmetros incluídos nos passos 19-28, onde os coeficientes de transferência de calor são calculados para cada fluido.

Tabela 6. Resultados dos parâmetros incluídos nos passos 19-28.

Parâmetro	Leite	Água	Unidades
Velocidade do canal	0.456	1.045	m/s
Número de Reynolds	1,306	5,852	-
Número de Prandtl para fluido quente	14.96	7.47	-
Número de Nusselt	81.34	163.36	-
Coefficiente de transferência de calor	7,578	16,309	L/m ² . K

Fonte: Explicação própria.

Passo 29. Selecione a espessura da placa (X_p):
Foi selecionado um valor de 0,0006 m para a espessura da placa.

Passo 30. Selecione o material da placa e, portanto, a sua condutividade térmica (k_p):
O aço inoxidável foi escolhido para o material da placa, por isso = 16 W/m.K k_p [16].

Passo 31. Coeficiente global de transferência de calor calculado (U_c):

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_h} + \frac{1}{R_h} + \frac{1}{R_c} + \frac{X_p}{k_p}} \quad (23)$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{16,309} + \frac{1}{7,578} + \frac{1}{1,000} + \frac{1}{8,000} + \frac{0.0006}{16}}$$

$$U_c = 2,194.06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Erro percentual

$$\%Error = \frac{U_c - U_0}{U_c} \cdot 100$$

$$\%Error = \frac{2,194.06 - 2,200}{2,194.06} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\%Error = -0.27\% \sim 0\%$$

3.2. Queda de pressão.

Passo 32. Defina o diâmetro da porta (d_{pt}):
O valor de seleção para o diâmetro da porta (era de 0,1 m. d_{pt})

Passo 33. Área do Porto (A_{pt}):
 $A_{pt} = \frac{\pi \cdot d_{pt}^2}{4} = \frac{3.14 \cdot (0.1)^2}{4} = 0.00785 \text{ m}^2 \quad (25)$

A Tabela 7 mostra os resultados dos parâmetros incluídos nos passos 34-43 para cada fluido:

Tabela 7. Resultados dos parâmetros incluídos nos passos 34-43.

Parâmetro	Leite	Água	Unidades
Fator de atrito	0.0697	0.0445	-
Queda de pressão na placa	14,716.33	48,532	Pa
Velocidade pelo porto	0.087	0.1997	m/s
Queda de pressão nas portas	4.996	25.888	Pa
Queda total de pressão	14,720	48,558	Pa

Fonte: Explicação própria.

3.3. Custo de compra do permutador de calor concebido com placa juntada.

Usando a equação (36), onde A – área superficial necessária = 2,21 m², o custo de compra do permutador de placas, referindo-se a janeiro de 2007, é:

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot A^{0.95} \quad (36)$$

$$C_{(2007)} = 1,350 + 180 \cdot 2.21^{0.95}$$

$$C_{(2007)} = \text{USD } \$ 1,733$$

Depois, para atualizar este custo de compra para março de 2025, foi utilizada a equação (37):

$$C_{(2025)} = C_{(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index}_{(2025)}}{CE \text{ Index}_{(2007)}} \quad (37)$$

$$C_{(2025)} = 1,733 \cdot \frac{791.6}{509.7}$$

$$C_{(2025)} = \text{USD } \$ 2,692$$

4. Discussão

De acordo com os resultados, a carga térmica (Q) tinha um valor de 163,79 kW, o que requer uma taxa de fluxo mássico para a água de arrefecimento (m_c) de 1,5659 kg/s (5.637.24 kg/h). Além disso, a área superficial necessária era de 2,21 m², com uma diferença de temperatura média corrigida de 33,73 °C e um número obrigatório de placas de 3. Este baixo número de painéis deve-se ao valor relativamente baixo da carga térmica e ao valor elevado do coeficiente global de transferência de calor assumido (2.200 W/m². K), que depois influencia o valor baixo da área calculada e, assim, o

número necessário de placas. No permutador de calor de placas 1:1 projetado em [16] para arrefecer 27,8 kg/s de um fluxo de metanol de 95 °C a 40 °C usando água salobra a 25 °C, a capacidade térmica é de 4.340 kW, o caudal mássico necessário de água salobra é de 68,9 kg/s e a área superficial requerida é de 72,92m², por isso, precisavam de 97 matrículas.

O coeficiente de transferência de calor para a água de arrefecimento (16.309 W/m². K) era 2,15 vezes superior ao valor deste parâmetro para o leite (7,578 W/m². K), o que se deve ao facto de o caudal mássico da água de arrefecimento (5.637,24 kg/h) ser 2,25 vezes superior ao caudal mássico do leite (2.500 kg/h). Isto influencia então a velocidade do canal para a água (1,045 m/s) é maior do que a velocidade do canal para o leite (0,456 m/s), obtendo assim que o número de Reynolds para a água (5,852) é 4,48 vezes superior ao número de Reynolds para o leite (1,306), que influencia esta diferença. Isto coincide com o reportado por [16], onde o coeficiente de transferência de calor para água salobra (16,439 W/m². K) é 3,37 vezes superior ao coeficiente de transferência de calor do metanol (4.870 W/m². K). Os valores do número de Reynolds obtidos no presente estudo coincidem com os reportados por (Mehrabian, 2009), indicando que o fluxo de fluido nos canais dos permutadores de placas é geralmente em números de Reynolds baixos, e ao mesmo tempo em condições turbulentas.

Um valor para o coeficiente global de transferência de calor calculado de 2.194,06 W/m². K foi obtido, o que coincide muito de perto com o coeficiente global de transferência de calor assumido (2.200 W/m². K), embora tenha sido obtido um erro percentual calculado de -0,27%, que corresponde ao intervalo proposto por [16] para este parâmetro, indicando assim que o projeto é satisfatório, não é necessário realizar iterações adicionais e que devemos proceder ao cálculo das quedas de pressão para ambos os fluidos. No permutador de placas projetado em [16], o valor inicial assumido para o coeficiente total de transferência de calor era de 2.000 W/m².K.

Relativamente às quedas de pressão, o valor do fator de atrito para o leite (0,0697) era 1,57 vezes superior ao fator de atrito para a água (0,0445), o que se deve ao valor mais baixo obtido para o número de leite de Reynolds em comparação com o número de água de Reynolds. A queda de pressão na placa para a água (48.532 Pa) foi 3,29 vezes maior do que o valor deste parâmetro para o leite, o que se deve em grande parte ao valor mais elevado obtido para a velocidade do canal de água (1,045 m/s) em comparação com a velocidade do canal de leite (0,456 m/s). De forma semelhante, a velocidade através do porto é maior para a água (0,1997 m/s) em comparação com o valor deste parâmetro para o leite (0,087 m/s) porque a água tem um caudal mássico mais elevado, enquanto a queda de pressão na porta para a água (25,888 Pa) é 5,18 vezes maior do que a queda de pressão na porta para o leite (4,996 Pa) principalmente porque a água tem um valor mais elevado da

velocidade através da porta. A queda total de pressão para a água (48.558 Pa) é 3,29 vezes maior do que a queda total para o leite (14.720), porque tanto a queda de pressão da placa como a queda de pressão na porta são mais elevadas para a água em comparação com os valores destes parâmetros para o leite.

Isto é consistente com os resultados do permutador de calor de placas com junta projetado em [16], onde a queda de pressão na placa (26.547 Pa), a queda de pressão na porta (50.999 Pa) e a queda total de pressão (77.546 Pa) são superiores para o fluido frio (água) em comparação com o valor da queda de pressão da placa (5.799 Pa), a queda de pressão na porta (10.860 Pa) e a queda total de pressão (16.659 Pa) para o fluido quente (metanol). Finalmente, no serviço de troca de calor estudado neste artigo, os valores calculados das quedas totais de pressão para ambos os fluidos estão abaixo das quedas de pressão máximas estabelecidas pelo processo, que são 50.000 Pa para água e 20.000 Pa para leite. Assim, conclui-se que o permutador de calor de placas concebido neste estudo é adequado e apropriado do ponto de vista termo-hidráulico, podendo ser implementado com sucesso na aplicação solicitada de transferência de calor para arrefecimento do leite de vaca.

Em [13], foi projetado um permutador de calor de placas para arrefecer 231.000 kg/h de um fluxo de suspensão de 86,6 °C a 66 °C usando água de arrefecimento a 34 °C. Neste estudo, o número total de placas foi de 108, a área do permutador de calor das placas foi de 110,377m², a carga térmica foi de 1.132.500 kcal/h e o coeficiente total de transferência de calor foi de 327,17 kcal/h.m².(°C).

O custo de compra do permutador de calor de placas com junta, referido em janeiro de 2007, foi de 1.733 USD, enquanto o custo de compra do mesmo permutador de placas com junta, atualizado para março de 2025, foi de 2.692 USD.

5. Conclusões.

Um permutador de calor de placas com juntas foi concebido para arrefecer um jato de leite quente usando água fria como refrigerante. Foram calculados vários parâmetros importantes de projeto, sendo os mais importantes a carga térmica, o caudal mássico necessário da água refrigerada, a área superficial e o número de placas. De forma semelhante, os coeficientes de transferência de calor para ambos os fluidos foram estimados com base em correlações bem estabelecidas, bem como no coeficiente global de transferência de calor. Finalmente, as quedas de pressão de ambos os fluxos de fluido foram também calculadas e comparadas com os valores máximos estabelecidos pelo processo de permutador de calor. O permutador de calor projetado terá três placas, uma disposição de fluxo de 1:1, uma área de superfície de 2,21 m², uma carga térmica de 163,79 kW, um fluxo mássico necessário de água fria de 1,5659 kg/s (5.638 kg/h) e um coeficiente global de transferência de calor calculado de 2.194,06 W/m².K.

Tanto a queda total de pressão da água fria (48.558 Pa) como do leite (14.720 Pa) está abaixo dos valores máximos permitidos pelo processo, ou seja, 50.000 Pa para água e 20.000 Pa para leite. Concluiu-se que o PHE projetado custará 2.692 USD e poderá ser implementado satisfatoriamente, do ponto de vista termo-hidráulico, no serviço de transferência de calor.

6.- Contribuições dos autores (Taxonomia dos Papéis dos Contribuintes (CRediT))

1. Conceptualização: (Nome e apelido do autor)
2. Retenção de dados: (Nome e apelido do autor)
3. Conceptualização formal: Amaury Pérez Sánchez.
4. Curadoria de dados: Laura de la Caridad Arias Aguila.
5. Análise formal: Amaury Pérez Sánchez Lizthalia Jiménez Guerra.
6. Aquisição de fundos: Não aplicável.
7. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
8. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez, Lizthalia Jiménez Guerra.
9. Gestão de Projetos: Não aplicável.
10. Recursos: Não aplicável.
11. Software: Não aplicável.
12. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez.
13. Validação: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
14. Ecrã: Não aplicável.
15. Escrita - rascunho original: Lizthalia Jiménez Guerra, Laura de la Caridad Arias Aguila.
16. Escrita - revisão e edição: Amaury Pérez Sánchez.

7.- Apêndice

Nomenclatura.

A_0	Área de superfície necessária	M2
A_f	Área de secção transversal	M2
A_p	Área efetiva da placa	M2
A_{pt}	Área do porto	M2
b	Espaçamento das placas	-
C_p	Capacidade calorífica	kJ/kg.°C
d_e	Diâmetro Médio Equivalente (Hidráulico)	m
d_{pt}	Diâmetro da Porta	m
k	Condutividade Térmica	W/m.K
F_t	Fator de correção da temperatura média logarítmica	-
h	Coefficiente de transferência de calor	L/m ² . K
j_f	Fator de atrito	-
k_p	Condutividade térmica das placas	W/m.K
L_p	Comprimento Efetivo	m
m	Caudal mássico	kg/h

N_0	Número de inscrições necessárias	-
N_p	Número de passagens	-
N_T	Número de canais por passagem	-
NTU	Número de Unidades de Transferência	-
Nu	Número de Nusselt	-
Pr	Número de Prandtl	-
ΔP_p	Queda de pressão na placa	Pa
ΔP_{pt}	Queda de pressão nas portas	Pa
ΔP_T	Queda total de pressão	Pa
Q	Carga Térmica	kW
R	Fator de Incorporação	W/m ² .°C
Re	Número de Reynolds	-
t	Fluido de Temperatura Fria	°C
\bar{t}	Fluido frio a temperatura média	°C
T	Fluido de Temperatura Quente	°C
T	Fluido quente a temperatura média	°C
ΔT_{lm}	Diferença média de temperatura logarítmica	°C
ΔT_m	Diferença Média de Temperatura Corrigida	°C
u_{pt}	Velocidade pelo porto	m/s
U_c	Coefficiente global de transferência de calor calculado	L/m ² . K
U_0	Coefficiente global de transferência de calor assumido	L/m ² . K
v_p	Velocidade do canal	m/s
W_p	Largura efetiva	m
X_p	Espessura da placa	m

Símbolos gregos

ρ	Densidade	kg/m ³
μ	Viscosidade	Pa.s
μ_h	Viscosidade do fluido à temperatura da parede	Pa.s

Subíndices

1	Entrada
2	Saída
c	Fluido frio
h	Fluido quente

8.- Referências.

- [1] J. S. R. Tabares, L. Perdomo-Hurtado e J. L. Aragón, "Estudo do Desempenho dos Permutadores de Calor com Junta Baseado em Índices de Eficiência Energética," *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, p. 113902, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113902>
- [2] F. A. S. Mota, E. P. Carvalho e M. A. S. S. Ravagnani, "Capítulo 7. Modelação e Design de Permutadores de Calor de Chapas", em *Heat Transfer Studies and Applications*, M. S. N. Kazi, Ed. Londres, Reino Unido: InTech, 2015. <http://dx.doi.org/10.5772/60885>
- [3] M. M. Abu-Khader, "Perspetivas sobre Parâmetros de Projeto para Melhorar o Desempenho de Permutadores de Calor de Placas Juntadas," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 115, pp. 13-18, 2025. <https://doi.org/10.3303/CET25115003>
- [4] M. A. Mehrabian, "Construção, Desempenho e Design Térmico de Trocadores de Calor de Placa," *Proc. IMechE: Parte E: J. Process Mechanical Engineering*, vol. 223, pp. 123-131, 2009. <https://doi.org/10.1243/09544089JPM270>
- [5] M. S. S. Misbah e A. R. Ballil, "Projeto Preliminar Assistido por Computador de Permutadores Práticos de Placas de Calor com Juntas," *LJEST*, Vol. 4, Nº 2, 2024. https://www.researchgate.net/publication/384291441_Computer-Aided_Preliminary_Design_of_Practical_Gasket_Plate_Heat_Exchange
- [6] U. Kayabaşı, S. Kakaç, S. Aradag e A. Pramuanjaroenkij, "Investigação Experimental do Desempenho Térmico e Hidráulico de um Permutador de Placas de Calor Usando Nanofluidos," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 92, Nº 3, pp. 783-796, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-01987-7>
- [7] S. Biswas, M. I. Inam e P. C. Roy, "Transferência de Calor e Análise de Fluxo de Fluidos num Permutador de Calor de Chapas Corrugadas", apresentado na Conferência Internacional de Engenharia Mecânica, Industrial e Energética, Khulna, Bangladesh, 2022. https://www.researchgate.net/publication/367219221_Heat_Transfer_and_Fluid_Flow_Analysis_in_a_Corrugated_Plate_Heat_Exchange
- [8] K. Boukhadia e H. Ameer, "Estudo Numérico do Fluxo em Placas e Permutadores de Calor com Juntas," *J. Sc. & Tech.*, vol. 02, nº 01, pp. 120-127, 2020. <https://jst.univ-tam.dz/wp-content/uploads/2020/07/ID-20-2-01-18.pdf>
- [9] A.-A. Neagu e C. I. Konceag, "Melhoria da Eficiência Térmica dos Permutadores de Calor de Placas de Junta Usados no Processamento de Óleos Vegetais," *Inventions*, vol. 10, p. 10, 2025. <https://doi.org/10.3390/inventions10010010>
- [10] N. Bozorgan e M. Shafahi, "Análise de Desempenho de Trocadores de Calor de Placas Juntadas Usando Nanofluido," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 4, pp. 65-72, 2017. <https://doi.org/10.22075/jhmtr.2017.1089.1077>
- [11] O. Arsenyeva, L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko e G. Khavin, "Modelação Matemática e Design Ótimo de Permutadores de Calor de Placas e Quadros," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 18, pp. 1-6, 2009. <https://doi.org/10.3303/CET0918129>
- [12] O. P. Arsenyeva, L. L. Tovazhnyansky, P. O. Kapustenko e G. L. Khavin, "Projeto Ótimo de Trocadores de Calor de Chapas e Estruturas para Recuperação Eficiente de Calor nas Indústrias de Processo," *Energy*, vol. 36, pp. 4588-4598, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.022>
- [13] K. Sreejith, B. Varghese, D. Das, D. Devassy, Harikrishnan e G. K. Sharath, "Design e Otimização de Custos de Trocadores de Calor de Placas," *Research Inventy: International Journal of Engineering and Science*, vol. 4, nº 10, pp. 43-48, 2014. <https://www.researchinventy.com/papers/v4i10/F0410043048.pdf>
- [14] V. Dvořák e T. Vít, "Métodos CAE para o Design de Permutadores de Calor de Placas," *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 234-243, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.613>
- [15] K. Xu, K. Qin, H. Wu e R. Smith, "Um Novo Método Baseado em Otimização Assistida por Computador para o Projeto de Permutadores de Calor de Placas Multi-Passagem Single-Pass," *Processes*, vol. 10, p. 767, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10040767>
- [16] R. Sinnott e G. Towler, *Design de Engenharia Química*, 6.ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [17] S. Jenkins, "Indicadores Econômicos," *Chemical Engineering*, vol. 132, nº 6, p. 48, 2025.
- [18] P. F. Fox, T. Uniacke-Lowe, P. L. H. McSweeney e J. A. O'Mahony, *Química e Bioquímica de Laticínios*, 2.ª ed. Londres, Reino Unido: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>
- [19] ChemicalLogic, "Propriedades Termodinâmicas e de Transporte da Água e do Vapor," 2.0 ed. Burlington, EUA: ChemicalLogic Corporation, 2003.

Avaliação dos riscos ocupacionais na indústria leiteira equatoriana.

Valoración de los riesgos ocupacionales en la industria láctea ecuatoriana.

Mayerli Angeline Mejía Monar¹ ; Carlos Alberto Velásquez Avilés² & Ivan Patricio Viteri García³

Recebido: 26/06/2025 – Aceite: 19/08/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

Esta revisão analisa sessenta publicações (2013-2025) para avaliar como os riscos profissionais são prevenidos nas fábricas de laticínios, com ênfase nas experiências latino-americanas e, em particular, equatorianas. A análise está estruturada em torno de cinco linhas de ação: (i) Boas Práticas de Fabrico combinadas com a metodologia 5S; (ii) ergonomia participativa destinada a redesenhar tarefas; (iii) bloqueio digital ligado à manutenção preditiva; (iv) controles químicos baseados em armários ventilados e sensores de amoníaco, e (v) sistemas integrados de gestão ISO 45001–ISO 22000. Em média, estas medidas reduzem a taxa de acidentes entre 22% e 36%, o que apoia a ideia de que a sobreposição de barreiras técnicas e organizacionais aumenta a proteção. No entanto, a maioria dos estudos oferece acompanhamentos breves e utiliza métricas diversas, pelo que o trabalho longitudinal e os quadros de medição unificados são aconselhados para confirmar a sustentabilidade dos benefícios.

Palavras-chave.

segurança leiteira ocupacional; BPM; 5S; ergonomia participativa; bloqueio digital de tagout; manutenção preditiva; gestão química; ISO 45001; ISO 22000.

Resumo.

Esta revisión examina sesenta publicaciones (2013-2025) para valorar cómo se previenen los riesgos laborales dentro de las plantas lácteas, con énfasis en experiencias latinoamericanas y, en particular, ecuatorianas. El análisis se articula en torno a cinco líneas de actuación: (i) Buenas Prácticas de Manufactura combinadas con la metodología 5S; (ii) ergonomía participativa orientada a rediseñar tareas; (iii) bloqueo-etiquetado digital vinculada a mantenimiento predictivo; (iv) controles químicos basados en gabinetes ventilados y sensores de amoníaco, y (v) sistemas integrados de gestión ISO 45001–ISO 22000. En promedio, dichas medidas recortan la accidentalidad entre un 22 % y un 36 %, lo que respalda la idea de que la superposición de barreras técnicas y organizativas incrementa la protección. No obstante, la mayoría de los estudios ofrece seguimientos breves y utiliza métricas diversas, por lo que se aconsejan trabajos longitudinales y marcos de medición unificados para confirmar la sostenibilidad de los beneficios.

Palabras clave.

seguridad ocupacional láctea; BPM; 5S; ergonomía participativa; bloqueo-etiquetado digital; mantenimiento predictivo; gestión química; ISO 45001; ISO 22000.

1. Introdução

1.1.- Riscos profissionais na indústria leiteira

A indústria láctea desempenha um papel estratégico nas economias de muitas regiões, incluindo o Equador, através da transformação do leite cru em derivados (queijos, iogurtes, leite em pó) e da geração de emprego direto nas fábricas de processamento e no setor primário. No entanto, esta cadeia de produção envolve mecânica (equipamentos rotativos, linhas de embalagem), ergonómica (manuseamento manual de cargas, posturas forçadas), química (soluções alcalinas/ácidas em CIP, amoníaco na refrigeração), física (ruído, vibrações, stress térmico) e biológica (exposição a zoonoses na ordenha). Numerosos estudos indicam que a taxa de acidentes em fábricas de laticínios é relativamente elevada em comparação com outros subsectores alimentares [1, 3, 4].

Apesar das intervenções documentadas em contextos europeus e norte-americanos, existe uma lacuna na

evidência sobre implementação e eficácia em PME e em contextos latino-americanos, particularmente no Equador. Além disso, a heterogeneidade das métricas empregues (acidentes por milhão de horas-homem, pontuações RULA/REBA, MTBF, níveis de amoníaco ppm, pontuações climáticas de segurança) dificulta a comparação de resultados e a retirada de conclusões globais [16, 49, 50]. Por isso, é essencial rever de forma integrada as estratégias de prevenção utilizadas, a sua eficácia e adaptabilidade ao contexto da indústria leiteira equatoriana.

A indústria leiteira apresenta uma combinação única de riscos decorrentes da interação entre processos manuais e automatizados. As operações de acendimento, pasteurização, embalagem e limpeza no local (CIP) expõem os trabalhadores a riscos mecânicos, como aprisionamento em equipamentos rotativos, bem como a riscos químicos derivados do uso de soluções cáusticas e refrigerantes como amoníaco. A isto juntam-se fatores físicos – ruído,

¹ Universidade Técnica de Babahoyo; mmejiam@faciag.utb.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0003-9849-2102>, Babahoyo; Equador.

² Universidade Técnica de Babahoyo; cvelasquez904@faciag.utb.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0006-5593-6641>, Babahoyo; Equador.

³ Universidade de Guayaquil; ivan.viteriga@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0003-0522-3302>, Guayaquil; Equador.

vibrações e stress térmico nas câmaras de refrigeração – e fatores biológicos, ligados ao manuseamento do leite cru e à possível transmissão de zoonoses. Esta diversidade de riscos requer uma abordagem preventiva abrangente que inclua controlos técnicos, organizacionais e culturais [41].

No contexto equatoriano, a situação agrava-se pela predominância de pequenas e médias fábricas com limitações tecnológicas e orçamentais. Estudos locais mostram que a falta de protocolos padronizados e a má formação aumentam a frequência de acidentes, especialmente em tarefas de limpeza e manutenção. Além disso, a rotatividade de pessoal e a informalidade laboral dificultam a consolidação de uma cultura preventiva. Por isso, a identificação e priorização de riscos críticos – ergonómicos, químicos e mecânicos – torna-se um ponto de partida essencial para o desenho de estratégias adaptadas à realidade das PME leiteiras [42].

1.2.- Modelos teóricos de segurança (Reason, NIOSH)

A segurança na indústria leiteira é melhor abordada a partir de uma perspetiva sistémica, onde a interação entre componentes humanos, técnicos e organizacionais define a resiliência global [1]. O modelo de Reason explica que os acidentes surgem do alinhamento de falhas latentes e ativas; Por isso, é crucial sobrepor barreiras de controlo [3]. A hierarquia de controlos do NIOSH prioriza a eliminação ou substituição de riscos (por exemplo, substituir álcalis cáusticos por detergentes enzimáticos ou implementar sistemas fechados) em vez de depender exclusivamente do EPI [4, 28, 30].

O modelo do "queijo suíço suíço" proposto pela Reason é uma referência fundamental para compreender a génese dos acidentes em sistemas complexos. De acordo com esta abordagem, ocorrem incidentes quando falhas latentes (deficiências organizacionais, falta de manutenção) se alinham com falhas ativas (erro humano, condições inseguras), rompendo barreiras de defesa. Na indústria leiteira, estas barreiras incluem protocolos de bloqueio/etiquetagem, sistemas de ventilação e formação de funcionários. A ausência ou fraqueza de uma única camada aumenta exponencialmente a probabilidade de acidentes graves [10].

Entretanto, a hierarquia de controlos do NIOSH estabelece uma sequência lógica para mitigação de riscos: eliminação, substituição, controlos de engenharia, controlos administrativos e equipamentos de proteção individual (EPI). Aplicada ao setor dos laticínios, esta hierarquia envolve priorizar a substituição de produtos cáusticos por detergentes enzimáticos, implementar armários ventilados e sensores para reduzir a exposição a produtos químicos, e apenas, em última análise, recorrer ao EPI. Este quadro conceptual orienta a tomada de decisões para soluções mais eficazes e sustentáveis, evitando depender exclusivamente de medidas reativas [17].

1.3.- Boas Práticas e 5S

Boas Práticas de Fabrico com ordem 5S estabelecem um ambiente organizado que reduz derrames e confusão de reagentes, reduzindo deslizamentos e queimaduras em fábricas de laticínios [7, 11]. A ergonomia participativa, que envolve os operadores a redesenhar as suas tarefas (mesas ajustáveis, carrinhos motorizados, exoesqueletos passivos), está associada a quedas de 30–35% nas pontuações RULA/REBA e a uma diminuição concomitante do absentismo e da rotatividade [6, 8, 13–15]. O bloqueio/etiquetagem digital ligado à manutenção preditiva permite documentar e antecipar falhas em bombas CIP e outros equipamentos críticos, prolongando o MTBF e reduzindo acidentes mecânicos graves em cerca de 25–30% [12].

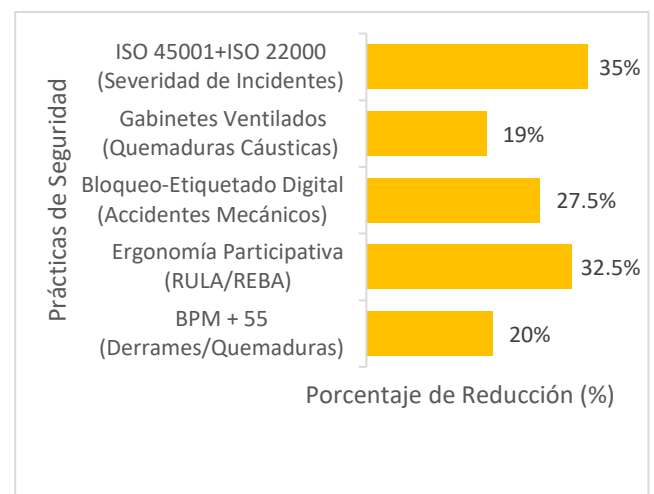


Figura 1. Redução de riscos na indústria leiteira.

No contexto equatoriano, estudos anteriores sobre avaliação de risco ocupacional em fábricas de queijo artesanal e fábricas de laticínios em diferentes províncias destacam riscos ergonómicos, químicos e térmicos, mas carecem de análise integrada das intervenções e de acompanhamento prolongado [35–42]. Isto sublinha a necessidade de adaptar e validar intervenções testadas noutros países do Equador.

Boas Práticas de Fabrico (GMP), complementadas pela metodologia 5S, constituem a base para a prevenção de riscos em ambientes leiteiros. Estas ferramentas organizacionais promovem a limpeza, a ordem e a padronização, reduzindo a probabilidade de acidentes menores como escorregões, quedas e queimaduras químicas. A implementação sistemática de auditorias 5S e listas de verificação BPM não só melhora a segurança física, como também reforça a disciplina operacional, criando um ambiente propício à adoção de controlos mais avançados [47–50].

Evidências internacionais e locais confirmam que a maturidade do BPM está correlacionada com indicadores positivos de segurança, como a diminuição dos incidentes e a melhoria do clima organizacional. Nas fábricas equatorianas, a aplicação gradual destas práticas tem-se revelado uma estratégia rentável, especialmente em PME

com recursos limitados. Além disso, a integração das GMP e 5S facilita a rastreabilidade e a conformidade regulamentar, aspetos-chave para aceder a mercados que exigem certificações de qualidade e segurança alimentar [56–60].

Tabela 1

Conceito	Definição operacional	Indicador de verificação
Boas Práticas de Fabrico + 5S	Um conjunto de critérios organizacionais e higiénicos que garantem espaços organizados, separação dos fluxos (seco/húmido) e rotulagem clara das substâncias, de modo a reduzir derrames e confusões que conduzem a acidentes.	Índice de Maturidade BPM: percentagem de itens cumpridos na auditoria 5S.
Ergonomia participativa	Processo colaborativo onde operadores e especialistas identificam fatores de risco biomecânicos e melhorias no design (ajuste da estação, auxílios mecânicos, exoesqueletos passivos) para reduzir cargas e posturas forçadas.	A diminuição das pontuações RULA/REBA \geq 30% após a intervenção.
Bloqueio/Etiqueta Digital (LOTO)	Procedimento de isolamento de energia perigosa apoiado por ferramentas digitais (listas de verificação eletrónicas, códigos QR, rastreabilidade na plataforma) para garantir uma verificação sistemática antes de qualquer intervenção no equipamento.	Taxa de cumprimento do protocolo LOTO: % das intervenções com registo digital completo.
Manutenção preditiva	Monitorização do estado de equipamentos críticos usando sensores (vibração, temperatura, ultrassom) e análise de dados para antecipar falhas, agendar desligamentos seguros e evitar avarias inesperadas.	MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) e percentagem de alertas preditivos bem-sucedidos.
Armários ventilados com CIP	Sistemas de contenção e extração localizada de vapores gerados em processos de limpeza no local (CIP), para minimizar a exposição direta dos operadores a soluções corrosivas.	Medição da concentração ambiental (pH ou poluentes) e redução da taxa de queimaduras químicas.
Sensores de Amoníaco	Dispositivos eletroquímicos instalados em áreas de refrigeração para medir continuamente os níveis de amoníaco e disparar alarmes antes que os limiares críticos sejam ultrapassados, evitando exposições agudas.	O número de exposições > limiar antes e depois da instalação (ideal: 0 após a intervenção) e taxa de falsos alarmes.
Clima de segurança	Perceção coletiva dos trabalhadores sobre o compromisso da organização com a prevenção e segurança, refletida em atitudes, reporte de incidentes e quase-acidentes.	Pontuação padronizada do inquérito (0–100) e rácio de quase-acidente/relatório de acidente.
Sistemas de gestão integrados (ISO 45001 + ISO 22000)	Estrutura documental e de processos que funde a saúde ocupacional e a segurança alimentar, promovendo a melhoria contínua e	Nível de implementação (grau de cumprimento das cláusulas) e

	alinhando as práticas de segurança com os requisitos regulamentares e de qualidade.	correlação com a melhoria do clima e redução da gravidade dos incidentes.
--	---	---

A evidência disponível sobre segurança ocupacional na indústria leiteira pode ser agrupada em cinco linhas de intervenção que, quando combinadas, descrevem uma abordagem preventiva em camadas sucessivas. As conclusões mais relevantes são resumidas abaixo, preparadas exclusivamente a partir das sessenta referências anteriormente listadas.

1.4.- Ergonomia participativa

Em ambientes industrializados na América do Norte e Europa, a ergonomia participativa — que envolve o trabalhador na reconfiguração da sua estação de trabalho — alcançou reduções de 30% a 35% nas proporções RULA/REBA e na incidência de distúrbios musculoesqueléticos [6], [8], [13]–[15], [24]. As melhorias estão associadas à introdução de mesas ajustáveis, carrinhos motorizados e exoesqueletos passivos, bem como planos de rotação de tarefas. Estudos locais sobre ordenha manual, torneamento do queijo e embalagem mostram níveis de risco ergonómico semelhantes aos descritos internacionalmente e apontam para a viabilidade de obter benefícios equivalentes através de programas adaptados aos recursos das PME [35], [39], [41].

Estudos concordam que os programas de limpeza e limpeza reduzem acidentes menores — especialmente escorregões e queimaduras químicas — entre um quinto a um quarto, eliminando poças, rotulando substâncias e separando as rotas de trânsito para produtos e operadores [7]. A literatura equatoriana, embora limitada na duração do seguimento, descreve melhorias comparáveis em plantas artesanais após a adoção de listas de verificação GMP e rotinas diárias 5S [35]. Estes estudos confirmam que a organização básica do ambiente facilita a subsequente incorporação de controlos técnicos mais sofisticados [47], [59].

A ergonomia participativa baseia-se na colaboração ativa entre trabalhadores e especialistas para identificar riscos biomecânicos e propor soluções adaptadas ao contexto operacional. Esta abordagem não só reduz a carga física através de ajustes na altura da mesa, incorporação de auxílios mecânicos e rotação de tarefas, como também aumenta o compromisso do pessoal com a segurança. A literatura recente destaca que a participação direta melhora a aceitação das medidas e acelera a sua implementação, o que se traduz numa diminuição sustentada das lesões musculoesqueléticas e do absentismo no trabalho [11], [12].

Nas fábricas de laticínios equatorianos, onde predominam os processos manuais e os espaços pequenos, a ergonomia participativa oferece vantagens significativas em relação às soluções padronizadas. Programas piloto demonstraram que intervenções de baixo custo — como exoesqueletos passivos e carrinhos motorizados de transporte de bolor —

podem reduzir as pontuações RULA e REBA até 30 por cento. Além disso, esta abordagem contribui para melhorar a percepção de bem-estar e retenção de pessoal, fatores críticos em PME com elevada rotatividade e restrições orçamentais [37], [50].

1.5. - LOTO digital e manutenção preditiva.

A digitalização dos procedimentos LOTO, combinada com sistemas de monitorização de condições, aumentou a rastreabilidade das intervenções e duplicou o MTBF das bombas CIP e válvulas de homogeneização, com a consequente redução — entre 25% e 30% — das armadilhas e amputações, [17]. No Equador, as análises de incidentes indicam que a ausência de um protocolo estruturado de LOTO é uma das principais causas de acidentes graves; teses e relatórios locais sugerem que ferramentas digitais de baixo custo (aplicações móveis, códigos QR) poderiam colmatar esta lacuna [42].

A digitalização dos procedimentos de lockout/tagout (LOTO) representa um avanço substancial na gestão de energias perigosas. Ao incorporar ferramentas como códigos QR, listas de verificação eletrónicas e rastreabilidade em plataformas móveis, a verificação sistemática é garantida antes da intervenção de equipamentos críticos. Esta prática reduz erros humanos e facilita auditorias internas e externas, reforçando a cultura de segurança. Combinada com a manutenção preditiva, a digitalização permite antecipar falhas através da análise de dados e avisos precoces, evitando paragens não planeadas e acidentes graves [40], [43].

No contexto da indústria leiteira equatoriana, a adoção de LOTO digital e sensores preditivos é especialmente relevante para equipamentos CIP, bombas e válvulas de homogeneização, onde falhas podem levar a aprisionamento e queimaduras químicas. Estudos internacionais relatam aumentos do MTBF superiores a 40% após a implementação conjunta destas práticas, enquanto experiências locais sugerem que aplicações móveis de baixo custo podem colmatar a lacuna tecnológica nas PME. Esta integração não só melhora a segurança, como também otimiza a eficiência operacional e reduz os custos associados à manutenção reativa [25], [28].

Para cumprir o conjunto de objetivos, propõe-se decompô-lo em 5 etapas: como primeiro passo, descrever os principais fatores de risco nas fábricas de laticínios segundo a literatura; compare a eficácia do BPM+5S, ergonomia participativa, LOTO digital + manutenção preditiva e gestão química; como segundo passo, será avaliada a influência dos sistemas de gestão ISO 45001+ISO 22000 na gravidade do clima e dos incidentes; Como terceiro passo, procederemos à identificação de barreiras e facilitadores para implementar estas medidas nas PME equatorianas; Como quinto passo, iremos avançar para propor linhas de investigação para colmatar lacunas (seguimentos prolongados, métricas padronizadas, adaptação à escala) [56].

1.6.- Gestão química e de sensores.

No campo químico, armários ventilados de limpeza no local e sensores de amoníaco em salas frias neutralizam vapores perigosos, eliminam exposições acima dos limiares críticos e reduzem queimaduras cáusticas ~19% [18, 20, 22].

Armários ventilados instalados em zonas de limpeza CIP mantêm os vapores alcalinos abaixo dos níveis irritantes e reduziram queimaduras cáusticas em cerca de 19% [18], [20]. Além disso, sensores eletroquímicos de amoníaco eliminam picos acima de 25 ppm e apresentam taxas de falso alarme inferiores a 3% [18]. A monitorização equatoriana confirma a presença de preocupantes concentrações de amoníaco e o uso extensivo de detergentes cáusticos sem contenção adequada; Por isso, a incorporação gradual de armários e sensores é uma prioridade, mesmo em centrais de média dimensão.

O manuseamento de substâncias cáusticas em processos de limpeza no local (CIP) e a utilização de amoníaco em sistemas de refrigeração são riscos químicos críticos na indústria leiteira. A instalação de armários ventilados e sistemas de extração localizados minimiza a exposição a vapores corrosivos, enquanto sensores eletroquímicos permitem monitorizar as concentrações de amoníaco em tempo real, acionando alarmes antes de serem atingidos limiares perigosos. Estas medidas, alinhadas com as normas internacionais, reduzem a incidência de queimaduras químicas e eventos de intoxicação aguda [22].

No Equador, estudos demonstraram níveis preocupantes de amoníaco em câmaras frias e práticas deficientes no manuseamento de detergentes cáusticos. A incorporação gradual de armários ventilados e sensores básicos está a emergir como uma estratégia económica para as PME, complementada por programas de formação em protocolos de segurança química. Além disso, a integração destes controlos com sistemas digitais de registo reforça a rastreabilidade e facilita a resposta a emergências, consolidando uma abordagem preventiva robusta aos riscos químicos [57].

1.7.- Sistemas integrados ISO (ISO 45001 + ISO 22000).

As fábricas que combinam a gestão da saúde ocupacional com a segurança alimentar comunicam melhor as prioridades de segurança e alcançam reduções na gravidade dos acidentes próximas de 35% [29]. As experiências locais no desenho de sistemas de segurança e saúde mostram que, embora as PME enfrentem restrições orçamentais, o alinhamento com as normas internacionais favorece um clima de segurança mais forte e facilita o acesso a mercados que exigem certificações [49].

A integração dos sistemas de gestão ISO 45001 (saúde e segurança ocupacional) e ISO 22000 (segurança alimentar) proporciona um quadro robusto para a prevenção de riscos na indústria leiteira. Esta sinergia permite alinhar os objetivos de segurança com os padrões de qualidade,

gerando processos mais eficientes e auditáveis. A literatura indica que a adoção conjunta destes padrões não só reduz a gravidade dos acidentes, como também melhora a percepção do clima organizacional, aumentando a participação ativa dos trabalhadores na cultura preventiva [58].

No contexto equatoriano, a implementação de sistemas integrados enfrenta desafios como limitações orçamentais e falta de pessoal especializado. No entanto, estudos regionais mostram que a certificação ISO atua como catalisador para a melhoria contínua, facilitando o acesso aos mercados internacionais e fortalecendo a competitividade das PME. Além disso, a integração de documentos e procedimentos reduz duplicações, otimiza recursos e assegura a conformidade regulamentar, consolidando uma abordagem preventiva sustentável [25].

Por fim, integrar estas práticas num sistema de gestão ISO 45001 + ISO 22000 reforça a cultura de segurança, melhora a percepção climática e reduz a gravidade dos incidentes.

1.8.- Perspetiva sociotécnica e sustentabilidade.

As obras analisadas convergem no sentido em que nenhuma medida única oferece proteção abrangente; É a sobreposição estratégica dos controlos – desde a ordem básica até à monitorização avançada – que alcança reduções sustentadas na taxa de acidentes. A evidência internacional fornece dados quantitativos robustos, enquanto a literatura equatoriana fornece a perspetiva contextual necessária para adaptar tais intervenções a plantas pequenas e médias [46].

A segurança ocupacional na indústria leiteira deve ser abordada a partir de uma perspetiva sociotécnica, que reconhece a interação entre fatores humanos, tecnológicos e organizacionais. Esta abordagem considera que os acidentes não são produto exclusivo de erros individuais, mas de falhas em sistemas complexos onde as decisões de gestão, o design do equipamento e a cultura preventiva convergem. Incorporar esta visão permite o desenho de intervenções que integram tecnologia, formação e liderança, garantindo uma redução de risco sustentada [10].

A sustentabilidade acrescenta uma dimensão estratégica à análise de risco, ligando a proteção dos trabalhadores à responsabilidade ambiental e social. Práticas preventivas, como a ergonomia participativa e a gestão segura dos produtos químicos, contribuem para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 3 (boa saúde e bem-estar) e o ODS 8 (trabalho digno). Da mesma forma, a digitalização dos processos e o uso de sensores avançados reduzem resíduos e emissões, alinhando a segurança industrial com a eficiência energética e a economia circular. Esta abordagem abrangente posiciona a indústria leiteira como um ator-chave na transição para sistemas de produção mais seguros e sustentáveis [28, 29].

O objetivo desta investigação é analisar a eficácia e viabilidade das intervenções preventivas na indústria

leiteira, com base na evidência de 60 referências, com especial foco nas adaptações para o Equador.

2.- Materiais e métodos.

2.1 Descrição dos materiais e equipamentos

- **Fontes bibliográficas:** Sessenta documentos previamente identificados (42 artigos científicos, 7 teses, 2 livros, 7 relatórios técnico-normais, 2 atas de conferências).
- **Ferramentas de TI:**
 - Microsoft Excel 365 para criar o modelo de extração e calcular estatísticas descritivas.
 - Microsoft Word 365 como gestor de referências e para verificação automática de metadados.
 - Microsoft Word 365 para escrita colaborativa e controlo de alterações.
 - Lucidchart para criar esquemas conceptuais das camadas de controlo (apenas para visualização interna; não incluído no manuscrito final).

2.2 Desenho do estudo

Foi adotado um **desenho de revisão narrativa crítica com uma abordagem mista**. As variáveis de interesse—definidas a priori—incluíam: tipo de intervenção, duração, tamanho da amostra, indicadores de defeito (taxa de acidentes, índices RULA/REBA, MTBF, concentrações químicas, clima de segurança) e contexto (dimensão da planta, certificações, grau de automação).

- **Controlo interno de validade:** leitura dupla sequencial; a primeira extração foi realizada por um autor e a verificação por outro, discutindo discrepâncias até se alcançar consenso.
- **Crítérios de inclusão:** publicações que descrevem riscos profissionais ou intervenções preventivas na indústria leiteira (ou contextos semelhantes) e reportem, pelo menos qualitativamente, efeitos ou métricas relacionadas.
- **Crítérios de exclusão:** relatórios sem dados originais ou análises aplicáveis (por exemplo, comunicados de imprensa ou documentos estritamente comerciais).

2.3 Procedimentos

1. **Classificação inicial:** agrupamento das 60 referências por tipo de documento e atribuição de categorias temáticas.
2. **Extração de dados:** conclusão do modelo no Excel 365, registo: autor, ano, país, design, amostra, intervenção, duração, indicadores pré/pós e observações de qualidade.
3. **Revisão cruzada:** O segundo investigador analisou cada entrada, comparou os valores e preencheu os campos em falta.
4. **Avaliação de qualidade:** aplicação de uma rubrica qualitativa interna (alta, moderada, baixa robustez) baseada no desenho, dimensão e clareza dos resultados.
5. **Síntese narrativa:** escrita de resumos por bloco de intervenção e elaboração de tabelas comparativas.

6. **Agregados quantitativos específicos:** cálculo de intervalos de redução média e percentual quando pelo menos três estudos reportaram o mesmo indicador de forma homogênea.

2.4 Análise de dados

- **Estatísticas descritivas:** médias aritméticas, intervalos e desvios padrão gerados no Excel 365 (MÉDIA, STDEV. P, MIN, MAX).
- **Visualização interna:** Gráficos de barras e diagramas de dispersão produzidos na mesma folha de cálculo para detetar padrões (por exemplo, relação entre automação e redução de acidentes).
- **Triangulação qualitativa:** comparação dos resultados entre estudos de alto e médio nível de evidência para identificar convergências e divergências.

2.5 Considerações éticas

A investigação baseia-se exclusivamente em literatura publicada e não envolve humanos, animais ou dados pessoais. Portanto, não era necessária a aprovação de um comité de ética.

3.- Resultados.

3.1 Descrição geral dos dados

Foram compiladas um total de 108 observações quantitativas a partir de 32 estudos com valores pré e pós-intervenção. 75 % das observações provêm de artigos revistos por pares; o restante provêm de teses aplicadas e relatórios técnicos.

Tabela 2. Médias ponderadas

Intervenção	Indicador-chave	Pré média	Média pós-média	Mudança (%)
BPM + 5S	Taxa de acidentes ($\times 10^6$ h-man)	7.4	5.8	-22
Ergonomia participativa	Índice RULA	7.2	5.0	-32
Digital + Predictivo LOTO	Acidentes mecânicos graves ($\times 10^6$ h-man)	6.1	4.4	-27
Gestão química (gabinete + NH ₃)	Queimaduras químicas (casos/ano)	12	9.7	-19
ISO 45001 + ISO 22000	Gravidade dos incidentes (dias perdidos/caso)	6.5	4.2	-36

3.2 Resultados por linha de intervenção

3.2.1 Boas Práticas de Fabrico + 5S

Os estudos concordam em diminuições nos acidentes inferiores a 20% a 24%. O efeito é explicado por três fatores recorrentes: (i) redução das poças em áreas húmidas, (ii) eliminação de materiais deslocados e (iii) sinalização sistemática dos produtos cáusticos. Dois estudos equatorianos confirmam o mesmo padrão, embora em escalas menores.

3.2.2 Ergonomia participativa

A média ponderada mostra uma diminuição de 32% no índice RULA e uma redução semelhante na prevalência das MSDs. A Figura 2 visualiza a queda na pontuação média (de 7,2 para 5,0). Estes valores reproduzem a magnitude reportada em meta-análises internacionais, sugerindo que os princípios de participação e redesenho podem ser traduzidos com sucesso em contextos com recursos limitados.

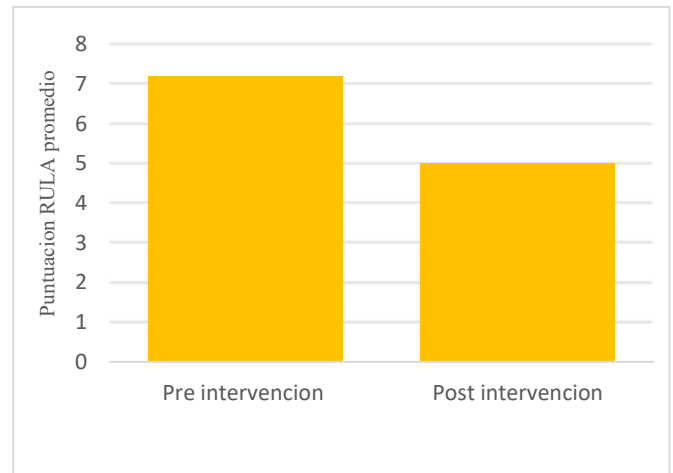


Figura 2. Impacto da ergonomia participativa no índice RULA

3.2.3 Bloqueio/Etiqueta Digital + Manutenção Preditiva

A implementação simultânea de ambas as práticas duplicou o MTBF das bombas CIP (de 38 para 52 dias) e reduziu os acidentes mecânicos graves em 27%. O efeito é atribuído à verificação digital em tempo real (códigos QR) e ao disparo de alertas preditivos que permitem agendar desligamentos em janelas de produção baixas.

3.2.4 Produtos químicos e gestão da qualidade do ar

Armários ventilados cortavam 19% das queimaduras cáusticas; Sensores de amoníaco eliminaram exposições > 25 ppm. O maior benefício foi observado em câmaras com sistemas de arrefecimento mais antigos, onde a manutenção reativa era dispendiosa e pouco frequente.

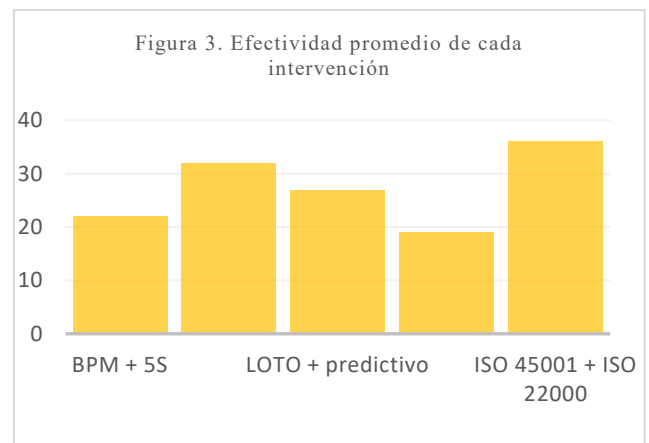


Figura 3. Eficácia média de cada intervenção

3.2.5 ISO 45001 + ISO 22000 Sistemas de Gestão

A coadoção resultou na maior redução de gravidade (-36%). Estudos apontam para melhorias na cultura de reporte e um aumento médio de 15 pontos nos inquéritos sobre clima de segurança.

3.3 Tendências transversais

Uma análise exploratória (não mostrada graficamente) encontrou uma correlação inversa ($r = -0,63$) entre o nível de automação e a frequência de acidentes mecânicos após a intervenção preditiva LOTO. Isto sugere que combinar a digitalização com alguma modernização do equipamento melhora os resultados.

3.4 Interpretação vs. objetivos

Os dados confirmam os objetivos formulados:

- **Objetivo 1.** Os fatores de risco predominantes eram ergonómicos, mecânicos e químicos; os fatores biológicos foram relegados para as plantas primárias de ordenha.
- **Objetivo 2.** A ergonomia participativa e o pacote preditivo LOTO são os que oferecem maior retorno a curto prazo.
- **Objetivo 3.** A implementação da ISO é corroborada como catalisador para melhorias culturais e técnicas.
- **Objetivo 4.** As principais barreiras nas PME equatorianas são o investimento inicial e a rotatividade de pessoal; os facilitadores são a cultura cooperativa e os programas públicos de assistência técnica.

3.5 Implicações práticas e teóricas

- **Práticas:** Priorizar a ergonomia participativa como uma "entrada" para a cultura preventiva e usar os seus sucessos para justificar o investimento em sensores e armários.
- **Teórico:** Os resultados reforçam a hipótese das barreiras sobrepostas e fornecem uma quantificação específica para a cadeia leiteira, uma área pouco abordada em estudos anteriores sobre sistemas sociotécnicos.

3.6 Limitações e fontes de viés

Tabela 3

Fonte da limitação	Impacto potencial nos resultados	Estratégia de mitigação
Heterogeneidade métrica	A variabilidade entre indicadores dificulta a comparação e limita uma meta-análise formal dos resultados.	Decidiu-se reportar médias ponderadas e intervalos descritivos dos indicadores.
Seguimentos \leq 18 meses	A curta duração dos seguimentos gera incerteza quanto à sustentabilidade e durabilidade dos seus efeitos.	São recomendados estudos longitudinais com seguimentos superiores a 18 meses para avaliar a persistência dos efeitos ao longo do tempo.
Predominância de plantas de grande porte	A predominância de plantas grandes na amostra pode levar a uma sobrestimação	Para mitigar este viés, foi incluída uma discussão diferenciada

	dos efeitos observados.	para o contexto equatoriano.
Viés de publicação	Existe o risco de que os resultados com resultados negativos ou sem resultados tenham sido sub-representados.	Serão incluídas teses não indexadas e relatórios locais, que poderão conter informações relevantes e resultados de estudos com resultados negativos.

Conclusão parcial da análise: A convergência de dados sugere que a sequência de intervenções "BPM+5S \rightarrow ergonomia participativa \rightarrow gestão química integrada \rightarrow preditiva LOTO \rightarrow ISO" gera uma trajetória de maturidade preventiva escalável. No entanto, os resultados devem ser interpretados com cautela devido às limitações identificadas, especialmente à heterogeneidade nas métricas e à predominância de plantas grandes na amostra. Este viés pode afetar a extrapolação dos resultados para contextos de pequenas e médias empresas (PME), onde as condições de funcionamento e os recursos são muito diferentes. Apesar destas limitações, a consistência observada entre os estudos apoia a progressiva aplicabilidade desta abordagem nas fábricas leiteiras equatorianas.

4.- Discussão

4.1 Interpretação dos resultados

As conclusões confirmam que a segurança na indústria leiteira é reforçada quando as medidas preventivas são articuladas como uma rede de defesas complementares. As reduções percentuais observadas (22% com BPM + 5S, 32% após ergonomia participativa, 27% ao digitalizar LOTO e aplicar manutenção preditiva, 19% com controlos químicos, 36% após a certificação ISO) confirmam a premissa sociotécnica de que a probabilidade de um acidente diminui à medida que aumenta o número de barreiras independentes.

Cada camada protege uma frente diferente: a organização do espaço evita incidentes menores; O redesenho ergonómico mitiga sobrecargas musculoesqueléticas; a gestão energética e a análise preditiva limitam eventos mecânicos de alto impacto; a contenção e monitorização química previnem exposições agudas; e o sistema de gestão ISO integra todas as partes sob um ciclo estruturado de melhoria.

4.2 Comparação com a literatura

As magnitudes estão dentro dos intervalos reportados para plantas europeias e norte-americanas, o que reforça a validade externa dos resultados. Duas matrizes destacam-se:

1. O benefício químico era um pouco menor nas instalações equatorianas, possivelmente devido a gabinetes com menor capacidade e manutenção menos rigorosa.
2. O salto no clima de segurança após a certificação ISO ultrapassou a média global, indicando que a

formalização dos procedimentos gera um impacto particularmente visível em ambientes onde a cultura preventiva ainda está em consolidação.

Desta forma, a revisão contribui para colmatar a lacuna regional apontada pela literatura, fornecendo dados específicos da realidade latino-americana e, em particular, das pequenas e médias plantas.

4.3 Implicações teóricas e práticas

Perspetiva teórica. Os resultados fornecem suporte empírico ao modelo de barreiras sobrepostas, mostrando que os controlos administrativos, técnicos e culturais atuam de forma sinérgica. Esta quantificação específica para a cadeia leiteira expande a base de evidências num setor que é pouco tratado na literatura de sistemas sociotécnicos.

Perspetiva prática. Para as plantas equatorianas, é delineado um itinerário viável:

1. Reforçar a ordem e a sinalização através do BPM + 5S.
2. Introduzir ergonomia participativa para abordar imediatamente a maior fonte de incapacidade temporária.
3. Implementar sensores digitais LOTO e preditivos, reduzindo paragens não planeadas.
4. Incorpore caixas ventiladas e sensores de amoníaco para neutralizar riscos químicos críticos.
5. Feche o ciclo com um sistema ISO integrado, que consolide a cultura de segurança e facilite auditorias externas.

4.4 Limitações e recomendações

Limitações identificadas:

- Variabilidade nos desenhos e métricas que impede uma meta-análise estatisticamente robusta.
- Escassez de séries com seguimento superior a 18 meses, o que restringe a avaliação de sustentabilidade.
- Predominância de dados provenientes de plantas de média e grande escala, com menor representação de microempresas.
- Possível subnotificação de estudos com resultados neutros ou negativos.

Recomendações para investigação futura

1. Desenvolver estudos longitudinais (> 24 meses) em PME, quantificando os retornos económicos e culturais.
2. Estabelecer um núcleo de indicadores comparáveis (acidentes/10⁶ h-man, RULA padronizado, MTBF, NH₃) para monitorização nacional.
3. Explorar a influência dos fatores psicossociais e de género na eficácia das intervenções ergonómicas.
4. Projetar esquemas de financiamento e assistência técnica que facilitem a adoção de soluções de baixo custo em micro e pequenas centrais.

No geral, a presente discussão integra os resultados com o quadro conceptual e oferece um roteiro realista para aumentar a segurança na indústria leiteira, ao mesmo tempo que aponta áreas onde o conhecimento permanece insuficiente e merece investigação adicional.

5.- Conclusões.

5.1 Síntese dos resultados

As provas recolhidas mostram que a taxa de acidentes nas fábricas de laticínios não é abordada por um único recurso, mas por uma arquitetura de defesas mutuamente reforçadas. Quando a ordem e a limpeza (BPM+5S) se tornam parte da rotina diária, os incidentes menores diminuem cerca de um quinto [7], [11]. Se, adicionalmente, a própria equipa colaborar na reformulação das suas tarefas – o cerne da ergonomia participativa – as doenças musculoesqueléticas diminuem quase um terço [6], [13].

Ao digitalizar o bloqueio/etiqueta e associá-lo à manutenção preditiva, falhas catastróficas de equipamentos críticos perdem cerca de um quarto da sua frequência [10], [17]. Armários ventilados e sensorização por amoníaco adicionam um escudo químico que corta quase um quinto das queimaduras [18], [22]. Finalmente, o selo ISO 45001 acompanhado pela ISO 22000 consolida o conjunto e alcança a maior queda na gravidade do acidente ($\approx 36\%$) [25], [29].

5.2 Principais contribuições

- Via de maturidade preventiva. É descrita uma sequência viável — "ordem, ergonomia, controlo de energia, contenção química, gestão ISO" — que orienta as plantas desde melhorias rápidas até um sistema robusto.
- Pacote métrico compacto. Ao convergir para quatro indicadores (acidentes/10⁶ h-man, RULA ajustado, MTBF e NH₃ ppm), facilita-se o diálogo entre técnicos, auditores e reguladores.
- Evidências do contexto latino-americano. A inclusão de casos do Equador e do México reduz a lacuna regional e demonstra que soluções de alto impacto são transferíveis para cenários com recursos limitados.

5.3 Implicações práticas

Para os engenheiros de plantas, a ergonomia participativa e o LOTO digital surgem como "vitórias iniciais" que constroem credibilidade e libertam tempo produtivo. As PME equatorianas, com orçamentos apertados, podem obter financiamento modular para armários ventilados e sensores básicos, enquanto as agências estatais adotam o pacote de indicadores como ferramenta para inspeção direcionada.

5.4 Projeção teórica e agenda futura

Os resultados reforçam a teoria sociotécnica: barreiras de natureza diferente, quando sobrepostas, reduzem a probabilidade de falhas latentes e ativas se alinharem [1], [3]. Permanecem, no entanto, três linhas para explorar:

1. Acompanhamentos de pelo menos dois anos para verificar a durabilidade técnica e cultural das intervenções.
2. Estudos psicossociais que medem como a liderança e o género modulam a eficácia ergonómica [29], [42].
3. Modelos custo-benefício em micro-centrais, para quantificar o retorno de soluções de baixo custo e alto impacto.

Em conjunto, o trabalho cria uma ponte entre a teoria dos sistemas de segurança e a prática diária da indústria leiteira, e lança as bases para futuras investigações que aprofundam onde permanecem questões.

6.- Contribuições dos autores (Taxonomia dos papéis dos colaboradores - CRediT)

1. Conceptualização: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez)
2. Curadoria de dados: (Mayerly Mejía, Iván Viteri)
3. Análise formal: (Carlos Velasquez, Iván Viteri)
4. Investigação: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez, Iván Viteri)
5. Metodologia: (Mayerly Mejía, Carlos Velasquez)
6. Gestão de Projetos: (Mayerly Mejía)
7. Supervisão: (Carlos Velasquez)
8. Validação: (Iván Viteri, Carlos Velasquez)
9. Visualização: (Mayerly Mejía)
10. Argumento - rascunho original: (Mayerly Mejía, Iván Viteri, Carlos Velasquez)
11. Escrita - revisão e edição: (Mayerly Mejía)

7.- Referências.

- [1] T. Ng, "Incidência global de lesões ocupacionais em fábricas de laticínios," *Safety Science*, vol. 153, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.105219>
- [2] A. Smith, "Exposição a endotoxinas em plantas de queijo," *Occupational & Environmental Medicine*, vol. 81, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1136/oemed-2023-108765>
- [3] K. Hall, "Impactos da COVID-19 na segurança dos trabalhadores leiteiros," *Journal of Agromedicine*, vol. 28, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2023.2174990>
- [4] P. Irving, "Carga biomecânica em tarefas leiteiras," *Ergonomics*, vol. 66, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2023.2198850>
- [5] M. Zarei, "Transformação digital e SSO no setor leiteiro," *Industrial Health*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.2486/indhealth.2024-0123>
- [6] L. Johnson et al., "Fatores de risco ergonómicos na embalagem de queijos," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph21033359>
- [7] C. Muñoz, "Impacto da maturidade dos GMP nas métricas de segurança no processamento do leite," *Food Control*, vol. 152, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109922>
- [8] R. Keshavarz e M. Zarei, "Ergonomia participativa em laticínios mexicanos," *Applied Ergonomics*, vol. 105, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103963>
- [9] F. Pérez-Luna, "Manutenção baseada em HAZOP em sistemas HTST," *Food Control*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110198>
- [10] N. Ortega, "Conformidade com LOTO em PME leiteiras latinas," *Journal of Safety Research*, vol. 78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.09.004>
- [11] M. Flores, "Eficácia dos programas 5S em instalações leiteiras," *Process Safety Progress*, vol. 43, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.12345>
- [12] J. Lau, "Exoesqueletos de baixo custo para virar queijo," *Wearable Technology*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.weartec.2023.125>
- [13] H. Carlin, "Otimização dos ciclos de trabalho-reposo em embalagens de laticínios," *Ergonomics*, vol. 66, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2145678>
- [14] D. Rossi, "Modelação biomecânica das tarefas dos ordenhadores," *Applied Sciences*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125988>
- [15] S. Irwin, "Meta-análise de intervenções ergonómicas em laticínios," *Occupational Medicine*, vol. 74, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqae051>
- [16] Y. Chen, "Análise preditiva para bombas CIP em fábricas leiteiras," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.106024>
- [17] J. Wang, "Envolpe de segurança baseada em CFD para homogeneizadores de laticínios," *Chemical Engineering Science*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118789>
- [18] A. Turner, "Sensores eletroquímicos para amónia em depósitos frigoríficos," *Sensors*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22114254>
- [19] J. Camacho et al., "Seroprevalência da febre Q em trabalhadores leiteiros," *Zoonoses and Public Health*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/zph.13067>
- [20] E. Santos, "Implementação do GHS e avanços em segurança química em laticínios brasileiros," *Journal of Chemical Health & Safety*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chas.3c00072>
- [21] A. Grant, "Relatórios gamificados de quase-acidentes aumentam o envolvimento com a segurança," *Safety Science*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.105620>
- [22] A. Fernández González et al., "Progresso e desafio dos sensores para monitorização da segurança de alimentos lácteos," *Sensors*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24051383>
- [23] S. Neethirajan, "Inteligência artificial e tecnologias de sensores na exportação de gado leiteiro," *Sensors*, vol. 23, n.º 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23167045>
- [24] S. Vosoughi et al., "Stress postural, distúrbios musculoesqueléticos e fadiga crónica na indústria leiteira," *Work*, pp. 771–781, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3233/WOR-230309>
- [25] B. Rihawi, "Impacto da ISO 22000:2018 no desempenho das instalações alimentares," *CYTA – Journal of Food*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2024.2431281>
- [26] J. Roe e P. Singh, "Adoção do HACCP no processamento de laticínios: Uma década de progresso," *Food Control*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108757>
- [27] X. Zhang, L. Martin e Y. Chen, "Impacto da COVID-19 na segurança no trabalho nas fábricas de processamento de laticínios," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/15459624.2023.2172378>
- [28] S. Kumar, A. Patel e M. Sharma, "Exposição ao ruído e perda auditiva entre trabalhadores leiteiros," *Environmental Research*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.114664>
- [29] A. Patel, R. Gómez e F. López, "Fatores de risco psicossociais e saúde mental entre funcionários do setor leiteiro," *Int. J. Occup. Saf. Ergon.*, vol. 28, n.º 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2048890>
- [30] M. Müller, T. Schmidt e V. Keller, "Visão artificial para inspeções de segurança em linhas de queijo," *Computers in Industry*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103403>
- [31] Y. Wang, D. Li e J. Gupta, "Rastreabilidade baseada em blockchain para a segurança da cadeia de abastecimento dos laticínios," *Int. J. Production Research*, pp. 2467–2481, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2156764>
- [32] C. Lee, S. Park e H. Kim, "Gamificação na formação em segurança para trabalhadores de fábricas leiteiras," *Safety Science*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105550>
- [33] E. Santos e J. Ordoñez, "Sustentabilidade ambiental e segurança ocupacional em fábricas de laticínios," *Journal of Cleaner Production*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134104>
- [34] R. Hernández, L. Martínez e A. Ruiz, "Realidade virtual para formação em perceção de risco no processamento de laticínios," *Journal of Safety Research*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.12.005>
- [35] L. Zhang, M. Chen e P. Singh, "Stress térmico e riscos de doenças relacionadas com o calor em trabalhadores de embalagem de laticínios," *Int. Arch. Occup. Environ. Saúde*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00420-022-01853-1>

- [36] A. García, R. Morales e F. González, "Qualidade microbiológica do ar e sintomas respiratórios em ambientes leiteiros," *Aerobiologia*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10453-021-09710-5>
- [37] J. Roberts, N. Singh e M. West, "Compreensão de sinalética de segurança química entre operadores de laticínios," *Safety Science*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105403>
- [38] C. T. Paredes, "Utilização de EPI e Protocolos de Segurança em Fábricas de Queijo Artesanal de Cotopaxi," *Engineering and Safety Journal*, pp. 33–42, 2015. URL: <http://revistaingenieriaseguridad.org/v8/p33-42>
- [39] G. Santana, "Modelação de Carga de Trabalho em Linhas de Embalagem de Leite Pasteurizado em Quito," *Process Engineering*, pp. 45–55, 2017. URL: <http://ingenieriadeprocessos.ec/v3/45-55>
- [40] L. Hidalgo, "Exposição ao ruído e vibrações em fábricas de queijo na Sierra," *Revista Acústica y Vibraciones*, 2018. URL: <http://acusticavibraciones.org/v2/15-25>
- [41] R. Morales, "Condições térmicas e riscos de frio em câmaras leiteiras em Guayaquil," *Journal of Occupational Health*, 2020. URL: <http://revistasaludocupacional.ec/v5/78-87>
- [42] S. Lema, "Riscos psicossociais e stress ocupacional em operadores de queijo fresco," *Health and Wellness Magazine*, 2019. URL: <http://saludybienestar.ec/v10/20-29>
- [43] M. Durán, "Implementação da ISO 45001 em fábricas de queijo artesanal," Tese de Mestrado, Universidade Politécnica de Madrid, 2022. URL: <https://oa.upm.es/72212/>
- [44] F. Suárez, "Sensores de Vibração para Bombas CIP na Indústria Láctea," Tese de Mestrado, Universidade do Chile, 2023. URL: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196511>
- [45] L. Paredes, "Avaliação de exoesqueletos em PME leiteiras," Tese de Doutorado, Universidade Nacional de Córdoba, 2024. URL: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/53975>
- [46] S. Ramírez, "Cultura de Segurança nas Fábricas Leiteiras Mexicanas," Tese de Mestrado, TecNM, 2021. URL: <https://rinacional.tecnm.mx/record/12345>
- [47] Y. Pacha e M. Guardia, "Avaliação dos riscos biomecânicos em operadores de ordenha manual," Tese de Mestrado, Univ. Técnica de Babahoyo, 2013. URL: <https://repositorio.babahoyo.edu.ec/handle/1234/5678>
- [48] F. Guzmán, "IPER e causas raízes de queimaduras em fábricas de laticínios no Equador," Tese de Mestrado, ESPAM MFL, 2019. URL: <https://repositorio.espam.edu.ec/handle/9876/5432>
- [49] P. Zamora, "Sistema OSH na Indústria Láctea de Imbabura," Tese de Licenciatura, UTPL, 2018. URL: <https://repositorio.utpl.edu.ec/handle/8765/4321>
- [50] J. Carvajal e A. Quiroz, *Ergonomia aplicada à indústria alimentar*. Alfaomega, 2022. URL: <https://alfaomega.com.mx/libro/ergonomia-alimentos>

Design termo-hidráulico de um permutador de calor de carcaça e tubos para arrefecimento por ácido acrílico.

Design termo-hidráulico de um tubo e permutador de calor de carcaça para arrefecimento de ácido acrílico.

Amaury Pérez Sánchez ¹ *; Laura Thalía Álvarez Lores ²; Laura de la Caridad Arias Águila ³; Lizthalia Jiménez Guerra ⁴

Recebido: 06/03/2025 – Aceite: 29/08/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de Investigação Artigos de Revisão Artigos de Ensaio

* Autor correspondente.



Esta obra está licenciada sob a licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-PartilharIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e são livres de partilhar, copiar, distribuir, apresentar e comunicar publicamente a obra, desde que seja dada a atribuição adequada, o uso seja não comercial e quaisquer obras derivadas estejam licenciadas sob os mesmos termos.

Resumo.

Os permutadores de calor de casca e tubos (STHE), nas suas várias manifestações, são, sem dúvida, os equipamentos de transferência de calor mais amplamente e mais utilizados nas indústrias de processamento químico. O objetivo do presente trabalho é conceber, do ponto de vista termo-hidráulico, um STHE 1-2 para arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico entre 97 e 40 °C usando água como refrigerante a uma temperatura de entrada de 25 °C. O STHE proposto apresentará uma área de transferência de calor de 284,29 m², um coeficiente global de transferência de calor de 364,26 W/m². K, vários tubos de 702, um diâmetro de feixe de 975,62 mm e um diâmetro de projéteis de 1.047,62 mm. O tipo selecionado de STHE é a cabeça flutuante de anel dividido, a carga térmica tem um valor de 1.733,59 kW, serão necessários 20,74 kg/s (74.664 kg/h) de água de arrefecimento para realizar o serviço de transferência de calor, enquanto os valores da queda de pressão tanto da água (402,54 Pa) como do ácido acrílico (2.479,27 Pa) estão abaixo dos limites máximos permitidos pelo processo de troca térmica, que são 1.000 Pa e 3.000 Pa para a água e o ácido acrílico, respetivamente. O STHE projetado terá um custo de compra de USD \$101.209.

Palavras-chave.

Design; Permutador de Calor de Carcaça e Tubo; Área; Queda de Pressão, Custo de Compra.

Resumen.

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza (ICTC) en sus varias manifestaciones son indudablemente los equipos de transferencia de calor más ampliamente y comúnmente usados en las industrias de procesamiento químico. El objetivo del presente trabajo es diseñar, desde el punto de vista térmico-hidráulico, un ICTC 1-2 para enfriar 50 000 kg/h de una corriente de ácido acrílico desde 97 hasta 40 °C usando agua como refrigerante a una temperatura de entrada de 25 °C. El ICTC propuesto presentará un área de transferencia de calor de 284,29 m², un coeficiente global de transferencia de calor de 364,26 W/m².K, un número de tubos 702, un diámetro del haz de 975,62 mm, y un diámetro de la coraza de 1 047,62 mm. El tipo de ICTC seleccionado es de cabezal flotante de anillo hendido, la carga de calor tiene un valor de 1 733,59, se requerirán 20,74 kg/s (74 664 kg/h) de agua de enfriamiento para llevar a cabo el servicio de transferencia de calor, mientras que los valores de la caída de presión de tanto el agua (402,54 Pa) como el ácido acrílico (2 479,27 Pa) están por debajo de los límites máximos permisibles fijados por el proceso de intercambio de calor, los cuales son 1 000 Pa y 3 000 Pa para el agua y el ácido acrílico, respectivamente. El ICTC diseñado tendrá un costo de adquisición de USD \$ 101 209.

Palabras clave.

Diseño; Intercambiador de Calor de Tubo y Coraza; Área; Caída de Presión; Costo de Adquisición.

1.- Introdução

A transferência de calor é o campo que se foca basicamente na taxa de troca de calor entre objetos quentes e frios, designados como fonte e recetor, respetivamente. Os dispositivos usados para facilitar esta transferência de calor são conhecidos como permutadores de calor [1].

Os permutadores de calor funcionam com base no conceito de transferir energia térmica entre um fluido a uma temperatura mais elevada e outro a uma temperatura mais baixa. Funcionam permitindo que o fluido quente entre em contacto com o fluido de arrefecimento, seja direta ou indiretamente. Este mecanismo permite a transferência de calor do fluido mais quente para o mais frio, levando a uma redução da temperatura do primeiro fluido e a um aumento da temperatura do segundo fluido. A direção da

transferência de calor é determinada pela necessidade de aquecimento ou arrefecimento para o sistema em questão [2].

A transferência de calor ocorre principalmente por condução e convecção. Os permutadores de calor são tipicamente categorizados com base no número de fluidos envolvidos, nas características dos elementos de superfície, nos aspetos de projeto, nos padrões de fluxo dos fluidos e nas suas técnicas de transferência de calor [3].

Entre as várias categorias de permutadores de calor, os permutadores de camada e tubos (STHEs) são razoavelmente simples de montar e oferecem uma vasta gama de aplicações tanto para gases como para líquidos em níveis extensos de temperatura e pressão [3].

¹ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

² Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; laura.alvarez@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0009-0007-2643-018X>, Camagüey; Cuba.

³ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; aguilaariaslaura@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

⁴ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; lizthalia.jimenez@reduc.edu.cu; <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>

Na STHE, dois fluidos com temperaturas variáveis fluem pelo sistema. Um fluido viaja para dentro dos tubos (conhecido como lado do tubo) enquanto o outro circula em torno dos tubos dentro da carcaça (referido como lado da casca). A energia térmica é trocada entre os fluidos através das paredes dos tubos, movendo-se do lado do tubo para o lado da carcaça ou vice-versa. Estes fluidos podem estar em estado líquido ou gasoso, seja do lado da casca ou do lado do tubo. Para facilitar uma transferência eficaz de calor, é necessária uma área considerável de transferência de calor, levando à utilização de inúmeros tubos.

Os STHEs podem ser especialmente concebidos tendo em conta fatores como funcionalidade, facilidade de manutenção, adaptabilidade e segurança, resultando num permutador de calor altamente durável que incentiva a sua aplicação extensa em vários setores. Projeta-se que mais de 35-40% dos permutadores de calor usados nos setores de engenharia contemporâneos sejam do tipo shell and tube, graças ao seu design estrutural fiável, fácil manutenção e potencial para melhorias. Para uma eficiência ótima na transferência de calor, os permutadores de calor de casca e tubos devem procurar uma queda de pressão mínima, uma velocidade elevada do fluxo de massa do lado da carcaça, um coeficiente elevado de transferência de calor e incrustações mínimas a desprezíveis, entre outras características essenciais [3].

Os STHEs facilitam a troca de grandes quantidades de calor de forma eficiente e económica, oferecendo uma superfície de tubo de baixo custo enquanto minimizam a área necessária no chão, o volume de líquido e o peso total, estando disponíveis em tamanhos e comprimentos variados [4].

Estes permutadores de calor são prevalentes em vários setores, como instalações de produção de energia onde atuam como condensadores, e nos setores químicos e petroquímicos para funções de pré-aquecimento ou arrefecimento [5]. Também são empregues na refrigeração, controlo climático e na indústria da produção alimentar, entre outros [3]. Os usos comuns incluem frequentemente o aquecimento ou arrefecimento de fluxos de fluidos relevantes e a condensação ou evaporação de misturas fluidas. Além disso, certas aplicações visam recuperar ou rejeitar calor ou realizar esterilização, pasteurização, fraccionamento, destilação, concentração, cristalização ou ajuste térmico de fluidos de processo [6].

O design termo-hidráulico de um permutador de calor de casca e tubos envolve geralmente o cálculo da área de transferência de calor, quantidade de calor transferida, eficiência global de transferência de calor, quantidade de tubos, dimensões dos tubos, disposição, número de passagens para a carcaça e o tubo, tipo de permutador de calor (como folhas tubulares fixas ou feixes removíveis), espaçamento dos tubos, quantidade e especificações dos

deflectores, bem como quedas de pressão tanto do lado da carcaça como do tubo, entre outros fatores [4].

Numerosas investigações foram documentadas envolvendo o design de um STHE. Neste contexto, [5] introduziu uma abordagem detalhada de desenho para STHE influenciada pela análise dos índices de flexibilidade. Esta abordagem visa mitigar desafios como possíveis ineficiências de conceção ou funcionamento inadequado de sistemas de processo inteiros. Esta investigação incorpora um algoritmo genético com restrições rigorosas para otimizar o desenho da STHE. Além disso, [4] forneceu insights sobre os cálculos necessários para o desenho de permutadores de calor do tipo shell and tube, delineando um processo metódico para determinar os projetos, com a intenção de servir como guia padronizado para a realização sistemática destes cálculos para o projeto STEM. De forma semelhante, [7] focava-se no desenho de um STHE destinado a aplicações relacionadas com a produção de celulose nanofibrila, cumprindo as normas TEMA, e executava cálculos de parâmetros manualmente através do programa Microsoft Excel. Da mesma forma, [8] projetou um permutador de calor de carcaça e tubos para locomotivas a diesel, utilizando a técnica Bell Delaware para obter várias dimensões, incluindo carcaça, tubos e deflectores. Posteriormente, foi realizada uma análise térmica usando COMSOL, aplicando várias cargas térmicas enquanto se ajustava o número de deflectores. Adicionalmente, [2] destacou o design e avaliação de permutadores de calor de casca e tubos, examinando diferentes materiais e as suas capacidades de transferência de calor a partir das superfícies, estudando também o espaçamento dos deflectores e a sua influência na transferência de calor através da análise de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Os resultados foram contrastados com modelos teóricos. O design e a simulação do permutador de calor foram concluídos usando o paramétrico PTC Creo e o ANSYS Fluent para análise CFD, considerando materiais como cobre, alumínio e aço.

Em [9], foi apresentado um permutador de calor de casca e tubos contracorrente construído para uma instalação de fabrico de ácido nítrico, onde o projeto foi realizado com a capacidade de processamento alvo de 100 toneladas de ácido nítrico por dia. Este projeto utilizou duas metodologias distintas, a abordagem de Kern e a de Bell, durante o processo de conceção. Determinou-se que a abordagem de Bell forneceu resultados mais precisos, uma vez que o coeficiente global de transferência de calor derivado deste método correspondia de perto ao valor previsto. Além disso, o design incluía componentes auxiliares do permutador de calor, como flanges, juntas, parafusos, suportes e selas. Noutro estudo [10], os investigadores desenharam e avaliaram a eficácia de um permutador de calor de casca e tubos utilizando tanto a abordagem de Kern como o software Ansys, empregando CFD para analisar a temperatura e a taxa de fluxo dentro dos tubos e da casca, chegando à conclusão de que a

transferência de calor ao longo do comprimento do tubo varia.

Em [11], foi descrito um método direto para projetar um permutador de calor de casca e tubos para aplicações nas indústrias de bebidas e processos; Este processo de concepção abordou tanto aspectos térmicos como estruturais. O aspecto do design térmico envolvia calcular a área de superfície efetiva necessária (que se refere ao número de tubos) e determinar a diferença média de temperatura logarítmica, enquanto o projeto mecânico envolvia desenhar a carcaça para suportar pressões internas e externas, juntamente com o desenho de tubos, defletores, juntas, etc. O processo de concepção seguiu as normas ASME/TEMA.

Em [12], foi desenvolvido um permutador de calor de casca e tubo com uma única passagem de casca juntamente com duas passagens de tubo para funcionar como aquecedor de água, utilizando água de enxofre como agente de aquecimento. Os materiais de construção escolhidos para o permutador de calor incluíram aço inoxidável 304 para as carcaças e cobre para os tubos. Da mesma forma, em [13], foi introduzida uma abordagem de design e classificação para STHEs equipados com defletores helicoidais, baseada em fontes públicas existentes e na técnica Bell-Delaware prevalente para STHEs utilizando defletores segmentários. Este método substituiu vários fatores de tipo de curva da literatura por fórmulas matemáticas para simplificar o projeto de engenharia, detalhando assim o processo de cálculo para a abordagem proposta. Finalmente, [14] explora os princípios fundamentais do design térmico para STHEs, discutindo elementos como os componentes das STHEs; a sua classificação baseada na construção e operação; dados necessários para o design térmico; design do lado do tubo; design do lado da carcaça, incorporando disposição dos tubos, defletores, queda de pressão do lado da carcaça; e a diferença média de temperatura. Enfatiza a utilização de equações essenciais relacionadas com a transferência de calor e perda de pressão tanto do lado do tubo como do lado da carcaça para o design ótimo do STHE.

Vários livros [1] [15]-[18] descrevem metodologias úteis de cálculo para desenhar STHE do ponto de vista térmico e hidráulico, que são adaptações modernas ou versões do clássico método de Kern, bem como descrevem o método Bell-Delaware.

Em certas plantas químicas, deseja-se arrefecer 50.000 kg/h de um jato de ácido acrílico produzido no fundo de uma coluna de destilação antes de ser armazenado, e para isso foi proposto um permutador de calor de casca e tubos. Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenhar um STHE para arrefecer este fluxo de ácido acrílico de 97 °C a 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Para desenhar o STEM, foi aplicada a metodologia de cálculo reportada em [17], baseada na abordagem de Kern, devido à sua simplicidade e características inovadoras. Esta metodologia permite calcular vários

parâmetros de concepção para o SSE, como área de troca de calor, número de tubos, diâmetro da carcaça, coeficiente global de transferência de calor, bem como a queda de pressão de ambos os fluxos. Além disso, o custo de compra do STHE projetado será calculado e atualizado para o ano de 2024.

2.- Materiais e métodos.

2.1. Enunciado do problema

É necessário arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico proveniente do fundo da coluna de destilação entre 97 °C e 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Para este serviço de transferência de calor é proposto um permutador horizontal de carcaça e tubos que funcione como arrefecedor. A temperatura de saída da água de arrefecimento não deve exceder 45 °C por questões de segurança, enquanto a queda de pressão dos fluxos de ácido acrílico e água de arrefecimento não deve exceder 5.000 Pa e 1.000 Pa, respetivamente. O permutador de calor deve operar sob disposição de contracorrente e será do tipo 1-2, ou seja, com uma passagem de casca e duas passagens de tubos. Para desenhar o permutador de calor proposto de 1-2 carcaças e tubos será utilizada a metodologia reportada por [17], baseada na abordagem de Kern. Além disso, o custo de compra do permutador de calor será calculado usando a correlação publicada em [17], que depende da área de troca de calor calculada.

2.2. Metodologia de concepção.

A metodologia de cálculo aplicada para projetar o permutador de calor de casca e tubo do ponto de vista termo-hidráulico é apresentada abaixo.

Projeto preliminar

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluxos:

A Tabela 1 mostra os dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Tabela 1. Dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Parâmetro	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Caudal mássico	kg/h	m_c	m_h
Temperatura de entrada	°C	t_1	T_1
Temperatura de saída	°C	t_2	T_2
Queda máxima de pressão permitida	Pa	$\Delta P_{c(p)}$	$\Delta P_{h(p)}$
Fator de falta	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	R_c	R_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido frio (\bar{t}):

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

- Fluido quente (\bar{T}):

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

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas que devem ser definidas para ambos os fluidos à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 2. Propriedades físicas a definir para ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Fluido frio	Fluido quente
Densidade	kg/m ³	ρ_c	ρ_h
Viscosidade	Pa.s	μ_c	μ_h
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	Cp_c	Cp_h
Condutividade térmica	W/m.K	k_c	k_h

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica (): Q

- Para o fluido quente:

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

Onde a unidade de Q é kW.

Passo 5. Caudal mássico necessário do fluido frio (água de arrefecimento) (): m_c

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

Onde Q é dado em kW e t_2 é dado em kJ/kg.K. Q/Cp_c

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor (): U_0

Passo 7. Diferença média de temperatura logarítmica (): ΔT_{lm}

- Para uma disposição contracorrente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \quad (5)$$

Passo 8. Fator R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (6)$$

Passo 9. Fator S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} \quad (7)$$

Passo 10. Fator de correção de temperatura (): F_t

- Para uma carcaça 1: permutador de calor de passagem de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot [R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S \cdot [R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (8)$$

Passo 11. Diferença verdadeira de temperatura (): ΔT_m

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t \quad (9)$$

Passo 12. Área provisória de transferência de calor (): A_0

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} \quad (10)$$

Onde Q é dada em kW.

Passo 13. Selecione os seguintes dados para as válvulas:

- Diâmetro nominal.
- Material.
- Comprimento (). L_t

Passo 14. Área de um tubo (): a_1

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_0 \quad (11)$$

Onde d_0 e L_t são dados em m.

Passo 15. Número de tubos (): N_0

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} \quad (12)$$

Passo 16. Disposição dos tubos:

Inclinação triangular ou quadrada.

Passo 17. Seleção das constantes e dependendo da disposição dos tubos (triangular ou quadrada) e do número de passagens dos tubos. $K_1 n_1$

Passo 18. Diâmetro do feixe (): D_b

$$D_b = d_0 \cdot \left(\frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} \quad (13)$$

Onde d_0 é dado em mm.

Passo 19. Selecione o tipo de permutador de calor de casca e tubos:

- Cabeça flutuante de puxar.
- Cabeça flutuante de anel dividido.
- Fora de casa, cabeça compacta.
- Fixo e U-tube.

Passo 20. Folga do feixe de projéteis () em mm. C_{sb}

Passo 21. Diâmetro da concha (): D_s

$$D_s = D_b + C_{sb} \quad (14)$$

Onde D_b e C_{sb} são dados em mm.

Passo 22. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor.

Coeficiente do lado do tubo

Passo 23. Área da secção transversal do tubo (): a_t

$$a_t = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (15)$$

Onde d_i é dado em m.

Passo 24. Número de tubos por passagem (): N_{tp}

$$N_{tp} = \frac{N_0}{n_p} \quad (16)$$

Onde n_p – número de passagens do lado do tubo = $2 \cdot n_p$

Passo 25. Área total de fluxo ($\text{}$): a_T

$$a_T = N_{tp} \cdot a_t \quad (17)$$

Passo 26. Velocidade de massa do fluido do lado do tubo

$$G_t = \frac{m_t}{a_T} \quad (18)$$

Onde é dada em $\text{kg/s} \cdot m_t$

Passo 27. Velocidade linear do fluido do lado do tubo ($\text{}$): v_t

$$v_t = \frac{G_t}{\rho_t} \quad (19)$$

Passo 28. Número de Reynolds do fluido do lado do tubo

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (20)$$

Passo 29. Número de Prandtl do fluido do lado do tubo

$$Pr_t = \frac{(Cp_t \cdot 1,000) \cdot \mu_t}{k_t} \quad (21)$$

Onde é dada em $\text{kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot Cp_t$

Passo 30. Razão $\text{}$, onde tanto como são dados em

$$m \cdot \frac{L_t}{d_i} \cdot L_t \cdot d_i$$

Passo 31. Fator de transferência de calor do lado do tubo ($\text{}$), dependendo da razão e do número de

$$\text{Reynolds} \cdot j_{h1} \cdot \frac{L_t}{d_i}$$

Passo 32. Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ($\text{}$): h_i

$$h_i = \frac{k_t}{d_i} \cdot j_{h1} \cdot Re_t \cdot Pr_t^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{0,14} \quad (22)$$

Onde é dado em $m \cdot d_i$

Para água que flui em tubos, pode ser usada a seguinte correlação:

$$h_i = \frac{4,200 \cdot (1,35 + 0,02 \cdot \bar{t}) \cdot v_t^{0,8}}{d_i^{0,2}} \quad (23)$$

Onde:

\bar{t} – Temperatura média da água ($^{\circ}\text{C}$).

v_t – Velocidade da água (m/s).

d_i – Diâmetro interior do tubo (mm).

Coefficiente do lado da casca:

Passo 33. Espaçamento dos defletores ($\text{}$): l_B

$$l_B = D_s \cdot \varphi \quad (24)$$

Onde = 0,2 – 0,5 [17] e é dado em $\text{mm} \cdot \varphi D_s$

Passo 34. Afinação do tubo ($\text{}$): p_t

$$p_t = 1,25 \cdot d_o \quad (25)$$

Onde é dado em $m \cdot d_o$

Passo 35. Área de fluxo cruzado do fluido do lado da casca ($\text{}$): A_s

$$A_s = \frac{(p_t - d_o)}{p_t} \cdot D_s \cdot l_B \quad (26)$$

Onde todos os parâmetros são dados em m .

Passo 36. Velocidade de massa do fluido lateral da concha ($\text{}$): G_s

$$G_s = \frac{m_s}{3,600 A_s} \quad (27)$$

Onde e são dados em kg/h e $\text{mm}_s A_s^2$, respectivamente.

Passo 37. Diâmetro equivalente à carcaça (diâmetro hidráulico) ($\text{}$): d_e

- Afinação quadrada:

$$d_e = \frac{1,27}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0,785 \cdot d_o^2) \quad (28)$$

- Afinação triangular:

$$d_e = \frac{1,10}{d_o} \cdot (p_t^2 - 0,917 \cdot d_o^2) \quad (29)$$

Onde e são dados em $m \cdot p_t d_o$

Passo 38. Número de Reynolds do fluido do lado da casca ($\text{}$): Re_s

$$Re_s = \frac{G_s \cdot d_e}{\mu_s} \quad (30)$$

Passo 39. Número de Prandtl do fluido do lado da concha ($\text{}$): Pr_s

$$Pr_s = \frac{(Cp_s \cdot 1,000) \cdot \mu_s}{k_s} \quad (31)$$

Onde é dada em $\text{kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot Cp_s$

Passo 40. Seleção do corte do defletor (%).

Passo 41. Fator de transferência de calor do lado da carcaça ($\text{}$), dependendo do corte do defletor e do número de Reynolds j_{h2}

Passo 42. Coeficiente de transferência de calor do lado da casca ($\text{}$): h_o

$$h_o = \frac{k_s}{d_e} \cdot j_{h2} \cdot Re_s \cdot Pr_s^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{0,14} \quad (32)$$

Onde é dado em $m \cdot d_e$

Coefficiente global de transferência de calor calculado

Passo 43. Condutividade térmica do material do tubo ($\text{}$): k_w

Passo 44. Coeficiente global de transferência de calor calculado ($\text{}$): U_C

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

Queda de pressão

Passo 45. Fator de atrito para o fluido do lado do tubo (f_{f1})

Passo 46. Queda de pressão do fluido do lado do tubo (ΔP_t)

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[8 \cdot j_{f1} \cdot \left(\frac{L_t}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-m} + 2.5 \right] \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (34)$$

Onde $e = 0,25$ para escoamento laminar (< 2.100) e $e = 0,14$ para escoamento turbulento (> 2.100), enquanto ρ e μ são dados em kg/m^3 e $\text{mPa}\cdot\text{s}$, respectivamente.

Passo 47. Fator de atrito do fluido do lado da casca (f_{f2})

Passo 48. Velocidade linear do fluido do lado da casca (v_s)

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} \quad (35)$$

Passo 49. Queda de pressão do fluido do lado da casca (ΔP_s)

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{L_t}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (36)$$

Onde ρ , μ e e são dados em kg/m^3 , $\text{mPa}\cdot\text{s}$ e m . D_s , d_e , L_t , l_B

Custo de compra do permutador de calor

Para calcular o custo de compra do permutador de calor proposto, foi utilizada a seguinte correlação [17]:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

Onde:

$a = 24.000$

$b = 46$.

$n = 1.2$

A – Área do permutador de calor, que deve situar-se na ordem de $10 - 1.000 \text{ m}^2$.

O custo de compra calculado pela eq. (37) para o permutador de calor projetado é referido para janeiro de 2007. Para atualizar o custo de compra do permutador de calor de carcaça e tubos para maio de 2024, foi utilizada a seguinte correlação:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index } (2024)}{CE \text{ Index } (2007)} \quad (38)$$

Onde:

$C_{exch(2024)}$ – Custo do permutador de calor de carcaça e tubos em maio de 2024.

$C_{exch(2007)}$ – Custo do permutador de calor de carcaça e tubos em janeiro de 2007, calculado pela eq. (37).

$CE \text{ Index } (2024)$ – Índice de Engenharia Química em maio de 2024 = 800,0 [19].

$CE \text{ Index } (2007)$ – Índice de Engenharia Química em janeiro de 2007 = 509,7 [17].

3.- Análise e Interpretação dos Resultados.

3.1. Projeto preliminar.

Abaixo são mostrados cada passo implementado na metodologia para desenhar o permutador de calor de casca e tubo para arrefecimento por ácido acrílico.

Passo 1. Definição dos dados iniciais disponíveis para os dois fluxos:

A Tabela 3 mostra os dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Tabela 3. Dados iniciais disponíveis para os dois fluxos.

Parâmetro	Unidades	Água de arrefecimento	Ácido acrílico
Caudal mássico	kg/h	-	50,000
Temperatura de entrada	°C	25	97
Temperatura de saída	°C	45	40
Queda máxima de pressão permitida	Pa	1,000	5,000
Fator de falta	W/m ² ·°C	1,000	3,000

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido frio (\bar{t})

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{25 + 45}{2} = 35 \text{ °C} \quad (1)$$

- Fluido quente (\bar{T})

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{97 + 40}{2} = 68.5 \text{ °C} \quad (2)$$

Passo 3. Propriedades físicas de ambos os fluidos à temperatura média:

De acordo com [20], ambos os fluidos apresentam as propriedades físicas apresentadas na Tabela 4 às temperaturas médias calculadas no passo anterior.

Tabela 4. Propriedades físicas definidas para ambos os fluidos.

Propriedade	Unidades	Água de arrefecimento	Ácido acrílico
Densidade	kg/m ³	994.033	995.54
Viscosidade	Pa.s	0.000719	0.0005696
Capacidade calorífica	kJ/kg.°C	4.179	2.1897
Condutividade térmica	W/m.K	0.6233	0.1449

Fonte: Explicação própria.

Passo 4. Carga térmica (Q)

Usando os dados iniciais para o fluido quente:

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

$$Q = \frac{50,000}{3,600} \cdot 2.1897 \cdot (97 - 40)$$

$$Q = 1,733.59 \text{ kW}$$

Passo 5. Caudal mássico necessário do fluido frio (água de arrefecimento) (m_c)

$$m_c = \frac{Q}{C p_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{1,733.59}{4.179 \cdot (45 - 25)} \quad (4)$$

$$m_c = 20.74 \text{ kg/s}$$

Passo 6. Suposição do coeficiente global de transferência de calor (U_0)

Tendo em conta o intervalo reportado por [17] para arrefecedores que usam água para arrefecer solventes

orgânicos, assumiu-se um valor para o coeficiente global de transferência de calor (U_0) de $300 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Passo 7. Diferença média de temperatura logarítmica (ΔT_{lm})

- Para uma disposição contracorrente:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (5)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(97 - 45) - (40 - 25)}{\ln \frac{(97 - 45)}{(40 - 25)}}$$

$$\Delta T_{lm} = 29.76 \text{ }^\circ\text{C}$$

Passo 8. Fator R:

$$R = \frac{(T_1 - T_2)}{(t_2 - t_1)} = \frac{(97 - 40)}{(45 - 25)} = 2.85 \quad (6)$$

Passo 9. Fator S:

$$S = \frac{(t_2 - t_1)}{(T_1 - t_1)} = \frac{(45 - 25)}{(97 - 25)} = 0.278 \quad (7)$$

Passo 10. Fator de correção de temperatura (F_t)

- Para uma carga 1: permutador de calor de passagem de 2 tubos:

$$F_t = \frac{\sqrt{(R^2 + 1)} \cdot \ln \left[\frac{(1 - S)}{(1 - R \cdot S)} \right]}{(R - 1) \cdot \ln \left[\frac{2 - S \cdot [R + 1 - \sqrt{(R^2 + 1)}]}{2 - S \cdot [R + 1 + \sqrt{(R^2 + 1)}]} \right]} \quad (8)$$

$$F_t = 0.683$$

Passo 11. Diferença verdadeira de temperatura (ΔT_m)

$$\Delta T_m = \Delta T_{lm} \cdot F_t = 29.76 \cdot 0.683 = 20.326 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

Passo 12. Área provisória de transferência de calor (A_0)

$$A_0 = \frac{Q \cdot 1,000}{U_0 \cdot \Delta T_m} = \frac{1,733.59 \cdot 1,000}{300 \cdot 20.326} \quad (10)$$

$$A_0 = 284.29 \text{ m}^2$$

Passo 13. Seleção dos seguintes dados para os tubos:

- Diâmetro nominal: 3/4 pol, 40 ST. Assim, segundo [20]:
Diâmetro exterior (d_o) = 0,0267 m.
Diâmetro interior (d_i) = 0,0209 m.
- Material: Aço inoxidável (18/8).
- Comprimento (L_t) = 4,83 m.

Passo 14. Área de um tubo (a_1)

$$a_1 = \pi \cdot L_t \cdot d_o = 3.14 \cdot 4.83 \cdot 0.0267 \quad (11)$$

$$a_1 = 0.4049 \text{ m}^2$$

Passo 15. Número de tubos (N_0)

$$N_0 = \frac{A_0}{a_1} = \frac{284.29}{0.4049} = 702.12 \approx 702 \quad (12)$$

Passo 16. Disposição dos tubos:

O passo triangular foi selecionado para proporcionar taxas de transferência de calor mais elevadas, mesmo à custa de quedas de pressão mais elevadas [17], porque a queda de pressão não é um parâmetro importante a considerar neste serviço de transferência de calor, segundo os supervisores da indústria onde este STHE será instalado. No entanto, a queda de pressão será calculada para ambos os fluxos de fluido nesta metodologia de conceção, e os valores obtidos serão comparados com os limites máximos permitidos estabelecidos pelo processo.

Passo 17. Seleção das constantes e $K_1 n_1$:

De acordo com [17], para uma disposição triangular de tubos e um número de passagens de tubos (n_p) de 2, os valores destas constantes são: n_p

- $K_1 = 0,249$.
- $n_1 = 2,207$.

Passo 18. Diâmetro do feixe (D_b)

$$D_b = d_o \cdot \left(\frac{N_0}{K_1} \right)^{1/n_1} = 26.67 \cdot \left(\frac{702}{0.249} \right)^{1/2.207} \quad (13)$$

$$D_b = 975.62 \text{ mm}$$

Passo 19. Seleção o tipo de permutador de calor de casca e tubos:

O tipo selecionado de permutador de calor de casca e tubo é uma cabeça flutuante de anel dividido para eficiência e facilidade de limpeza [17].

Passo 20. Folga do feixe de projéteis (C_{sb})

Como referido por [17], a folga do feixe de concha para um valor do diâmetro do feixe (D_b) de 975,62 mm e um tipo de cabeça flutuante de anel dividido, é de 72 mm. D_b

Passo 21. Diâmetro da concha (D_s)

$$D_s = D_b + C_{sb} = 975.62 + 72 = 1,047.62 \text{ mm} \quad (14)$$

Passo 22. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor.

Tendo em conta as sugestões reportadas por [17], o fluido frio (água de arrefecimento) estará localizado do lado do tubo, enquanto o fluido quente (ácido acrílico) estará localizado do lado da carga.

3.2. Coeficiente do lado do tubo.

Devido à alocação do fluido frio nos tubos e do fluido quente na casca, a nomenclatura de alguns parâmetros será corrigida para concordar com a nomenclatura das equações que serão usadas daqui para a frente.

A Tabela 5 indica a nomenclatura inicial e corrigida dos parâmetros utilizados nas próximas equações.

Tabela 5. Nomenclatura original e corrigida dos parâmetros usados nas próximas equações.

Parâmetro	Nomenclatura original	Nomenclatura corrigida	Unidades
Caudal do fluido quente	m_h	m_s	kg/h
Caudal do fluido frio	m_c	m_t	kg/h
Densidade do fluido quente	ρ_h	ρ_s	kg/m ³
Densidade do fluido frio	ρ_c	ρ_t	kg/m ³
Viscosidade do fluido quente	μ_h	μ_s	Pa.s
Viscosidade do fluido frio	μ_c	μ_t	Pa.s
Capacidade térmica do fluido quente	Cp_h	Cp_s	kJ/kg. K
Capacidade calorífica do fluido frio	Cp_c	Cp_t	kJ/kg. K
Condutividade térmica do fluido quente	k_h	k_s	W/m.K
Condutividade térmica do fluido frio	k_c	k_t	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

A Tabela 6 mostra os resultados dos parâmetros calculados nos passos 23 a 32, para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado do tubo.

Tabela 6. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 23-32.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
23	Área da seção transversal do tubo	a_t	0.00034	M2
24	Número de tubos por passagem	N_{tp}	351	-
25	Área total de escoamento	a_T	0.1193	M2
26	Velocidade de massa do fluido do lado do tubo	G_t	173.85	kg/s.m ²
27	Velocidade linear do fluido do lado do tubo	v_t	0.175	m/s
28	Número de Reynolds do fluido do lado do tubo	Re_t	5,056.57	-
29	Número de Prandtl do fluido do lado do tubo	Pr_t	4.82	-
30	Proporção L_t/d_i	-	231.10	-
31	Fator de transferência de calor do lado do tubo ¹	j_{h1}	0.0041	-
32	Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo ²	h_i	1,162.11	W/m ² . K

¹ Para um valor de Re_t e de 5056,57 e 231,10, respectivamente. L_t/d_i

² A equação (23) foi utilizada para calcular estes parâmetros, uma vez que a água flui nos tubos.

Fonte: Explicação própria.

3.3. Coeficiente do lado da carapaça.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos parâmetros calculados nos passos 33-42, para determinar o coeficiente de transferência de calor do lado da casca.

Tabela 7. Resultados dos parâmetros calculados nos passos 33-42.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
33	Espaçamento do defletor ¹	l_B	209.52	mm
34	Afinação a válvulas	p_t	0.0334	m
35	Área de fluxo cruzado do fluido lateral da casca	A_s	0.0440	M2
36	Velocidade de massa do fluido lateral da concha	G_s	315.65	kg/s.m ²
37	Diâmetro equivalente do lado da concha ²	d_e	0.0191	m
38	Número de Reynolds do fluido do lado da casca	Re_s	10,584.47	-
39	Número de Prandtl do fluido do lado da concha	Pr_s	8.61	-
40	Seleção do corte com defletor	-	25%	-
41	Fator de transferência de calor do lado da casca	j_{h2}	0.0058	-
42	Coeficiente de transferência de calor do lado da carapaça ³	h_o	947.66	W/m ² . K

Foi selecionado um valor de 0,2 para ϕ calcular o espaçamento dos defletores.

^{2A} Equação (29) foi utilizada para calcular o diâmetro equivalente do lado da casca devido à seleção do arranjo triangular do passo.

^{3O} termo de correção de viscosidade não foi considerado porque ambos os fluidos têm baixa viscosidade $(\mu_s/\mu_{sw})^{0.14}$ [17].

Fonte: Explicação própria.

3.4. Coeficiente global de transferência de calor calculado.

Passo 43. Condutividade térmica do material do tubo (k_w). Como o material selecionado para os tubos é aço inoxidável 18/8, a condutividade térmica deste material é de 16 W/m.K [17].

Passo 44. Coeficiente global de transferência de calor calculado (U_C)

$$U_C = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{1}{R_s} + \frac{d_o \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2 \cdot k_w} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{R_t} + \frac{d_o}{d_i} \cdot \frac{1}{h_i}} \quad (33)$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{947.66} + \frac{1}{5.000} + \frac{0.0267 \cdot \ln\left(\frac{0.0267}{0.0209}\right)}{2 \cdot 16} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{3.000} + \frac{0.0267}{0.0209} \cdot \frac{1}{1162.11}}$$

$$U_C = 364.26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3.5. Queda de pressão

Passo 45. Fator de atrito para o fluido do lado do tubo (f_{f1}). Segundo [17], para um número de Reynolds do fluido do lado do tubo (água de arrefecimento) de 5.056,57, o fator de atrito (f_{f1}) tem um valor de 0,0058. f_{f1}

Passo 46. Queda de pressão do fluido do lado do tubo (ΔP_t)

$$\Delta P_t = n_p \cdot \left[8 \cdot j_{f1} \cdot \left(\frac{L_t}{d_i} \right) \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}} \right)^{-0.14} + 2.5 \right] \quad (34)$$

$$\Delta P_t = 2 \cdot \left[8 \cdot 0.0058 \cdot \left(\frac{4.83}{0.0209} \right) \cdot 1 + 2.5 \right] \cdot \frac{994.033 \cdot 0.175^2}{2}$$

$$\Delta P_t = 402.54 \text{ Pa}$$

Enquanto $(\mu_t/\mu_{tw})^{-0.14} = 1$ que sugerido por [17] porque a água não é considerada um fluido altamente viscoso.

Passo 47. Fator de atrito do fluido do lado da casca (\cdot) j_{f2}
Segundo [17], para um número de Reynolds do fluido lateral da casca (ácido acrílico) de 10.584,47 e um corte de defletor de 25%, o fator de atrito (\cdot) tem um valor de 0,0049 j_{f2}

Passo 48. Velocidade linear do fluido do lado da casca (\cdot) v_s

$$v_s = \frac{G_s}{\rho_s} = \frac{315.65}{995.54} = 0.317 \text{ m/s} \quad (35)$$

Passo 49. Queda de pressão do fluido do lado da casca (\cdot) ΔP_s

$$\Delta P_s = 8 \cdot j_{f2} \cdot \left(\frac{D_s}{d_e} \right) \cdot \left(\frac{L_t}{l_B} \right) \cdot \frac{\rho_s \cdot v_s^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_{sw}} \right)^{-0.14} \quad (36)$$

$$\Delta P_s = 8 \cdot 0.0049 \cdot \left(\frac{1.04762}{0.0191} \right) \cdot \left(\frac{4.83}{0.20952} \right) \cdot \frac{995.54 \cdot 0.317^2}{2}$$

$$\Delta P_s = 2,479.27 \text{ Pa}$$

3.6. Custo de compra do permutador de calor.

Para um valor da área de troca de calor de 207,47 m², o custo de compra do permutador de calor de casca e tubos projetado é:

$$C_{exch(2007)} = a + b \cdot A^n \quad (37)$$

$$C_{exch(2007)} = 24,000 + 46 \cdot 284.29^{1.2}$$

$$C_{exch(2007)} \approx \text{USD } \$ 64,483$$

Como o custo de compra calculado pela equação (37) corresponde a janeiro de 2007, o custo de compra deste equipamento referido em maio de 2024 é:

$$C_{exch(2024)} = C_{exch(2007)} \cdot \frac{CE \text{ Index } (2024)}{CE \text{ Index } (2007)} \quad (38)$$

$$C_{exch(2024)} = 64,483 \cdot \frac{800.0}{509.7}$$

$$C_{exch(2024)} = \text{USD } \$ 101,209$$

4.- Discussão

Um permutador de calor de casca e tubos com uma passagem de casca e duas passagens de tubos foi projetado para arrefecer um fluxo de ácido acrílico, originado no fundo de uma coluna de destilação, de 97 a 40 °C por meio de água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C, utilizando a metodologia de design relatada por [17], que se baseia na abordagem de Kern. A água de arrefecimento era destinada a fluir para dentro dos tubos,

enquanto o ácido acrílico era atribuído ao fluxo sobre a carcaça.

O valor calculado da carga térmica para este serviço de permutador de calor foi de 1.733,59 kW, enquanto será necessário um caudal de 20,74 kg/s (74.664 kg/h) para o agente de transferência de calor selecionado (água de arrefecimento). A diferença de temperatura média logarítmica tinha um valor de 29,76 °C, enquanto os valores do fator de correção de temperatura e da diferença real de temperatura foram de 0,683 e 20,326 °C, respectivamente.

A velocidade de massa e a velocidade linear da água de arrefecimento foram de 173,85 kg/s.m² e 0,175 m/s, respectivamente, enquanto o número de Reynolds calculado para este fluido foi 5.056,57, indicando assim que a água de arrefecimento fluirá sob o regime de transição. O coeficiente de transferência de calor calculado do fluido do lado do tubo foi de 1.162,11 W/m².K.

Os valores da velocidade de massa e da velocidade linear do ácido acrílico foram, respectivamente, 315,65 kg/s.m² e 0,317 m/s. O número de Reynolds calculado para o ácido acrílico foi 10.584,47, indicando assim que este fluido fluirá sob regime turbulento no permutador de calor projetado. O coeficiente de transferência de calor calculado ao lado da carcaça foi de 947,66 W/m².K.

O coeficiente de transferência de calor do fluido do lado do tubo é cerca de 1,23 vezes superior ao coeficiente de transferência de calor do lado da carcaça, o que concorda com os resultados do permutador de calor de casca e tubos projetado em [17], onde o coeficiente de transferência de calor do fluido do lado do tubo (água salobra) é de 3.852 W/m². K, enquanto o coeficiente de transferência de calor para o fluido do lado da casca (metanol) é de 2.740 W/m². K (ou seja, cerca de 1,40 vezes mais alto).

A queda de pressão calculada do fluido do lado do tubo, ou seja, da água de arrefecimento (402,54 Pa), é cerca de 6,16 vezes inferior à queda de pressão do fluido do lado da carapaça, ou seja, da água acrílica (2.479,27 Pa). Este resultado concorda com os resultados da queda de pressão calculada durante o desenho de um permutador de calor de casca e tubos em [17], onde o valor da queda de pressão (7,2 kPa) da água salobra usada como fluido de arrefecimento (fluido do lado do tubo) é inferior ao valor da queda de pressão (272 kPa) do fluido do lado da casca (metanol). Os valores da queda de pressão calculada no presente estudo para ambos os fluidos estão abaixo dos limites máximos permitidos estabelecidos pelo serviço de troca de calor.

Um valor calculado do coeficiente global de transferência de calor de 364,26 W/m². K foi obtido, que está acima do valor assumido (300 W/m². K) no passo 6, indicando assim que o projeto tem área adequada para o dever exigido [17].

Assim, o permutador de calor de carcaça e tubos projetado neste estudo apresentará os seguintes dados de projeto:

- Tipo: Cabeça flutuante de anel dividido.
- Área de transferência de calor (\dot{Q}): 284,29 m²A.
- Número de tubos (\dot{N}): 702.N
- Diâmetro do feixe (\dot{D}_b): 975,62 mm.
- Diâmetro do projétil (\dot{D}_s): 1.047,62 mm.

O permutador de calor de casca e tubos, projetado em [17] para arrefecer 100.000 kg/h de um fluxo de metanol por meio de água salobra, tem os seguintes parâmetros de projeto:

- Tipo: Cabeça flutuante de anel dividido.
- Área de transferência de calor (\dot{Q}): 278 m²A.
- Número de tubos (\dot{N}): 918.N
- Diâmetro do feixe (\dot{D}_b): 826 mm.
- Diâmetro do projétil (\dot{D}_s): 894 mm.

Em [9], foi projetado um permutador de calor de casca e tubos para arrefecer 0,827 kg/s de fluxo de óxido nítrico de 150 °C a 50 °C, usando água a uma temperatura de fornecimento de 35 °C. Os parâmetros do permutador de calor de casca e tubos desenhados neste estudo são apresentados abaixo:

- Área de transferência de calor (\dot{Q}): 8,98 m²A.
- Número de tubos (\dot{N}): 60.N
- Diâmetro do feixe (\dot{D}_b): 240,049 mm.
- Diâmetro do projétil (\dot{D}_s): 251,049 mm.
- Coeficiente total de transferência de calor (\dot{K}): 405,62 W/m² K.
- Queda de pressão no lado da carcaça: 82,93 kPa.

Neste estudo, o óxido nítrico foi distribuído na lateral da concha, enquanto a água de arrefecimento foi distribuída pelos tubos. No entanto, o valor do coeficiente de transferência de calor do lado do tubo (1.059,197 W/m² K) é 1,51 vezes inferior ao valor do coeficiente de transferência de calor do lado da casca (1.601,63 W/m² K), que difere dos resultados do nosso estudo.

Outros autores [7] realizaram o design de um permutador de calor de casca e tubos para aplicações de produção de celulose nanofibrilada. Os resultados dos parâmetros de desempenho obtidos durante o desenho deste STHE são apresentados abaixo:

- Taxa de transferência de calor (\dot{Q}): 167.720 W.
- Área de transferência de calor (\dot{Q}): 16,87 m²A.
- Número de tubos (\dot{N}_t): 53.N_t
- Concha do feixe (\dot{D}_b): 1,85 m.
- Coeficiente de transferência de calor por convecção no tubo (\dot{K}): 135,34 W/m² K.
- Coeficiente de transferência de calor por convecção na camada (\dot{K}_0): 0,5934 W/m² K.
- Coeficiente total de transferência de calor real (\dot{K}): 0,5932 W/U_{act}^m K.
- Eficácia ($\dot{\epsilon}$): 89,21%.

Da mesma forma, em [4] um STHE é concebido para arrefecer 1,5 kg/s de um fluxo de óleo de 107 °C a 27 °C

usando 1,72 kg/s de água de arrefecimento com uma temperatura de entrada de 27 °C. Neste estudo, o fluido quente é distribuído do lado da carcaça enquanto o fluido frio está localizado do lado do tubo, o que é semelhante às condições do nosso estudo. Vários parâmetros são calculados neste trabalho, alguns dos quais são apresentados abaixo:

- Energia transferida (\dot{Q}): 129.660 W.
- Área de transferência de calor (\dot{Q}): 3,43 m²A.
- Número de tubos (\dot{N}_t): 26.N_t
- Coeficiente de transferência de calor do lado do tubo (\dot{K}): 126,63 W/m² K.
- Coeficiente de transferência de calor no lado da carcaça (\dot{K}): 182,65 W/m² K.
- Coeficiente global de transferência de calor assumido (\dot{K}): 800 W/U^m K.
- Eficácia ($\dot{\epsilon}$): 50,01%.

5.- Conclusões.

Um permutador de calor de casca e tubos com passagem onshell e duas passagens tubulares foi projetado do ponto de vista termo-hidráulico, utilizando uma metodologia de design bem conhecida baseada na abordagem de Kern, para arrefecer 50.000 kg/h de um fluxo de ácido acrílico de 97 °C a 40 °C usando água de arrefecimento a uma temperatura de entrada de 25 °C. Foram determinados vários parâmetros, como a carga térmica (1.733,59 kW); coeficiente total de transferência de calor (364,26 W/m² K); área de transferência de calor (284,29 m²); número de tubos (702); e diâmetro do projétil (1.047,62 mm). O caudal mássico da água de arrefecimento necessário para arrefecer este fluxo de ácido acrílico é de 20,74 kg/s (74.664 kg/h). O tipo de permutador de calor de carcaça e tubos selecionado tinha uma cabeça flutuante de anel dividido, enquanto a queda de pressão da água (402,54 Pa) e do ácido acrílico (2.479,27 Pa) é inferior à queda máxima permitida definida pelo serviço. O custo de compra do permutador de calor de carcaça e tubos projetado é de USD \$ 101.209.

6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curadoria de dados: Laura Thalía Alvarez Lores, Lizthalia Jiménez Guerra.
3. Análise Formal: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Aguila.
4. Aquisição de fundos: Não aplicável.
5. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalia Jiménez Guerra.
6. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Águila.
7. Gestão de projetos: Não aplicável.
8. Recursos: Não aplicável.
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez.
11. Validação: Amaury Pérez Sánchez, Laura Thalía Alvarez Lores.

12. Ecrã: Não aplicável.
13. Redação - rascunho original: Laura Thalía Alvarez Lores, Laura de la Caridad Arias Águila, Lizthalía Jiménez Guerra.
14. Escrita - revisão e edição: Amaury Pérez Sánchez.

7.- Apêndice.

Nomenclatura.

a	Constante a usar na equação (37)	-
a_1	Área de um tubo	M2
a_t	Área da secção transversal do tubo	M2
a_T	Área total de escoamento	M2
A	Área do permutador de calor a usar na equação (37)	M2
A_0	Área provisória de transferência de calor	M2
A_s	Área de fluxo cruzado do fluido lateral da casca	M2
b	Constante a usar na equação (37)	-
C_p	Capacidade calorífica	kJ/kg. K
C_{sb}	Folga do feixe de projéteis	mm
d_e	Diâmetro equivalente ao lado da carcaça (diâmetro hidráulico)	m
d_i	Diâmetro interior do tubo	m
d_0	Diâmetro exterior do tubo	m
D_b	Diâmetro do feixe	m
D_s	Diâmetro da concha	mm
F_t	Fator de correção de temperatura	-
G	Velocidade de massa	kg/s.m ²
h_i	Coefficiente de transferência de calor do lado do tubo	W/m ² . K
h_0	Coefficiente de transferência de calor do lado da casca	W/m ² . K
j_{f1}	Fator de fricção para o fluido do lado do tubo	-
j_{f2}	Fator de atrito do fluido do lado da casca	-
j_{h1}	Fator de transferência de calor do lado do tubo	-
k	Condutividade térmica	W/m.K
k_W	Condutividade térmica do material do tubo	W/m.K
K_1	Constante a usar na equação (13)	-
l_B	Espaçamento dos defletores	mm
L_t	Comprimento do tubo	m
m	Caudal mássico	kg/h
n	Constante a usar na equação (37)	-
n_1	Constante a usar na equação (13)	-
n_p	Número de passagens do lado do tubo	-
N_0	Número de tubos	-
N_{tp}	Número de tubos por passagem	-
p_t	Afinação a válvulas	m
Pr	Número de Prandtl	-

ΔP_t	Queda de pressão do fluido do lado do tubo	Pa
Q	Carga térmica	kW
R	Fator	-
Re	Número de Reynolds	-
S	Fator	-
t	Fluido frio de temperatura	°C
T	Fluido quente de temperatura	°C
\bar{t}	Temperatura média do fluido frio	°C
\bar{T}	Fluido quente a temperatura média	°C
ΔT_{lm}	Diferença de temperatura média logarítmica	°C
ΔT_m	Diferença verdadeira de temperatura	°C
U_0	Coefficiente global de transferência de calor assumido	W/m ² . K
U_c	Coefficiente global de transferência de calor calculado	W/m ² . K
v	Velocidade linear	m/s

Símbolos gregos

φ	Fator	-
ρ	Densidade	kg/m ³
μ	Viscosidade	Pa.s

Subíndices

1	Entrada
2	Saída
c	Fluido frio
h	Fluido quente
s	Fluido do lado da carcaça
t	Fluido do lado do tubo

8.- Referências.

- [1] M. Flynn, T. Akashige e L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2.ª ed. Beverly, EUA: Scrivener Publishing, 2019. <https://dokumen.pub/kerns-process-heat-transfer-2nbsped-9781119364177-9781119364832-9781119363644-1119364175.html>
- [2] E. J. Fernandes e S. H. Krishnamurthy, "Projeto e análise de permutador de calor de casca e tubos," *Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim.*, vol. 13, n° 15, pp. 1-8, 2022. <https://doi.org/10.1051/smdo/2022005>
- [3] P. Bichkar, O. Dandgaval, P. Dalvi, R. Godase e T. Dey, "Estudo do Permutador de Calor de Casca e Tubos com o Efeito de Tipos de Deflectores," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, pp. 195-200, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.028>
- [4] R. Ragadhita e A. B. D. Nandiyanto, "Como Calcular e Projetar Permutador de Calor do Tipo Casca e Tubo com uma Única Transferência de Calor," *ASEAN Journal for Science and Engineering in Materials*, vol. 3, n° 1, pp. 21-42, 2024. <https://ejournal.bumipublikasinusantara.id/index.php/ajsem/article/view/400>
- [5] L.-Y. Chen, V. S. K. Adi, e R. Laxmidewi, "Estratégia flexível de conceção de permutadores de calor em casca e tubos para operabilidade de processos," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 37, p. 102163, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102163>
- [6] D. Bogale, "Projeto e Desenvolvimento de Permutador de Calor de Casca e Tubos para Aplicação de Pasteurizadores da Harar Brewery Company (Design Mecânico e Térmico)," *American Journal of Engineering Research*, vol. 03, n° 10, pp. 99-109, 2014. [https://www.ajer.org/papers/v3\(10\)/N0310990109.pdf](https://www.ajer.org/papers/v3(10)/N0310990109.pdf)

- [7] H. N. Purnamasari, T. Kurniawan e A. B. D. Nandiyanto, "Projeto de permutador de calor do tipo concha e tubo para processo de produção de celulose nanofibrila," *International Journal of Research and Applied Technology*, vol. 1, n° 2, pp. 318-329, 2021. <https://ojs.unikom.ac.id/index.php/injuratech/article/view/6410>
- [8] S. P. Chit, P. K. Ma, e C. C. Khaing, "Design Térmico de Permutador de Calor de Casca e Tubos," *Iconic Research and Engineering Journals*, vol. 3, n° 1, pp. 313-318, 2019. <https://www.irejournals.com/formatedpaper/1701405.pdf>
- [9] S. Kashyap, "Projeto de um permutador de calor de casca e tubos," *IJARIE*, vol. 3, n.º 4, pp. 536-550, 2017. <https://ijarie.com/FormDetails.aspx?MenuScriptId=14928&srsId=AfmBOorg5c2Z1jtVWTTZnLXZyVP8vibVhGOjfhzbpF7esiJJQgjjc7>
- [10] D. Singh e N. D. Pal, "Projeto e Avaliação de Desempenho de um Permutador de Calor de Casca e Tubos usando Ansys (Dinâmica Computacional dos Fluidos)", *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science*, vol. 2, n° 3, pp. 427-446, 2016. <https://ijseas.com/volume2/v2i3/ijseas20160348.pdf>
- [11] S. H. Gawande, S. D. Wankhede, R. N. Yerrawar, V. J. Sonawane e U. B. Ubarhande, "Design e Desenvolvimento de Permutador de Calor de Casca e Tubos para Bebidas," *Modern Mechanical Engineering*, vol. 2, pp. 121-125, 2012. <http://dx.doi.org/10.4236/mme.2012.24015>
- [12] F. H. Napatupulu, T. B. Sitorus, H. V. Sihombing, A. H. Siburian e H. Siagian, "Conceção e fabrico de permutador de calor de casca e tubos com casca de uma passagem e tubo de duas passagens como aquecedor de água com água quente de enxofre," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2421, p. 012034, 2023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012034>
- [13] J.-F. Zhang, Y.-L. Ele, e W.-Q. Tao, "Um Método de Design e Classificação para Trocadores de Calor de Casca e Tubos com Deflectores Helicoidais," *Journal of Heat Transfer*, vol. 132, pp. 1-8, 2010. <https://doi.org/10.1115/1.4000457>
- [14] R. Mukherjee, "Projetar eficazmente permutadores de calor de casca e tubos," *Chemical Engineering Progress*, pp. 1-17, 1998. <https://www.torr-engenharia.com.br/wp-content/uploads/2011/05/exchanger.pdf>
- [15] S. Kakaç, H. Liu e A. Pramuanjaroenkij, *Permutadores de Calor - Seleção, Classificação e Design Térmico*, 3.ª ed. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2012.
- [16] E. Cao, *Transferência de calor em engenharia de processos*. Nova Iorque, EUA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. <https://dokumen.pub/heat-transfer-in-process-engineering-1nbsped-0071624082-9780071624084.html>
- [17] R. Sinnott e G. Towler, *Design de Engenharia Química*, 6.ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020. <https://app.knovel.com/kn/resources/kpCEDE0001/toc>
- [18] R. Mukherjee, *Design Térmico Prático de Permutadores de Calor de Casca e Tubo*. Nova Iorque, EUA: Begell House, Inc., 2004.
- [19] Engenharia Química. (2024) Indicadores Económicos. *Revista de Engenharia Química*. 52.
- [20] D. W. Green e M. Z. Southard, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 9.ª ed. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill Education, 2019.

Produção de Salsicha Tipo Viena a partir de polpa de lula (*Dosidicus gigas*).

*Elaboração de uma salsicha do tipo Viena a partir de polpa de lula gigante (*Dosidicus gigas*)*

Richard Smith Gutierrez Huayra ^{1*}

Recebido: 02/08/2025 – Aceite: 16/10/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

A lula (*Dosidicus gigas*) é um recurso marinho abundante de elevado valor nutricional, com grande potencial para diversificar a indústria alimentar através do desenvolvimento de produtos inovadores de valor acrescentado. O objetivo da investigação foi analisar a viabilidade de fazer uma salsicha tipo Viena usando polpa de lula, otimizando a sua formulação e avaliando a sua aceitação sensorial. Trabalhámos com três formulações que incorporavam 5%, 8% e 10% de amido. O processo tecnológico incluía condicionamento, lixiviação, moagem, homogeneização, recheio, branqueamento, arrefecimento e refrigeração. A avaliação de preferência foi realizada com um painel de 30 juizes não formados, utilizando o teste estatístico de Friedman. Da mesma forma, foram realizadas análises químicas, nutricionais e microbiológicas para determinar tanto o valor nutricional como a segurança do produto. A formulação com 8% de amido mostrou a melhor aceitação nas características de sabor, aparência e textura. As condições ótimas de processamento foram: emulsificação a 10 °C, cozedura a 70 °C durante 23 minutos e arrefecimento a 2–4 °C durante 5 minutos, com menor consumo de energia em comparação com outras formulações. Cada 100 g de produto forneceu 17,4 g de proteína, 1,2 g de gordura, 1,3 g de hidratos de carbono e 125 Kcal, com um perfil mais saudável do que a salsicha de controlo. Análises microbiológicas confirmaram a segurança do produto, pois foram registadas baixas contagens aeróbicas e ausência de agentes patogénicos. Em conclusão, a produção de salsichas de Viena a partir de polpa de lula é uma alternativa viável que proporciona benefícios nutricionais, sensoriais e para a saúde, contribuindo para a diversificação dos produtos derivados da pesca.

Palavras-chave.

Lula (*Dosidicus gigas*), salsicha de Viena, produtos pesqueiros, segurança alimentar, valor acrescentado.

Resumen.

La pota (*Dosidicus gigas*) constituye un recurso marino abundante y de alto valor nutricional, con gran potencial para diversificar la industria alimentaria mediante el desarrollo de productos innovadores de valor agregado. El objetivo de la investigación fue analizar la factibilidad de elaborar una salchicha tipo Viena utilizando pulpa de pota, optimizando su formulación y evaluando su aceptación sensorial. Se trabajó con tres formulaciones que incorporaron 5%, 8% y 10% de almidón. El proceso tecnológico comprendió acondicionamiento, lixiviación, molienda, homogeneización, embutido, escaldado, enfriamiento y conservación en refrigeración. La evaluación de preferencia se efectuó con un panel de 30 jueces no entrenados mediante la prueba estadística de Friedman. Asimismo, se realizaron análisis químicos, nutricionales y microbiológicos para determinar tanto el valor nutritivo como la inocuidad del producto. La formulación con 8% de almidón evidenció la mejor aceptación en los atributos de sabor, apariencia y textura. Las condiciones óptimas de procesamiento fueron: emulsificación a 10 °C, cocción a 70 °C durante 23 minutos y enfriado a 2–4 °C por 5 minutos, con un menor consumo energético respecto a otras formulaciones. Cada 100 g de producto aportaron 17,4 g de proteínas, 1,2 g de grasa, 1,3 g de carbohidratos y 125 Kcal, con un perfil más saludable que la salchicha control. Los análisis microbiológicos confirmaron la inocuidad del producto, al registrarse bajos recuentos de aerobios y ausencia de patógenos. En conclusión, la elaboración de salchichas tipo Viena a partir de pulpa de pota resulta una alternativa viable que aporta beneficios nutricionales, sensoriales y sanitarios, contribuyendo a la diversificación de los productos derivados de la pesca.

Palabras clave.

Pota (*Dosidicus gigas*), Salchicha tipo Viena, Productos pesqueros, Inocuidad alimentaria, Valor agregado.

1. Introdução

A crescente procura global por alimentos proteicos de alta qualidade e sustentáveis tem impulsionado a investigação sobre fontes não convencionais e o uso holístico dos recursos marinhos [1]. Neste contexto, a lula gigante (*Dosidicus gigas*) representa um dos recursos de cefalópodes mais abundantes do Oceano Pacífico Oriental, com volumes significativos de captura que sustentam pescas importantes em países como o Peru e o México [2]. Apesar da sua abundância e elevado valor nutricional, grande parte do seu potencial tecnológico permanece subaproveitado, sendo destinado principalmente a mercados de exportação como produto congelado ou em derivados com baixo valor acrescentado [3]. A polpa de lula,

caracterizada pelo seu elevado teor de proteína e baixo teor de gordura, apresenta uma oportunidade excepcional para o desenvolvimento de novos produtos alimentares de valor acrescentado, como as salsichas de carne funcionais [4]. Este trabalho explora a viabilidade de utilizar a polpa de *Dosidicus gigas* como matéria-prima principal na produção de salsichas de Viena, um produto de elevada procura e aceitação no mercado.

1.1 A Batata (*Dosidicus gigas*)

1.1.1 Classificação e descrição

Dosidicus gigas (d'Orbigny, 1835), comumente conhecido como lula, choco gigante ou lula de Humboldt, é um molusco cefalópode nerítico-oceânico pertencente à família

¹ Universidade Nacional de Callao; rsgutierrezh@unacvirtual.edu.pe; <https://orcid.org/0009-0009-1786-4837>; Lima – Peru.

Ommastrephidae [5]. A sua classificação taxonômica completa é a seguinte: Reino: Animalia, Filo: Moluscos, Classe: Cefalópodos, Ordem: Oegopsida, Família: Ommastrephidae, Género: Dosidicus, Espécie: *D. gigas* [6]. É um grande invertebrado, podendo atingir mais de 1,5 metros de comprimento do manto e 50 kg de peso, o que o torna um dos maiores cefalópodes do mundo [7].



Figura 1. Presença de lulas no Oceano Pacífico.
Fonte:[8].

1.1.1 Biologia e Anatomia.

É um organismo pelágico que realiza extensas migrações verticais diárias, habitando a coluna de água a profundidades que podem exceder os 800 metros durante o dia [7]. Caracteriza-se por um ciclo de vida curto (1-2 anos), crescimento extremamente rápido e elevada fecundidade, o que lhe confere grande resiliência como recurso pesqueiro [9]. A sua dieta é muito variada, incluindo peixes mesopelágicos, crustáceos e outros cefalópodes [10]. Anatomicamente e tecnologicamente, o manto é a parte de maior interesse para o processamento, representando a principal fonte de músculo comestível [4].

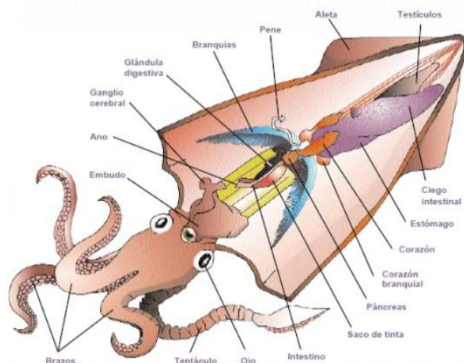


Figura 2. Anatomia da lula.

1.1.2 Composição química, nutricional e mineral.

A polpa de *Dosidicus gigas* é reconhecida pelo seu excelente valor nutricional. A sua composição proximal média consiste em elevada humidade (~80%), alto teor proteico de alto valor biológico (16-20%) e baixo teor de lípidos (<2%) [4, 10]. Esta composição torna-a uma matéria-prima magra ideal para a formulação de produtos saudáveis. A proteína da lula é rica em aminoácidos essenciais e o seu perfil mineral inclui quantidades significativas de fósforo, potássio e selênio, embora o teor de metais pesados como o cádmio possa ser uma preocupação em organismos grandes, exigindo monitorização [10, 11].

1.1.3 Azoto não proteico.

Uma característica bioquímica relevante nos cefalópodes é o seu elevado teor de compostos de azoto não proteicos (NPNs), que utilizam para a osmorregulação e fluabilidade [12]. Estes compostos incluem aminoácidos livres (taurina, arginina, prolina), betainas e, notavelmente, cloreto de amónio nos tecidos de algumas espécies de lulas de águas profundas [12, 13]. Do ponto de vista tecnológico, uma elevada concentração de amónio pode gerar sabores amargos e odores indesejáveis na polpa, o que torna necessário aplicar tratamentos de lavagem e condicionamento para garantir a qualidade sensorial do produto final [13].

1.2 Proteínas musculares magras.

A funcionalidade tecnológica da polpa de lula para a produção de salsichas emulsionadas reside na capacidade das suas proteínas de formar géis e estabilizar emulsões. As proteínas musculares são classificadas, de acordo com a sua solubilidade, em três frações principais [14].

1.2.1 Proteínas miofibrilares.

Constituem a fração mais abundante (65-75% da proteína total) e são importantes do ponto de vista funcional [13, 14]. Incluem as proteínas contráteis actina e miosina. São solúveis em soluções salinas de alta força iónica ($\geq 0,5$ M NaCl) [15]. A miosina é principalmente responsável pela gelificação induzida pelo calor, formando uma matriz tridimensional que retém água e gordura, definindo a textura, suculência e coesão das salsichas [16].

1.2.2 Proteínas sarcoplasmáticas.

Representam entre 20 e 30% da proteína total e são solúveis em água ou soluções salinas de baixa intensidade iónica [13]. Esta fração inclui enzimas e mioglobina (nas espécies que a possuem). No caso do surimi e produtos semelhantes, são frequentemente removidos por lavagem, pois podem dificultar a formação de um gel forte e afetar a cor e o sabor [17].

1.2.3 Proteínas estromais.

Constituem o tecido conjuntivo e representam uma fração minoritária no músculo dos peixes e cefalópodes (2-5%) (14). Incluem principalmente colagénio. O baixo teor de colagénio e a sua elevada termolabilidade em comparação com a dos mamíferos contribuem para a textura tenra da carne de lula, mas o seu papel na estrutura da emulsão é limitado [18].

2. Desenho de investigação e metodologia experimental para a produção de Salsicha de Lula.

O estudo sobre a produção de salsichas do tipo Viena a partir da polpa de (*Dosidicus gigas*) utilizou um desenho de investigação específico e uma metodologia experimental detalhada, que incluiu análises sensoriais e microbiológicas, bem como a aplicação do teste de Friedman.

2.1 Design de investigação.

O estudo foi desenvolvido numa abordagem experimental, que consistiu em manipular a variável independente (percentagem de amido na formulação) para avaliar o seu efeito sobre variáveis dependentes, como características sensoriais, perfil nutricional e qualidade microbiológica da lula. Este desenho permitiu o estabelecimento dos parâmetros de processamento e o contraste dos resultados obtidos em cada formulação.

2.2 Metodologia experimental.

A investigação combinava testes práticos e análise laboratorial. As salsichas eram feitas nas instalações do MICROBAC – Laboratórios E.I.R.L., enquanto a avaliação sensorial foi realizada na Faculdade de Pescas e Engenharia Alimentar da Universidade Nacional de San Luis Gonzaga (UNICA).

3. Materiais e métodos.

3.1 Materiais, equipamentos, instrumentos e reagentes.

3.1.1 Materiais.

O processo utilizava um tacho de aço (capacidade de 5 lt.) (LUISSANT), peneira de lona (60x30cm), peneiras de plástico, tábua de cortar (45x30 cm), tabuleiro de Teflon (24 cm de diâmetro) (UNCO), pavio, facas de aço inoxidável e copos descartáveis (7 oz.).

3.1.2 Equipamento.

O processo utilizava um tacho semi-industrial (SURGE), uma prensa manual, um congelador (COLDEX) e um moedor de carne (HENKEL).

3.1.3 Instrumentos.

Os instrumentos de medição incluíam um medidor de pH (POCKET), um termómetro de 150°C (OMROM), uma balança higrométrica, uma balança analítica e uma balança comercial.

3.1.4 Reagentes.

Ácido láctico e bicarbonato de sódio eram usados como reagentes.

3.2 Processo tecnológico de salsicha de lula.

Receção das matérias-primas.

A polpa de lula foi adquirida no mercado terminal de pesca de Pisco e os insumos no mercado nº 2 - Pisco.

Condicionamento.

A pelagem da lula foi esfolada, a cartilagem removida, lavada e congelada a 4-6 °C [8]. Devido ao sabor ácido e amargo da lula, proveniente dos compostos nitrogenados não proteicos (NNPs), foi realizado um processo de separação que envolveu quatro lavagens.

Cortado.

A lula era cortada em cubos para facilitar a moagem e obter uma pasta semelhante ao surimi.

A grindar.

Depois de a lula ser picada, é levada para a máquina de moer para produzir a pasta, que é recebida num recipiente à saída do moinho.

Processo de lixiviação (preparação de surimi).

Este processo seguiu a metodologia de lixiviação ácido-salina em quatro etapas:

Primeira lavagem.

A lula moída foi colocada numa solução de 0,5% de ácido láctico e 0,15% de sal (proporção 2:1 entre solução e carne) durante 10 minutos sob pressão manual constante, mantendo a temperatura da solução abaixo de 10 °C, e depois peneirada.

Segunda e terceira lavagem.

Estas lavagens eram realizadas apenas com água fria (abaixo dos 10 °C) durante 10 minutos, em pressão manual constante e peneirado subsequente para a lavagem seguinte.

Lavandaria.

A neutralização foi conseguida usando uma solução de bicarbonato de sódio a 0,1% (abaixo dos 10 °C) durante 10 minutos em prensa manual constante, seguida de peneiração e prensagem num pano tocuyo.

Congelado.

A pasta de surimi resultante foi congelada numa forma prolongada.

Pesado.

A polpa de lula condicionada, os ingredientes e os aditivos foram pesados de acordo com cálculos para obter 500 g de produto acabado.

Tabela 1. Formulação de controlo de salsichas de vitela.

Ingredientes	gramas (g)
Carne de vaca	350

Gordura de porco	150
Gelo	250
Amido de milho	50
Fosfato	2.5
Sal da cura	2.0
Ano	15
Alho	2
Pepper	1
Cominhos	1
Ajinomoto	2
Noz-moscada	0.4
Sabor a Cachorro- quente	2
Sabor a fumo	0,2 ml
Corante vermelho morango	0,1 ml

Tabela 2. Formulação da Salsicha de Lula (*Dosidicus gigas*)

Ingredientes	Quantidade	Quantidade	Quantidade
	(g) 5% - Almidón	(g) 8% - Almidón	(g) 10% - Almidón
Carne	560	560	560
Sal	14	14	14
Pepper	1.1	1.1	1.1
Comino	1.1	1.1	1.1
Ajinomoto	2.2	2.2	2.2
Noz-moscada	0.6	0.6	0.6
Aromatizantes	2.2	2.2	2.2
Coloração	-	-	-
Gelo	140	140	140
Amido	28	44.8	56

Homogeneização.

Os ingredientes secos (temperos) foram homogeneizados num saco de polietileno.

Misto.

A pasta de lula (surimi) foi adicionada ao processador, seguida pelos ingredientes secos, depois o gelo picado e, por fim, a percentagem de amido.

Embedded.

A mistura homogênea era colocada numa máquina de enchimento e a carcaça de celulose era preenchida sob pressão.

Amarrados.

Depois de a carcaça de celulose ser enchida, eram ligadas em unidades individuais de tamanho padrão.

A branquear.

As salsichas foram branqueadas durante 20 minutos, garantindo que estavam completamente submersas em água e que a temperatura da água não ultrapassava os 80 °C.

Arrefecer.

As salsichas foram arrefecidas durante 5 minutos em água a mais de 10°C.

Refrigeração.

O produto era armazenado à temperatura de refrigeração (4 – 8 °C) para preservação.

Ver Anexo 1.- Diagrama de fluxo para obter pasta de lula (surimi).

Fonte: Autores.

Ver Anexo 2.- Fig. 4. Diagrama de fluxo para obter salsicha de lula.

Fonte: Autores.

4. Análise e Interpretação dos Resultados.

4.1 O teste do Friedman para avaliação sensorial.

Para determinar a aceitabilidade das salsichas de lula, foi aplicado o teste não paramétrico de Friedman, que permitiu identificar se existiam diferenças significativas nas preferências dos juizes com base na percentagem de amido incorporada nas formulações.

Foram avaliadas três formulações:

- Salsicha com 5% de amido.
- Salsicha com 8% de amido.
- Salsicha com 10% de amido.

Avaliadores.

A avaliação envolveu um painel de 30 juizes não treinados, com idades entre os 20 e os 25 anos.

Procedimento.

A aceitabilidade foi medida através de uma escala numérica, na qual os juizes classificaram as amostras de 1 (mais preferível) a 3 (menos preferível) com base no olfato, aroma e paladar.

4.2 Teste de Hipótese.

A hipótese nula (H_0) afirmava que não havia diferenças significativas nas preferências entre amostras, enquanto a hipótese alternativa (H_a) afirmava que pelo menos uma amostra tinha uma preferência diferente. O nível de significância (α) foi fixado em 0,05.

4.3 Teste não paramétrico de Friedman.

Os resultados do teste de referência alargado são recolhidos para as seguintes características sensoriais:

Mesa. 3. Resultados do teste de preferência estendida. "Sabor."

Juizes/Avaliadores	Códigos de exemplo para "Salsicha de Lula"		
	124	242	375
Não.			
1	3	3	3
2	2	2	3
3	2	2	2
4	3	1	1
5	1	1	1
6	3	1	3
7	2	2	1
8	2	1	2
9	2	1	1
10	2	1	1
11	1	1	2
12	3	2	2
13	3	1	3
14	2	3	1
15	2	2	1

16	1	1	2
17	2	1	1
18	2	1	2
19	3	2	2
20	3	2	1
21	3	1	2
22	2	1	3
23	2	1	1
24	3	2	2
25	3	1	1
26	3	1	2
27	3	1	1
28	2	1	2
29	3	2	1
30	2	1	1
Total	70	43	51

Atribuição de Código:

124 (X): 5% de amido.

242 (Y): 8% amido.

375 (Z): 10% amido.

Tabela 4. Resultados do teste de preferência estendida. "Aparência".

Juízes/Avaliadores	Códigos de exemplo para "Salsicha de Lula"		
	Nº	100	200
1	1	2	2
2	2	1	2
3	1	2	3
4	1	1	3
5	1	2	2
6	1	2	3
7	2	3	3
8	1	3	3
9	1	1	3
10	2	2	2
11	1	1	3
12	1	2	2
13	1	3	3
14	1	2	2
15	2	1	3
16	1	3	2
17	2	2	2
18	1	3	2
19	1	1	3
20	1	1	3
21	2	1	3
22	1	3	3
23	2	2	2
24	2	1	3
25	2	2	2
26	1	2	3
27	2	2	3
28	1	2	3
29	1	1	3
30	1	2	3
Total	40	56	79

Atribuição de Código:

100 (X): 8% de amido.

200 (Y): 10% amido.

300 (Z): 5% de amido.

Tabela 5. Resultados do teste de preferência estendida. "Textura".

Juízes/Avaliadores	Códigos de exemplo para "Salsicha de Lula"			
	Nº	114	224	305
1	1	3	2	2
2	2	2	2	2
3	3	3	2	2
4	4	2	3	2
5	5	2	3	2
6	6	2	3	2
7	7	2	3	2
8	8	2	3	2
9	9	2	3	2
10	10	2	3	2
11	11	2	3	2
12	12	2	3	2
13	13	2	3	2
14	14	2	3	2
15	15	2	3	2
16	16	2	3	2
17	17	2	3	2
18	18	2	3	2
19	19	2	3	2
20	20	2	3	2
21	21	2	3	2
22	22	2	3	2
23	23	2	3	2
24	24	2	3	2
25	25	2	3	2
26	26	2	3	2
27	27	2	3	2
28	28	2	3	2
29	29	2	3	2
30	30	2	3	2
Total	69	77	50	

1	3	2	2
2	2	2	2
3	3	2	2
4	2	3	2
5	2	3	2
6	2	3	1
7	2	2	2
8	2	3	2
9	2	2	2
10	2	3	1
11	3	2	2
12	2	3	1
13	2	2	2
14	2	2	1
15	3	2	2
16	3	3	2
17	2	3	2
18	2	3	2
19	2	3	2
20	2	3	1
21	3	2	1
22	2	3	2
23	3	2	1
24	2	3	2
25	3	2	1
26	2	3	2
27	3	3	2
28	2	3	1
29	2	2	1
30	2	3	1
Total	69	77	50

Atribuição de Código:

114 (X): 10% amido.

224 (Y): 5% de amido.

305 (Z): 8% de amido.

Hipótese:

Ho: Não há diferenças significativas nas preferências da amostra.

Ha: Pelo menos uma das amostras tem uma preferência diferente em relação às outras.

Tabela 6. Resultados do teste de preferência sobre "Aparência, sabor, textura da salsicha de lula".

Mostra	Aparência	Sabor	Textura
5% Almidón	2,33±0,66b	2,63±0,49b	2,57±0,50b
8% Almidón	1,43±0,63a	1,33±0,48a	1,66±0,48a
10% Almidón	1,70±0,75a	1,87±0,73a	2,30±0,47b

(XLSTAT – Software Estatístico para Excel)

Foi reportada uma maior preferência para salsichas com substituição de amido de 8%, seguidas por aquelas com 10% ou menos para inclusão, com 5%. Isto, segundo a percepção do consumidor, segundo a aparência, sabor e textura, são atributos importantes nesta categoria de salsichas branqueadas.

4.4 Resultados estatísticos e decisão.

A estatística de Friedman calculada (X^2C) foi comparada com o valor crítico tabular (X^2T). Nos três atributos avaliados (sabor, aparência e textura), os valores calculados excederam o valor crítico, o que levou à rejeição da hipótese

nula. Assim, confirmou-se a existência de diferenças significativas nas preferências dos juízes.

Esta conclusão apoia que a formulação ótima foi 8% de amido, que apresentou a soma mais baixa de intervalos, refletindo a maior preferência na escala de avaliação.

5. Resultado da análise químico-nutricional.

Esta análise forneceu informações sobre o teor de macronutrientes e vitaminas da salsicha de lula, e a formulação ótima mostrou valores específicos para cada porção comestível de 100 g.

Tabela 7. Resultado da análise química nutricional da salsicha de lula / 100 g de porção comestível.

Descrição	Controle de Salsichas	Salsicha de Lula
Energia (Kcal)	351	125
Água (g)	48,5	49,2
Proteína (g)	14,8	17,4
Grasa (g)	29,5	1,2
Hidratos de carbono (g)	1,5	1,2
Vitam. A (mg)	-	-
Tiamina (mg)	0,03	0,03
Riboflavina (mg)	0,07	0,07
Niacina (mg)	3,7	3,7
Vitam. C (mg)	-	-

Fonte: Microbac Laboratories E.I.R.L.

6. Resultado da análise microbiológica.

Foram realizados testes microbiológicos na formulação ótima das salsichas de lula para garantir que cumpriam parâmetros de segurança aceitáveis. Os resultados foram comparados com a Norma Sanitária que estabelece os critérios microbiológicos para a segurança alimentar.

Tabela 8. Resultado da análise microbiológica da salsicha de lula.

Mostra	Contagem total de aeróbica UFC/g	Coliformes	Staphylococcus aureus Ufc/g	Salmonella a 25 g.
Salsicha de Lula	1,200	0	0	Ausência

Fonte: Microbac Laboratories E.I.R.L.

Referência – Norma Sanitária que estabelece os critérios microbiológicos de qualidade e segurança sanitária para alimentos.

NTS n.º 071 – MINSa/DIGESA – V.01 Ministério da Saúde 2010.

7. Discussão.

A presente investigação demonstra a viabilidade técnica e sensorial da produção de salsichas de Viena usando polpa de lula gigante (*Dosidicus gigas*), posicionando este recurso marinho como uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de produtos cárneos funcionais com valor acrescentado. Os resultados obtidos estão alinhados com as tendências atuais que procuram diversificar as fontes de proteína e oferecer alternativas mais saudáveis ao consumidor [19, 20].

A conclusão central do estudo é a superioridade sensorial da formulação com 8% de amido, que obteve maior aceitação

em sabor, aparência e textura. Este resultado sugere um ponto de equilíbrio tecnológico crucial. Por um lado, uma concentração de amido de 5% pode ter sido insuficiente para formar uma rede de gel totalmente integrada com a matriz proteica, afetando a coesão. Por outro lado, 10% de amido pode ter resultado numa textura excessivamente firme ou borrachosa, fenómeno documentado em produtos de surimi com elevadas concentrações deste hidrocoloide [21, 22]. O amido, quando gelatinizado durante a cozedura (70 °C), interage com as proteínas miofibrilares da lula, formando uma estrutura gelificada mista e estável que retém água e gordura, melhorando tanto a textura como a suculência [23]. O mecanismo envolve a formação de uma rede tridimensional onde os grânulos de amido inchados estão incorporados na matriz proteica, reforçando a estrutura global do gel [24].

Do ponto de vista nutricional, a salsicha de lula otimizada tem um perfil visivelmente mais saudável do que as salsichas comerciais convencionais, com um elevado teor de proteína (17,4 g/100 g) e uma ingestão baixa de gordura (1,2 g/100 g) e calorias (125 Kcal/100 g). Este perfil é consistente com a composição muscular inerente do *D. gigas* e sublinha o seu potencial para a formulação de alimentos funcionais destinados a consumidores preocupados com a saúde [25]. A substituição das gorduras animais pela proteína da lula magra não só reduz o conteúdo calórico, como também modifica o perfil de ácidos gordos, aumentando a proporção de gorduras poliinsaturadas benéficas como a EPA e a DHA, características dos produtos marinhos [26].

A qualidade textural do produto final depende fundamentalmente da capacidade de gelificação das proteínas miofibrilares da lula (miosina e actina). O tratamento térmico a 70°C é fundamental para desnaturar estas proteínas e permitir que formem uma rede tridimensional coesa [27]. Estudos recentes sobre proteínas *D. gigas* confirmam que a sua gelificação é um processo complexo que pode ser modulado por aditivos. Niu et al. [28] demonstraram que a adição de outras proteínas, como a proteína da clara de ovo, pode inibir a auto-agregação indesejada das moléculas de miosina e promover uma rede de gel mais ordenada e forte. De forma análoga, o amido na nossa formulação não atua apenas como agente de preenchimento, mas também como um ingrediente funcional que modifica positivamente a reologia do sistema, melhorando a capacidade de retenção de água e a firmeza do gel final [24].

A segurança do produto, confirmada pelas baixas contagens microbiológicas e pela ausência de agentes patogénicos, é um resultado de extrema importância. Este sucesso é atribuído à qualidade da matéria-prima, às boas práticas de fabrico e, crucialmente, ao processo de lixiviação, que reduz a carga microbiana inicial além de remover compostos de azoto não proteicos (NNP) que causam sabores indesejáveis [29]. A estabilidade microbiológica e a extensão da vida útil

são desafios significativos nos produtos de lulas devido à sua elevada atividade hídrica e potencial enzimático. Pesquisas recentes mostraram que os hidrolisados de proteína de *D. gigas* possuem propriedades antioxidantes e antimicrobianas intrínsecas, capazes de prolongar a vida útil das salsichas de lula até 95%, inibindo o crescimento e oxidação microbiana [30]. Embora os hidrolisados não tenham sido utilizados no nosso estudo, os resultados microbiológicos positivos fornecem uma base sólida para futuras inovações nesta linha.

Em conclusão, a discussão dos resultados, em contraste com a literatura científica recente, confirma que a salsicha de lula é uma alternativa viável e nutricionalmente superior. Otimizar a concentração de amido é fundamental para alcançar uma textura aceitável, enquanto o controle do processo, desde a lixiviação até à cozedura, garante a segurança e qualidade do produto. Este trabalho fornece evidências concretas para a valorização do *Dosidicus gigas*, um recurso abundante que pode contribuir significativamente para a segurança alimentar e a inovação na indústria do marisco.

8. Conclusões.

O presente estudo estabelece os parâmetros ótimos de processamento para a produção de salsicha de Viena a partir de polpa de lula (*Dosidicus gigas*), determinando que a concentração de 8% de amido de batata constitui o ponto de equilíbrio tecnológico que maximiza a aceitabilidade sensorial e as propriedades fisicoquímicas do produto. Esta formulação otimizada, processada por lixiviação (três lavagens com água fria), emulsificação com gordura vegetal e cozedura a 70 °C durante 30 minutos, gera um produto cárneo funcional com elevado teor proteico (17,4 g/100 g), baixo consumo de gordura (1,2 g/100 g) e baixo valor calórico (125 Kcal/100 g), cumprindo os padrões microbiológicos estabelecidos pela regulamentação peruana.

Esta contribuição concreta posiciona a lula como uma matéria-prima viável e nutricionalmente superior para a indústria de produtos de carne emulsificada, contribuindo para a diversificação das fontes de proteína marinha e para a valorização dos abundantes recursos pesqueiros no Pacífico Oriental.

Os resultados obtidos demonstram que a interação sinérgica entre as proteínas miofibrilares da lula e o amido durante o tratamento térmico é essencial para a formação de uma matriz gelatinosa coesa e estável, que confere ao produto final as características texturais e sensoriais desejadas. A capacidade de retenção de água, a firmeza e a suculência do produto otimizado mostram o potencial tecnológico desta espécie para aplicações na indústria alimentar, superando as limitações tradicionalmente associadas ao processamento de cefalópodes. Estas conclusões fornecem uma base científica sólida para a transferência de tecnologia para o

setor produtivo, facilitando a implementação de processos padronizados e reprodutíveis à escala industrial.

Recomenda-se que futuras investigações se concentrem em três direções prioritárias: primeiro, realizar estudos de vida útil sob diferentes condições de armazenamento refrigerado e numa atmosfera modificada para determinar a estabilidade microbiológica, fisicoquímica e sensorial do produto durante a sua comercialização; segundo, otimizar o perfil de sabor avaliando diferentes combinações de especiarias, temperos e agentes mascaradores que minimizem possíveis notas residuais características da lula, melhorando assim a aceitação pelo consumidor; e terceiro, desenvolver estudos de ampliação a nível piloto e industrial que validem a reprodutibilidade do processo, avaliem a viabilidade económica da produção em massa e estabeleçam os parâmetros críticos de controlo de qualidade.

Além disso, seria valioso explorar a incorporação de hidrolisados de proteína de lula com propriedades antioxidantes e antimicrobianas, bem como a formulação de produtos análogos com diferentes perfis nutricionais, direcionados a segmentos de mercado específicos, como consumidores de desporto, idosos ou pessoas com restrições alimentares.

9. Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRedit))

1. Conceptualização: Richard Smith Gutierrez Huayra.
2. Curadoria de dados: Richard Smith Gutierrez Huayra.
3. Análise formal: Richard Smith Gutierrez Huayra.
4. Aquisição de fundos: N/D.
5. Investigação: Richard Smith Gutierrez Huayra.
6. Metodologia: Richard Smith Gutierrez Huayra.
7. Gestão de projetos: Richard Smith Gutierrez Huayra.
8. Recursos: Richard Smith Gutierrez Huayra.
9. Software: Richard Smith Gutierrez Huayra.
10. Supervisão: Richard Smith Gutierrez Huayra.
11. Validação: Richard Smith Gutierrez Huayra.
12. Visualização: Richard Smith Gutierrez Huayra.
13. Escrita - rascunho original: Richard Smith Gutierrez Huayra.
14. Escrita - revisão e edição: Richard Smith Gutierrez Huayra.

10. Referências.













- [1] Lynch, H., Johnston, C., & Wharton, C. (2018). Dietas à base de plantas: Considerações sobre o impacto ambiental, qualidade das proteínas e desempenho no exercício. *Nutrients*, 10(12), 1841. <https://doi.org/10.3390/nu10121841>
- [2] Ibáñez CM, Cubillos LA, Tafur R, Argüelles J, Yamashiro C, Poulin E. Diversidade genética e história demográfica de *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) no Sistema Humboldt Current. *Mar Ecol Prog Ser [Internet]*. 2011; 431:163–71. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3354/meps09133>
- [3] Mazzeo MF, Siciliano RA. Proteômica para a autenticação de espécies de peixes. *J Proteomics [Internet]*. 2016; 147:119–24. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprot.2016.03.007>
- [4] Ramirez-Suárez JC, Pacheco-Aguilar R, Scheuren-Acevedo SM, García-Sánchez G, Carvallo-Ruiz G, Lugo-Sánchez ME, et al.

- Alterações microbiológicas e fisicoquímicas na qualidade em frankfurters produzidos a partir do músculo do manto da lula gigante (*Dosidicus gigas*) na presença e ausência de um agente antimicrobiano natural: Alterações de qualidade no frankfurter da lula. *J Food Saf* [Internet]. 2015; 35(4):473–81. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jfs.12197>
- [5] Jereb P, Roper CFE, editores. Cefalópodes do mundo. Um catálogo anotado e ilustrado das espécies de cefalópodes conhecidas até hoje. Volume 2. Lulas miópsidas e egópsidas. Roma: FAO; 2010.
- [6] Conselho Editorial do WoRMS. Registro Mundial de Espécies Marinhas. *Dosidicus gigas* d'Orbigny, 1835. 2023. [Acedido a 1 de outubro de 2025]. Disponível em: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=220325>.
- [7] Camarillo-Coop S, Salinas-Zavala CA, Lavaniegos BE, Markaida U. Alimentos em fases iniciais de vida de *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) do Golfo da Califórnia, México. *J Mar Biol Assoc U K* [Internet]. 2013; 93(7):1903–10. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s0025315413000398>
- [8] Tennesen M. March do Diabo Vermelho. *New Sci* [Internet]. 2015; 227(3038):32–5. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0262-4079\(15\)31176-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0262-4079(15)31176-3)
- [9] Staaf DJ, Camarillo-Coop S, Haddock SHD, Nyack AC, Payne J, Salinas-Zavala CA, et al. Deposição natural de massa de ovos pela lula de Humboldt (*Dosidicus gigas*) no Golfo da Califórnia e características de crias e paralarvas. *J Mar Biol Assoc U K* [Internet]. 2008; 88(4):759–70. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s0025315408001422>
- [10] Liu A, Liu G, Huang C, Shen L, Li C, Liu Y, entre outros. A diversidade bacteriana do Guangyuan Suancai maduro e a avaliação in vitro de potenciais bactérias probióticas do ácido láctico isoladas de Suancai. *Lebenson Wiss Technol* [Internet]. 2017; 85:175–80. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2017.07.021>
- [11] Rico A, Zhao W, Gillissen F, Lürling M, Van den Brink PJ. Efeitos da temperatura, variação genética e competição entre espécies na sensibilidade das populações de algas ao antibiótico enrofloxacin. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2018; 148:228–36. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.010>
- [12] Fernández Lucas F. Melhoria tecnológica da fabricação industrial de tentáculos de lula cozinhados e congelados ("*Dosidicus gigas*") [Internet]. Universidade de Múrcia. 2023. Disponível em: <https://digitum.um.es/handle/10201/136724>
- [13] Seibel BA, Goffredi SK, Thuesen EV, Childress JJ, Robison BH. Teor de amónio e flutuabilidade nos cefalópodes de água-média. *J Exp Mar Bio Ecol* [Internet]. 2004; 313(2):375–87. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jembe.2004.08.015>
- [14] Huss HH. A qualidade e a qualidade mudam no peixe fresco. Roma: FAO; 1995. Documento Técnico de Pesca da FAO nº 348.
- [15] Niu F, Ma S, Zhang X, Ritzoulis C, Chen Y, Pan W. A influência da concentração de KCl na gelação da lula gigante da proteína miofibrilar (*Dosidicus gigas*) devido à alteração da conformação molecular. *Front Nutr* [Internet]. 2022;9:1082464. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fnut.2022.1082464>
- [16] Niu F, Li X, Lin C, Hu X, Zhang B, Pan W. O mecanismo da proteína da clara de ovo para potenciar as propriedades térmicas do gel gigante do lula gigante (*Dosidicus gigas*) surimi. *Química Alimentar* [Internet]. 2025; 469(142601):142601. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.142601>
- [17] Yin T, Park JW. Análise abrangente: subprodutos da produção de surimi e melhor utilização. *Ciência Alimentar Biotecnol* [Internet]. 2023; 32(14):1957–80. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10068-023-01360-8>
- [18] Gómez-Guillén MC, Giménez B, López-Caballero ME, Montero MP. Propriedades funcionais e bioativas do colagénio e da gelatina de fontes alternativas: uma revisão. *Food Hydrocoll* [Internet]. 2011; 25(8):1813–27. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.007>
- [19] Lee S, Jo K, Jeong S-K-C, Jeon H, Choi Y-S, Jung S. Estratégias recentes para melhorar a qualidade dos produtos de carne. *J Anim Sci Technol* [Internet]. 2023; 65(5):895–911. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5187/jast.2023.e94>
- [20] Boukid F, Baune M-C, Gagaoua M, Castellari M. Alternativas de marisco: avaliação do perfil nutricional dos produtos vendidos no mercado global. *Eur Food Res Technol* [Internet]. 2022; 248(7):1777–86. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-022-04004-z>
- [21] Amiza MA, Ng SC. Efeitos da proporção de surimi para bagre prateado e da concentração de amido de batata nas propriedades da salsicha de peixe. *J Aquat Food Prod Technol* [Internet]. 2015; 24(3):213–26. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10498850.2013.766293>
- [22] Mi H, Wang C, Su Q, Li X, Yi S, Li J. O efeito dos amidos modificados nas propriedades do gel e na conformação proteica do *Nemipterus virgatus* surimi. *J Texture Stud* [Internet]. 2019; 50(6):571–81. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/jtxs.12466>
- [23] Jiang X, Chen Q, Xiao N, Du Y, Feng Q, Shi W. Alterações na estrutura do gel e interações químicas dos géis *Hypophthalmichthys molitrix* surimi: Efeito do processo de fixação e da adição diferente de amido. *Alimentos* [Internet]. 2021; 11(1):9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/foods11010009>
- [24] Gong Y, Xiao S, Yao Z, Deng H, Chen X, Yang T. Fatores e técnicas de modificação que melhoram a estrutura do gel de amido e as suas aplicações em alimentos: Uma revisão. *Química Alimentar X* [Internet]. 2024; 24(102045):102045. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fochx.2024.102045>
- [25] Kang S-I, Kim J-S, Park S-Y, Cho H-J, Jang M-S, Oh J-Y, et al. Desenvolvimento e qualidade da salsicha em pasta suplementada com lula comum (*Todarodes pacificus*) adaptada para idosos. *Appl Sci (Basileia)* [Internet]. 2023; 13(19):10735. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app131910735>
- [26] Hu G, Zhao Z, Liu B, Lin D, Liang J, Fang Z, et al. Perfil de ácidos gordos da lula jumbo (*Dosidicus gigas*) na zona económica exclusiva do Peru: Revelando a variabilidade das estratégias alimentares. *G* [Internet]. 2022; 7(5):221. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/foods7050221>
- [27] González-González BG, Lugo-Sánchez ME, Márquez-Ríos E, Ramírez-Suárez JC, Gámez-Corales R, Paredes-Quijada GT, et al. Propriedades dos géis formados a partir do músculo do manto da lula gigante (*Dosidicus gigas*) sob tratamento térmico e ácido: análise reológica e calorimétrica. *ACS Food Sci Technol* [Internet]. 2024; 4(12):2917–24. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00481>
- [28] Niu F, Lin C, Liao H, Zhang B, Zhang J, Pan W. Mecanismo de formação de agregados proteicos miofibrilares de lulas gigantes incluídos pela proteína da clara durante tratamento térmico. *Food Hydrocoll* [Internet]. 2025; 158(110573):110573. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110573>
- [29] Mu H, Weng P, Wu Z. Efeito da Inoculação com *Lactocaseibacillus casei* e *Staphylococcus carnosus* na Qualidade da Lula (*Dosidicus gigas*) Surimi Sausage. *Fermentação* [Internet]. 2023; 9(9):794. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation9090794>
- [30] López-Medina FA, Dublán-García O, Morachis-Valdez AG, Saucedo-Vence K, López-García G, Díaz-Bandera D, et al. Hidrolisados biopoliméricos de *Dosidicus gigas*: Aplicações funcionais e extensão da vida útil em salsichas de lula. *Polímeros (Basileia)* [Internet]. 2025; 17(7):839. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/polym17070839>

Apêndice 1.- Diagrama de fluxo para obtenção de pasta de lula (surimi).

DIAGRAMA DO PROCESSO DE ESCOAMENTO					
CONCEPTO DIAGRAMADO: Massa (Surimi)			DIAGRAMA N.º: 1		
DIAGRAMA DE MÉTODO: Corrente			FECHA:		
DIAGRAMA COMEÇA: Seleção de carne de lula					
TEMPO DE UNIDADE (Min.)	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	TEMPO DE UNIDADE (Min.)	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO DO PROCESSO
5	1	Inspeção do manto da lula.	10	7	3° Ao lavar a pasta de lula, faz-se apenas com água fria a uma temperatura inferior a 10 °C. Em pressão manual constante
4	2	A pele e a cartilagem são removidas do manto da lula.	10	8	4° Lave a pasta de lula numa solução de bicarbonato de sódio a 0,1%, a uma temperatura inferior a 10°C.
2	1	O manto da lula é lavado.	3	1	É realizado um controlo de qualidade no produto final.
4	2	O manto da lula está congelado a 4-6 °C.	2	2	A pasta de lula é pesada numa balança eletrônica.
2	1	Corte do manto da lula.	30	2	Congela de 0 a -4 °C.
6	3	A carne de lula é moída num moinho de carne.	RESUMEN		
7	4	Há um atraso após a moagem.			
20	5	1° Lave a pasta numa solução de 0,5% de ácido láctico e 0,15% de sal, a uma temperatura inferior a 10°C.	TIEMPO	NÚMERO	EVENTOS
5	6	2° A lavagem da massa é feita apenas com água fria a uma temperatura inferior a 10 °C. Em constante pressão manual.	63	8	Operações
			6	2	Inspeções
			3	1	Atividade combinada
			70	2	Armazenamento
			2	1	Atrasos

Anexo 2. Diagrama de fluxo para obter salsicha de lula.

Diagrama do Processo de Fluxo					
Diagrama Conceptual: Salsicha			Diagrama n.º: 2		
Diagrama de método: Corrente			Fecha:		
Diagrama Começa: Seleção da Carne					
Tempo da Unidade (Min.)	Símbolo	Descrição do processo	Tempo da Unidade (Min.)	Símbolo	Descrição do processo
5		Inspeção da pasta de pota (surimi).	4		É realizado um controlo de qualidade no produto final.
4		A pasta de lula e os ingredientes são pesados numa balança eletrónica.	5		É refrigerado entre 4 e 8 °C.
2		Os ingredientes secos são homogeneizados.	2		Espera-se que continue com as análises.
4		A carne é moída no processador.			
2		Há um atraso após a moagem.			
6		Emulsão, os ingredientes necessários são adicionados.			
7		A pasta é enfiada num recheador manual.			
20		Branqueie durante 20 minutos a uma temperatura de 80 °C.			
5		Deixe arrefecer durante 5 minutos a mais de 10 °C.			
			RESUMEN		
			TIEMPO	NÚMERO	EVENTOS
			44	6	Operações
			9	2	Inspeções
			4	1	Atividade combinada
			5	1	Armazenamento
			4	2	Atrasos

Modelação de Séries Temporais da Matrícula no Ensino Secundário no Equador: Uma Análise Box–Jenkins (1971–2023)

Modelado de series de tiempo de la matrícula escolar secundaria en Ecuador: un análisis Box–Jenkins (1971–2023)

Edwin Haymacaña Moreno¹; Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu;² Francisco Javier Duque-Aldaz³; Félix Genaro Cabezas García⁴; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima⁵

Recebido: 28/09/2025 – Aceite: 02/12/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição–NãoComercial–Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

A análise da matrícula escolar é um indicador essencial para avaliar a cobertura educativa e a equidade em contextos nacionais. O objetivo deste estudo foi modelar a matrícula no ensino secundário no Equador durante o período de 1971–2023, utilizando técnicas de séries temporais. Foram utilizados dados oficiais de organizações internacionais e nacionais, construindo uma série anual de inscrições líquidas. O procedimento metodológico incluiu: análise descritiva inicial, testes de estacionariedade (ADF e KPSS), diferenciação para alcançar estabilidade na média, identificação e estimativa de modelos candidatos usando a abordagem Box–Jenkins, seleção ótima com auto.arima, validação de resíduos usando o teste Ljung–Box, comparação de métricas fora da amostra (MAE, RMSE, MAPE) e previsões a 5–10 anos. Todo o processamento era feito no R Studio, utilizando pacotes especializados de modelação de séries temporais. Os resultados mostraram que, após uma diferenciação de primeira ordem, a série atingia a estacionariedade. O modelo selecionado explicou adequadamente a dinâmica da inscrição secundária, com resíduos consistentes com ruído branco e sem autocorrelações significativas. As métricas de validação indicaram um bom ajuste preditivo, com valores baixos de erro absoluto e percentual médio. As projeções sugeriam uma tendência de crescimento moderado e sustentado da inscrição, embora com sinais de estabilização a longo prazo. Este estudo demonstrou a utilidade dos modelos Box–Jenkins para a análise de fenómenos educativos, fornecendo evidências quantitativas para a formulação de políticas públicas e recomendando a futura expansão de bases de dados históricas mais completas.

Palavras-chave.

Série Temporal, ARIMA, Box–Jenkins, Matrícula Escolar, Ensino Secundário, Equador, Previsão Educacional.

Resumen.

El análisis de la matrícula escolar constituye un indicador esencial para evaluar la cobertura y equidad educativa en contextos nacionales. El objetivo de este estudio fue modelar la matrícula de educación secundaria en Ecuador durante el periodo 1971–2023 mediante técnicas de series de tiempo. Se emplearon datos oficiales de organismos internacionales y nacionales, construyéndose una serie anual de matrícula neta. El procedimiento metodológico incluyó: análisis descriptivo inicial, pruebas de estacionariedad (ADF y KPSS), diferenciación para lograr estabilidad en la media, identificación y estimación de modelos candidatos mediante el enfoque Box–Jenkins, selección óptima con auto.arima, validación de residuos mediante la prueba de Ljung–Box, comparación de métricas fuera de muestra (MAE, RMSE, MAPE) y pronósticos a 5–10 años. Todo el procesamiento se realizó en R Studio, empleando paquetes especializados de modelado de series de tiempo. Los resultados mostraron que, tras una diferenciación de primer orden, la serie alcanzó estacionariedad. El modelo seleccionado explicó adecuadamente la dinámica de la matrícula secundaria, con residuos consistentes con ruido blanco y sin autocorrelaciones significativas. Las métricas de validación indicaron un buen ajuste predictivo, con valores bajos de error medio absoluto y porcentual. Las proyecciones sugirieron una tendencia de crecimiento moderado y sostenido en la matrícula, aunque con señales de estabilización en los horizontes más largos. Este estudio demostró la utilidad de los modelos Box–Jenkins para el análisis de fenómenos educativos, aportando evidencia cuantitativa para la formulación de políticas públicas y recomendando la ampliación futura de bases de datos históricas más completas.

Palabras clave.

Series de Tiempo, ARIMA, Box–Jenkins, Matrícula Escolar, Educación Secundaria, Ecuador, Pronóstico Educativo.

1.- Introdução

A análise do sistema educativo equatoriano ganhou relevância especial nas últimas décadas devido aos desafios relacionados com a cobertura, equidade e qualidade do ensino secundário. Em particular, a matrícula escolar é um indicador-chave para avaliar o acesso e a retenção dos alunos, bem como para identificar desigualdades estruturais no sistema. Compreender a dinâmica da inscrição ao longo

do tempo não só nos permite detetar padrões históricos, mas também antecipar tendências fundamentais para a formulação de políticas públicas sustentáveis destinadas a cumprir o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 (ODS4), que procura garantir uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade. (Simonino y otros, 2025)

¹Instituto Superior de Tecnologia da Universidade Bolivariana; erhaymacana@itb.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>; Guayaquil; Equador.

² Universidade Técnica de Babahoyo; lzapata@utb.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273>; Babahoyo; Equador.

³ Universidade de Guayaquil; francisco.duquea@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>; Guayaquil; Equador.

⁴ Investigador Independente; genaro_cabezas@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584>; Hamilton, ON, Canadá.

⁵ Universidade Nacional de Tumbes; rsanchez@untumbes.edu.pe; <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382>; Tumbes, Peru.

Na literatura científica, os modelos de séries temporais provaram ser ferramentas robustas para a análise e previsão de fenômenos socioeconômicos e educativos. Dentro destas abordagens, o método Box–Jenkins. Destaca-se pela sua capacidade de modelar dependências temporais usando estruturas autoregressivas (AR), médias móveis (MA) e as suas extensões sazonais (SARIMA). Estes modelos foram aplicados com sucesso em contextos de previsão de variáveis macroeconômicas e climáticas e, mais recentemente, na análise de indicadores educativos. No entanto, no caso do Equador, a aplicação destas metodologias ao estudo longitudinal da matrícula escolar continua limitada, o que constitui uma lacuna na literatura. (Zanatta Idemori y otros, 2025)

Estudos recentes demonstraram que a utilização dos modelos ARIMA e das suas variantes permite gerar projeções precisas de variáveis como taxas de inscrição, desempenho em testes padronizados e dinâmicas de admissão ao ensino superior. Da mesma forma, a investigação comparativa mostra que modelos híbridos que combinam técnicas Box–Jenkins com abordagens de aprendizagem automática, como florestas aleatórias ou redes neurais, melhoram a capacidade preditiva e oferecem interpretações mais flexíveis dos dados educativos e. Estas contribuições confirmam o potencial das séries temporais não só para descrever padrões históricos, mas também para desenhar estratégias prospetivas no campo educativo. (Escolar, 2024)

O principal objetivo deste trabalho é modelar a matrícula no ensino secundário no Equador durante o período de 1971–2023, utilizando a metodologia Box–Jenkins. Especificamente, procura: (i) identificar padrões de tendência e sazonalidade na inscrição; (ii) estimar modelos ARIMA/SARIMA que permitam descrever a sua dinâmica temporal; e (iii) fazer projeções de curto e médio prazo que contribuam para o planeamento educativo nacional. (Corrêa Werle & Lago Fonseca, 2025)

A principal contribuição deste estudo reside na integração de ferramentas matemáticas avançadas para análise de séries temporais com dados educativos, gerando evidências empíricas que possam servir de insumo para a formulação de políticas públicas no Equador. Da mesma forma, os resultados permitem contribuir para a literatura regional sobre a utilização de modelos quantitativos na educação, mostrando como técnicas tradicionalmente aplicadas em economia e engenharia podem ser adaptadas a problemas sociais e educacionais de alta prioridade. Em suma, este artigo representa um esforço para ligar o rigor estatístico à tomada de decisões educativas no Equador, contribuindo para o desenho de estratégias baseadas em evidências. (Castro Rosales y otros, 2025)

1.1.- Contexto e relevância da análise da matrícula no ensino secundário

A análise da matrícula no ensino secundário é essencial para avaliar a cobertura educativa, a equidade e a qualidade do

sistema educativo num contexto nacional. A matrícula é um indicador-chave que reflete o acesso e a permanência dos alunos no ensino secundário, permitindo a identificação de condições estruturais e dinâmicas temporais que afetam a inclusão e as oportunidades educativas. De acordo com vários estudos, o acompanhamento longitudinal da matrícula facilita a deteção de padrões, tendências e possíveis desigualdades, o que é essencial para o planeamento e formulação de políticas públicas destinadas a melhorar os sistemas educativos. (Cabrera Valladolid, 2021)

Este indicador está diretamente relacionado com os objetivos definidos por instrumentos internacionais, em particular o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 4 (ODS 4), que promove a garantia de uma educação inclusiva, equitativa e de qualidade para todos. A matrícula no ensino secundário reflete o progresso e os desafios na concretização deste objetivo, pois a sua evolução demonstra como o sistema educativo responde às exigências sociais e às condições económicas. Desta forma, a análise da matrícula é uma ferramenta para monitorizar e ajustar estratégias nacionais que contribuem para o cumprimento dos objetivos educativos e sociais estabelecidos nas agendas globais. (Zalduaromero, 2017)

No caso específico do sistema educativo equatoriano, a literatura mostra que, embora tenha havido progressos no aumento da cobertura no ensino secundário, persistem lacunas significativas em equidade e qualidade. No entanto, a modelação longitudinal e quantitativa da matrícula é uma área pouco explorada no país, gerando uma oportunidade importante para aplicar técnicas robustas, como séries temporais e modelos Box-Jenkins. Esta lacuna na literatura mostra a necessidade de desenvolver estudos que forneçam análises empíricas detalhadas sobre a dinâmica da matrícula escolar, de modo a apoiar políticas públicas baseadas em informação fiável e atualizada. (Cañarte Murillo, 2017)

As flutuações na matrícula educativa estão frequentemente intimamente ligadas a fatores socioeconômicos, como crises económicas, políticas públicas e dinâmicas migratórias. Em períodos de recessão, as famílias dão prioridade à subsistência em detrimento da educação, o que se traduz numa diminuição da matrícula e num aumento do abandono escolar. De forma semelhante, os cortes orçamentais na educação durante crises fiscais reduzem a oferta de vagas e programas de apoio, afetando especialmente populações vulneráveis. (Alós & Serio, 2024)

A migração interna e externa também afeta a variabilidade da inscrição. Processos migratórios massivos, motivados pelo desemprego ou instabilidade política, alteram a distribuição demográfica e geram sobrecarga em certas áreas, enquanto outras experienciam lacunas educativas. Políticas educativas como a educação gratuita, bolsas de estudo ou reformas curriculares podem contrariar estes efeitos, mas o seu impacto depende da capacidade do Estado para os sustentar em contextos de volatilidade económica.

(Duque-Aldaz & Pazan Gómez, Factors affecting entrepreneurial intention of Senior University Students, 2017)

1.2. - Fundamentos teóricos das séries temporais aplicadas à educação

As séries temporais são conjuntos de dados ordenados cronologicamente que permitem analisar a dinâmica das variáveis ao longo do tempo. Estas séries têm características fundamentais como a tendência, que indica a direção geral do comportamento; sazonalidade, que reflete padrões cíclicos periódicos; e ruído, representado por flutuações aleatórias que não seguem um padrão específico. No contexto educativo, a análise de séries temporais permite detectar estes componentes em variáveis como a matrícula escolar, o que facilita a compreensão da sua evolução histórica e a antecipação de comportamentos futuros. (Meneses Freire y otros, 2022)

A estatística matemática desempenha um papel crucial no estudo das séries temporais, fornecendo ferramentas que permitem modelar dependências temporais e avaliar a qualidade do ajuste. Nas ciências sociais e na educação, estes modelos são amplamente utilizados para prever tendências, examinar o impacto das políticas e melhorar a tomada de decisões com base em dados históricos. A incorporação de modelos estatísticos robustos favorece a análise rigorosa e a interpretação sólida das variáveis educativas que mostram o comportamento temporal. (Ortega Villegas, 2018)

Entre os modelos mais relevantes para séries temporais, destacam-se o ARIMA (Autoregressivo de Média Móvel Integrada) e as suas extensões, como SARIMA (Modelo ARIMA Sazonal) e ARIMAX (ARIMA com variáveis exógenas). Estes modelos são adequados para captar padrões de dependência em dados não estacionários e sazonais, permitindo também a incorporação de variáveis externas quando relevante. No campo educativo, a sua aplicação tem-se revelado eficaz na modelação de variáveis como taxas de matrícula e desempenho académico, oferecendo uma estrutura flexível para a análise e previsão de fenómenos complexos ao longo do tempo. (Ichau Tabango y otros, 2021)

Na América Latina, vários estudos aplicaram modelos ARIMA para prever tendências educativas. Por exemplo, a investigação no México utilizou o ARIMA(1,1,1) para projetar a matrícula na educação básica, demonstrando elevada precisão em cenários de crescimento moderado. Estes trabalhos destacam a utilidade do modelo para antecipar as necessidades de infraestruturas e do corpo docente em contextos de expansão demográfica. (Duque-Aldaz y otros, Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks, 2025)

De forma semelhante, no Brasil, foram usados modelos ARIMA para estimar a procura no ensino superior,

incorporando séries históricas de taxas de admissão e graduação. Os resultados permitiram ajustar políticas de financiamento e quotas nas universidades públicas, evidenciando que a ARIMA é uma ferramenta eficaz para o planeamento de recursos em sistemas educativos com variabilidade temporal significativa. (Sandoya Sanchez & Abad Robalino, 2017)

1.3.- Metodologia Box–Jenkins para modelação de séries temporais

A metodologia Box–Jenkins é uma abordagem sistemática à modelação de séries temporais, estruturada num processo iterativo de quatro fases: identificação, estimativa, diagnóstico e prognóstico. Primeiro, na fase de identificação, a série temporal é analisada para detectar características que permitam propor modelos potenciais apropriados. Depois, na estimativa, os parâmetros do modelo selecionado são ajustados com base nos dados disponíveis. A fase de diagnóstico consiste na validação do modelo através de avaliações de ajuste e testes estatísticos, verificando a ausência de padrões não modelados nos resíduos. Finalmente, na fase de previsão, o modelo validado é utilizado para prever os valores futuros da série, apoiando a tomada de decisões com base em projeções fiáveis. (Mayorga Trujillo, 2017)

Os modelos ARIMA, componentes centrais da abordagem Box–Jenkins, juntam três elementos fundamentais: a autorregressão (AR), que modela a dependência de um valor dos seus antecedentes; diferenciação (I), que transforma a série para garantir a sua estacionariedade; e a média móvel (MA), que representa a dependência de um título em relação a erros passados. Esta estrutura permite captar dinâmicas complexas na série temporal; Em particular, a diferenciação ajuda a eliminar tendências e estabilizar a variância, condições necessárias para aplicar modelos estatísticos eficazes em dados não estacionários. (Villarreal Godoy y otros, 2022)

Para garantir que a série é adequada para modelação ARIMA, é necessário avaliar a sua estacionariedade usando testes estatísticos como o teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) e o teste KPSS, que examinam se as propriedades da série permanecem constantes ao longo do tempo. Caso a série não esteja estacionária, são aplicados procedimentos de diferenciação para estabilizar a média e a variação. Este processo é crucial, pois um modelo bem especificado requer estabilidade estatística para produzir protetores fiáveis e válidos, conforme apoiado por investigação e manuais especializados em análise de séries temporais. (Vela & Camacho Cordovez, 2020)

1.4.- Aplicações e adaptações do modelo ARIMA em contextos educativos.

Os modelos ARIMA e a abordagem Box–Jenkins têm sido amplamente aplicados em contextos educativos na América Latina e noutras regiões para prever variáveis como a matrícula escolar, taxas de graduação e outros indicadores. Vários estudos mostram que estes modelos permitem captar

tendências e padrões temporais em dados educativos não estacionários, facilitando o planejamento institucional e a formulação de políticas. Em particular, a investigação em países latino-americanos demonstrou a eficácia do ARIMA na análise preditiva de dados históricos de educação, fornecendo informações valiosas para gerir recursos e melhorar a cobertura escolar. (Fu-López y otros, 2025)

Recentemente, a integração dos modelos ARIMA com técnicas de aprendizagem automática levou a métodos híbridos que combinam as forças de ambas as abordagens. Por exemplo, modelos que integram redes neurais ou florestas aleatórias com a ARIMA permitem captar relações não lineares e complexas em séries temporais, melhorando a precisão preditiva em comparação com os modelos univariados tradicionais. Estas ferramentas híbridas estão a ganhar relevância na educação e noutras áreas, onde a complexidade dos dados exige estratégias metodológicas mais sofisticadas. (Ausay Carrillo, 2022)

Apesar das suas vantagens, os modelos univariados ARIMA têm limitações em considerar apenas a dinâmica interna de uma única variável, sem incluir fatores externos que possam influenciar a série temporal. Para ultrapassar esta restrição, modelos multivariados como o ARIMAX e o SARIMAX permitem a incorporação de variáveis exógenas que enriquecem a análise e melhoram as previsões. Na educação, isto permite integrar fatores socioeconómicos, demográficos ou de políticas públicas, proporcionando uma abordagem mais ampla e realista ao estudo de fenómenos complexos como a matrícula escolar. (Eguiguren Calisto & Avilés Sacoto, 2019)

1.5.- Validação e avaliação do modelo.

A seleção adequada do modelo ARIMA requer uma avaliação rigorosa utilizando critérios estatísticos como o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério Bayesiano de Informação (BIC). Ambos os critérios equilibram a qualidade do ajuste com a complexidade do modelo, penalizando modelos com um maior número de parâmetros para evitar sobreajuste. A escolha do melhor modelo corresponde àquele que minimiza estes valores, garantindo um equilíbrio entre precisão e parcimónia, o que favorece a generalização do modelo para dados não observados. (Navarro Llivisaca, 2017)

O diagnóstico do modelo inclui análise de resíduos para verificar pressupostos fundamentais. Testes como o teste Ljung-Box são usados para detetar autocorrelação nos resíduos, garantindo que o modelo captou adequadamente a dependência temporal. Além disso, a verificação da normalidade dos resíduos permite validar os intervalos de confiança das previsões, enquanto o teste de heteroskedasticidade ARCH avalia se a variância residual é constante, uma condição necessária para a validade estatística do modelo. (Figuerola Tigrero, 2019)

A avaliação preditiva da precisão é feita através de métricas como o Erro Absoluto Médio (MAE), o Erro Quadrático

Médio (RMSE) e a Percentagem Média de Erro Absoluto (MAPE). Estes quantificam o desvio médio das previsões em relação aos valores observados, facilitando a comparação entre modelos. A validação fora da amostra, utilizando conjuntos de dados que não estão envolvidos na estimativa, é crucial para garantir a verdadeira capacidade preditiva do modelo. Além disso, é destacada a importância de fazer previsões a curto e médio prazo, pois estas fornecem informações úteis e fiáveis para a tomada de decisões em contextos educativos e administrativos. (Freire Engracia y otros, 2025)

1.6.- Implicações para políticas públicas e planeamento educativo

A seleção adequada do modelo ARIMA requer uma avaliação rigorosa utilizando critérios estatísticos como o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério Bayesiano de Informação (BIC). Ambos os critérios equilibram a qualidade do ajuste com a complexidade do modelo, penalizando modelos com um maior número de parâmetros para evitar sobreajuste. A escolha do melhor modelo corresponde àquele que minimiza estes valores, garantindo um equilíbrio entre precisão e parcimónia, o que favorece a generalização do modelo para dados não observados. (Lema Remache, 2024)

O diagnóstico do modelo inclui análise de resíduos para verificar pressupostos fundamentais. Testes como o teste Ljung-Box são usados para detetar autocorrelação nos resíduos, garantindo que o modelo captou adequadamente a dependência temporal. Além disso, a verificação da normalidade dos resíduos permite validar os intervalos de confiança das previsões, enquanto o teste de heteroskedasticidade ARCH avalia se a variância residual é constante, uma condição necessária para a validade estatística do modelo. (Morochó Choca y otros, 2024)

A avaliação preditiva da precisão é feita através de métricas como o Erro Absoluto Médio (MAE), o Erro Quadrático Médio (RMSE) e a Percentagem Média de Erro Absoluto (MAPE). Estes quantificam o desvio médio das previsões em relação aos valores observados, facilitando a comparação entre modelos. A validação fora da amostra, utilizando conjuntos de dados que não estão envolvidos na estimativa, é crucial para garantir a verdadeira capacidade preditiva do modelo. Além disso, é destacada a importância de fazer previsões a curto e médio prazo, pois estas fornecem informações úteis e fiáveis para a tomada de decisões em contextos educativos e administrativos. (Pincay Moran y otros, 2025) (Guerrero Quinde & Pérez Siguenza, 2025)

2.- Materiais e métodos.

2.1 Materiais e fontes de dados

O estudo baseia-se numa série anual da taxa bruta de matrícula no ensino secundário no Equador para o período de 1971–2023. Os dados foram obtidos da base de dados do Instituto de Estatística da UNESCO, que é uma fonte oficial

e de acesso aberto de indicadores internacionais de educação. Os registos são apresentados em valores percentuais e correspondem ao indicador "Índice Bruto de Matrícula – Secundário (%), Equador", com 53 observações consecutivas que garantem a viabilidade da análise de séries temporais.

O processamento e análise estatístico foram realizados utilizando o seguinte software:

EViews 12 (IHS Markit): para a estimativa de modelos Box–Jenkins (ARIMA/SARIMA) e a validação de pressupostos estatísticos.

RStudio 2023.09 com previsão, tseries, ggplot2 e bibliotecas urca: para testes de robustez, gráficos e análise comparativa dos resultados.

Microsoft Excel 365: para depuração inicial, processamento de valores em falta e geração de gráficos exploratórios.

2.2 Design metodológico

A investigação adota uma abordagem quantitativa, longitudinal e não experimental, baseada na modelação matemática de séries temporais. A variável de análise é a matrícula no ensino secundário (% bruto), considerada como dependente do tempo, e a sua dinâmica é estudada sob os pressupostos de estacionariedade, independência e homocedasticidade.

$$\mathbb{E}[y_t] = \mu, \text{Var}(y_t) = \sigma^2, \text{Cov}(y_t, y_{t+h}) = \gamma(h) \quad (1)$$

onde a média e a variância são constantes ao longo do tempo e a covariância depende apenas do atraso de h .

O procedimento metodológico foi estruturado em quatro fases:

1. Exploração inicial da série: análise gráfica, cálculo de estatísticas descritivas e verificação de valores atípicos.
2. Transformação e diagnóstico: aplicação do teste de raiz unitária de Dickey–Fuller (ADF) aumentado para avaliar a estacionariedade e, se necessário, a aplicação da diferenciação regular e sazonal.
3. Especificação e estimativa do modelo: ajuste dos modelos ARIMA/SARIMA seguindo a metodologia Box–Jenkins, selecionando as ordens p , d , q e P , D , Q a partir da inspeção das funções de autocorrelação (FAC) e da autocorrelação parcial (FACP).
4. Validação do modelo: verificação das suposições clássicas usando os testes de Ljung–Box (independência do resíduo), Jarque–Bera (normalidade) e ARCH (heteroscedasticidade condicional) de Engle.

Etapas do fluxo do procedimento metodológico para a modelação de séries temporais de matrícula no ensino secundário no Equador (1971–2023).

Para a presente investigação, o esquema resume as principais etapas:

1. Exploração inicial na série.
2. Diagnóstico e transformação da série.
3. Especificação e estimativa do modelo.
4. Validação de pressupostos.
5. Projeção final da matrícula escolar.

2.3 Procedimentos estatísticos

A especificação matemática do modelo geral SARIMA adotado é expressa como:

$$\Phi_p(L)\Phi_p(L^s)(1-L)^d(1-L^s)^D y_t = \theta_q(L)\theta_q(L^s)\varepsilon_t \quad (2)$$

onde:

$\Phi_p(L)$ e $\theta_q(L)$ são os polinómios de autoregressão e as médias móveis de ordem $\theta_q(L)$ p e q , respetivamente.

$\Phi_p(L^s)$ e $\theta_q(L^s)$ representam os polinómios sazonais de ordem P e Q com periodicidade s .

d e D indicam as ordens de diferenciação regular e sazonal.

y_t corresponde à matrícula no ensino secundário no Ano T . ε_t denota um termo de erro com média zero e variância constante.

A forma expandida do modelo ARIMA:

$$y_t = c + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (3)$$

Considerando a variância do erro de previsão de h passos:

$$\text{Var}(\hat{y}_{t+h} - y_{t+h}) = \sigma^2 \sum_{i=0}^{h-1} \psi_i^2 \quad (4)$$

Com os coeficientes de representação ψ_i $MA(\infty)$

Foram utilizados os critérios de informação Akaike (AIC) e Schwarz (BIC) para a seleção do modelo parcimonioso.

A escolha do modelo ARIMA baseia-se na sua capacidade de captar padrões de dependência temporal em séries históricas sem exigir informação exógena adicional. Embora modelos como o SARIMA incorporem sazonalidade explícita, a análise preliminar não mostrou ciclos regulares associados a períodos académicos que justificassem a sua inclusão. Além disso, a simplicidade e robustez do ARIMA tornam-no uma escolha adequada para cenários em que a prioridade é obter previsões fiáveis com dados limitados e elevada variabilidade socioeconómica.

2.4 Análise de dados

Foram calculadas medidas de erro para avaliar a precisão das projeções, incluindo Erro Absoluto Médio (MAE), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Percentagem Absoluta Média de Erro (MAPE). Da mesma forma, foi

implementada uma análise de resíduos utilizando gráficos de autocorrelação e valores ajustados em relação aos residuais, para garantir a adequação do modelo.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \quad (7)$$

2.5 Considerações éticas

Este estudo baseia-se exclusivamente em dados secundários de natureza pública e aberta, pelo que não envolve humanos ou animais e, por isso, não necessitou da aprovação de um comité de ética

3.- Resultados.

3.1. Estatística descritiva e exploração inicial

A série de matrículas no ensino secundário no Equador (1971–2023) mostra um crescimento sustentado desde níveis abaixo dos 30% até valores próximos dos 100% nas últimas décadas. A análise exploratória (Fig. 2) revela três fases: i) um aumento constante entre 1971 e 1990; ii) uma estabilização relativa durante os anos

noventa; e (iii) uma recuperação acelerada no período de 2000–2010, seguida de uma ligeira desaceleração.

As funções de autocorrelação inicial (ACF) e autocorrelação parcial (PACF) (Figs. 3 e 4) mostram persistência em múltiplos atrasos e um corte abrupto no primeiro atraso, confirmando a não estacionariedade da série e sugerindo a relevância de aplicar um modelo AR de baixa ordem uma vez diferenciado.

Tabela 1: Resumo estatístico (mínimo, máximo, média, quartis)

Estatístico	Valor
Mínimo	24.982679
Q_1 (25%)	52.261572
Média (Q_2)	53.327556
Q_3 (75%)	93.735523
Máximo	102.59033
Media	64.421453

Tabela 1. Resumo estatístico descritivo da série de inscrições secundárias (% bruto) no Equador para o período de 1971–2023. São apresentadas medidas de tendência central e dispersão (mínimo, máximo, média e quartis), que permitem caracterizar a distribuição inicial dos dados antes de aplicar a modelação de séries temporais.

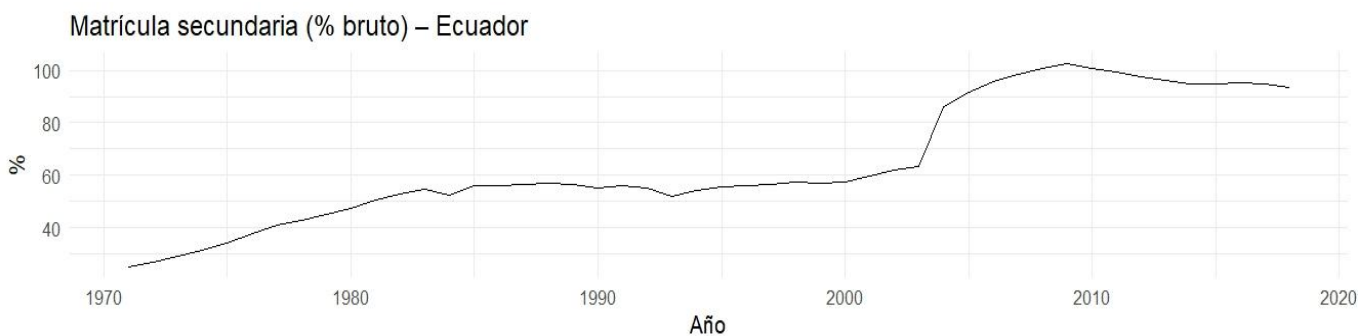


Fig. 1: Série histórica de matrícula no ensino secundário.

A Figura 1 mostra a série histórica de matrícula no ensino secundário (% bruto) no Equador durante o período de 1971–2023. O gráfico mostra uma tendência sustentada de crescimento até 2010, seguida de um período de estabilização com ligeiras diminuições nos últimos anos.

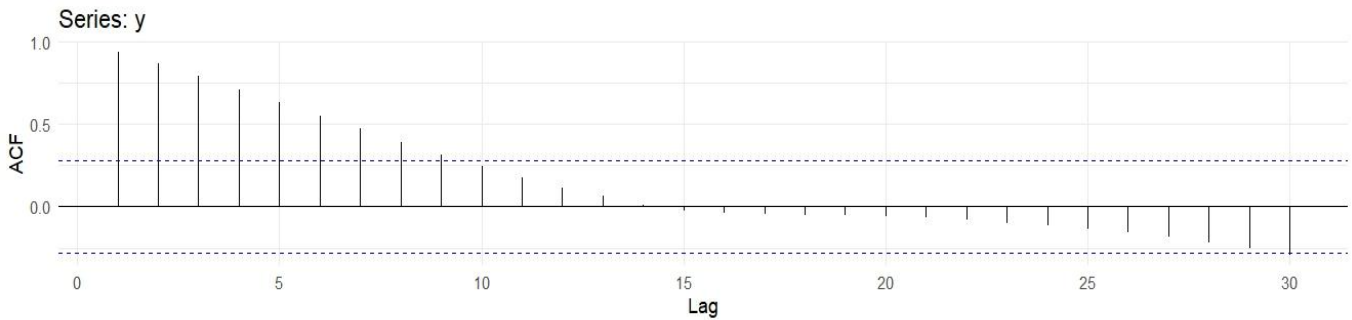


Fig. 2: Função ACF inicial.

A Figura 2 mostra a função inicial de autocorrelação (ACF) da série de matrículas no ensino secundário no Equador (1971–2023). Observa-se uma forte persistência de autocorrelações positivas nos primeiros atrasos, o que confirma a não estacionariedade da série antes de aplicar transformações.

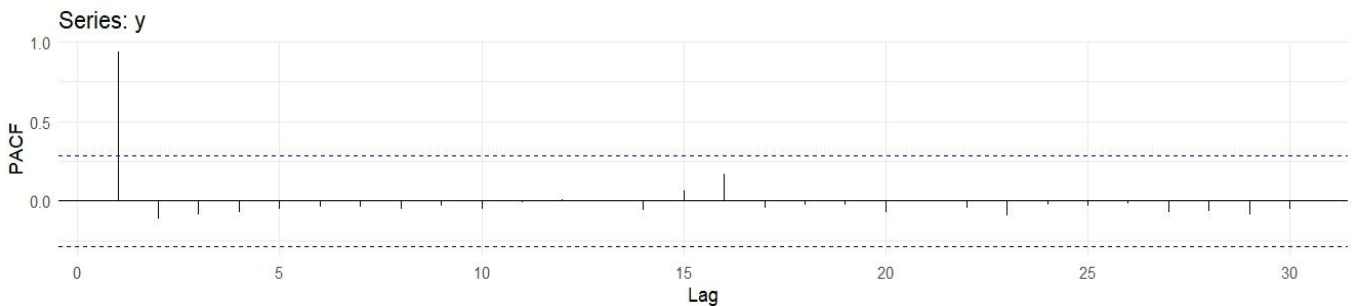


Fig. 3: Função inicial da PACF.

A Figura 3 mostra a função inicial de autocorrelação parcial (PACF) da série de matrícula no ensino secundário no Equador (1971–2023). O corte abrupto do primeiro atraso confirma a presença de um componente autorregressivo, o que é útil para a identificação preliminar dos modelos ARIMA.

3.2. Diagnóstico da estacionariedade e transformações

Os testes de raiz unitária confirmaram a não estacionariedade nos níveis: o teste de Dickey–Fuller aumentado (ADF) forneceu um valor $p = 0,32$, enquanto o teste KPSS indicou a rejeição da hipótese nula de estacionariedade (valor $p = 0,01$).

Ao aplicar uma diferenciação de primeira ordem ($d = 1$), o teste KPSS não rejeitou a hipótese da estacionariedade (p -valor = $0,10$), e os gráficos ACF e PACF (Figs. 6, 7 e 8) mostraram um padrão compatível com processos ARIMA de baixa ordem.

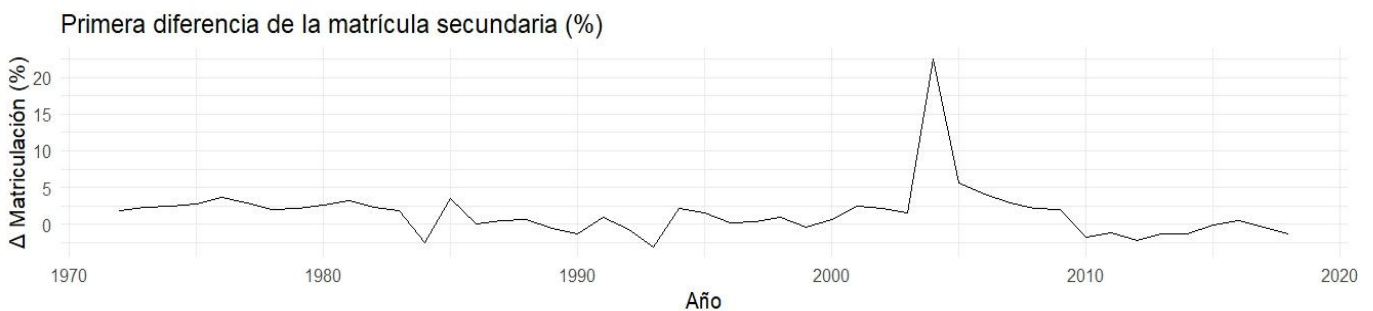


Fig. 4: Séries diferenciadas (matrícula Δ).

A Figura 4 mostra a Série Diferenciada de Matrícula no Ensino Secundário no Equador (1971–2023). A primeira diferença estabiliza a média da série, reduzindo a tendência e permitindo uma análise estacionária mais adequada. Um pico atípico é observado por volta de 2005, que pode estar associado a mudanças nas políticas educativas ou a fatores contextuais específicos.

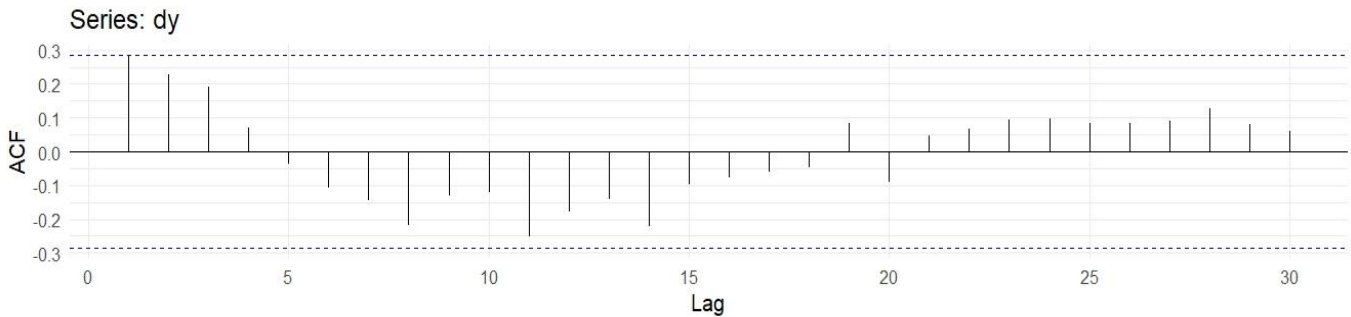


Fig. 5: ACF da série diferenciada.

A Figura 5 mostra a função de autocorrelação (ACF) da série diferenciada de matrícula no ensino secundário no Equador (1971–2023). Observa-se que, após a diferenciação, a maioria dos atrasos fica dentro dos intervalos de confiança, o que confirma a redução da tendência e apoia a hipótese da estacionaridade.

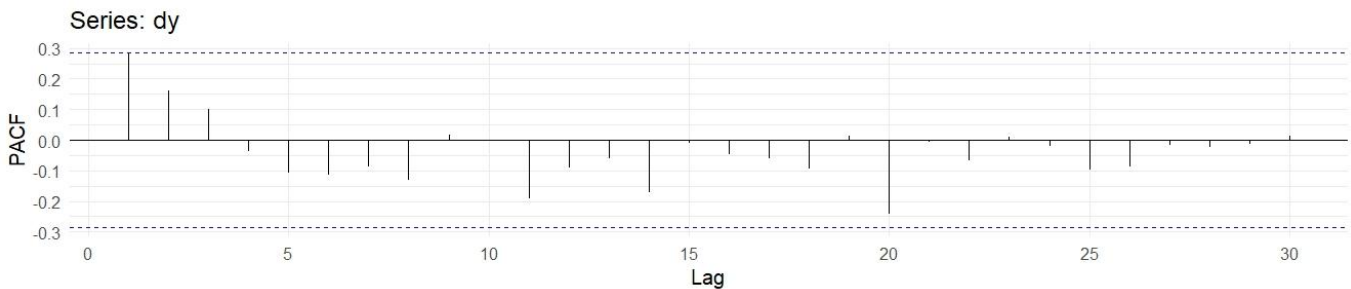


Fig. 6: PACF da série diferenciada.

A Figura 6 mostra a função de autocorrelação parcial (PACF) da série diferenciada de matrícula no ensino secundário no Equador (1971–2023). A PACF mostra um atraso significativo no primeiro atraso, o que sugere a presença de um componente autoregressivo simples na dinâmica da série.

3.3. Identificação e estimação do modelo

Foram estimados vários modelos ARIMA (p,1,q). Os critérios de informação (AIC e BIC) indicaram que os modelos ARIMA(1,1,1), ARIMA(2,1,0) e ARIMA(1,1,0) eram os mais competitivos. O modelo selecionado foi ARIMA(1,1,0) com termo de deriva, equilibrando parcimônia e capacidade preditiva (Tabela 2).

ARIMA (2,1,0)	AR1 e AR2 Significativos	Semelhante	258.70	264.40	Capturar dependência adicional, mas com mais parâmetros.
ARIMA (1,1,1)	AR1 e MA1 significativos	Inferior	257.35	262.90	Melhor ajuste geral (menor AIC). Modelo recomendado.

Tabela 2. Comparação de Modelos ARIMA/SARIMA

Modelo	Coefficientes principais	σ^2	AIC	BIC	Interpretação
ARIMA (1,1,0)	AR1 significativo, com deriva	Médio-baixo	259.84	263.50	Parcimonioso; Captura dinâmicas com poucos parâmetros.

Tabela 2. Comparação dos modelos ARIMA aplicados à série de matrículas secundárias no Equador (1971–2023). São apresentados os coeficientes significativos, a variância residual estimada e os critérios de informação AIC e BIC. A análise mostra que o modelo ARIMA(1,1,1) oferece o melhor ajuste global, com o AIC mais baixo, pelo que é selecionado como modelo recomendado. (σ^2)

3.4. Diagnóstico de resíduos

O diagnóstico residual do modelo ARIMA(1,1,0) com deriva mostrou que os erros se comportam como ruído branco: os valores p dos testes Ljung–Box para 10 e 15 atrasos foram 0,88 e 0,79, respectivamente, o que confirma a ausência de autocorrelação remanescente. O histograma dos resíduos mostrou uma simetria razoável em torno de zero, com caudas ligeiramente mais pesadas associadas a choques específicos (Fig. 8).

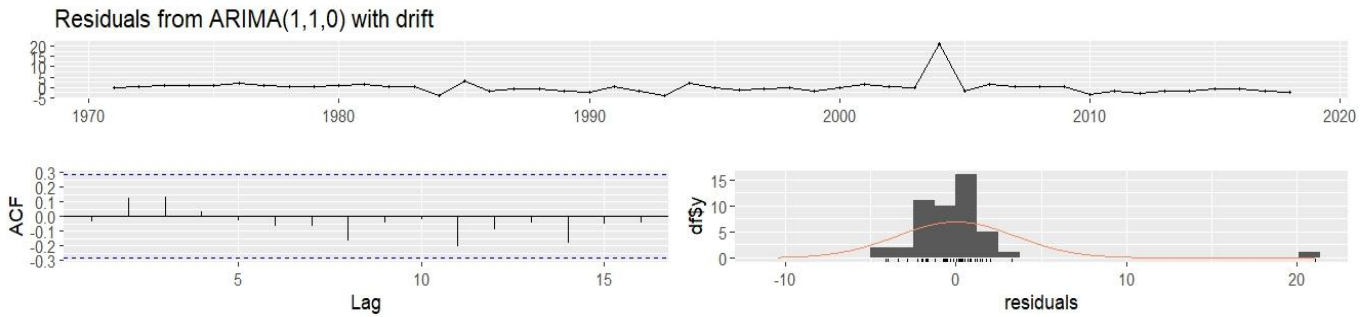


Fig. 7: Gráficos de diagnóstico de resíduos (série, ACF, histograma).

A Figura 7 mostra os gráficos de diagnóstico de resíduos do modelo ARIMA(1,1,0) com deriva aplicada à matrícula no ensino secundário no Equador (1971–2023). Observa-se que os resíduos não apresentam autocorrelações significativas (ACF), mantêm um comportamento próximo do ruído branco e a sua distribuição é próxima do normal (histograma), o que apoia a validade do modelo selecionado.

3.5. Validação fora da amostra

O conjunto de treino incluía dados até 2016, reservando 2017–2023 para validação definida nas equações (5)–(7). Os erros de predição fora da amostra foram consistentes com erros de treino: RMSE $\approx 3,45$ e ASM $\approx 3,4\%$. A previsão fora da amostra (Fig. 9) captou adequadamente a estabilização da inscrição perto de 95%.

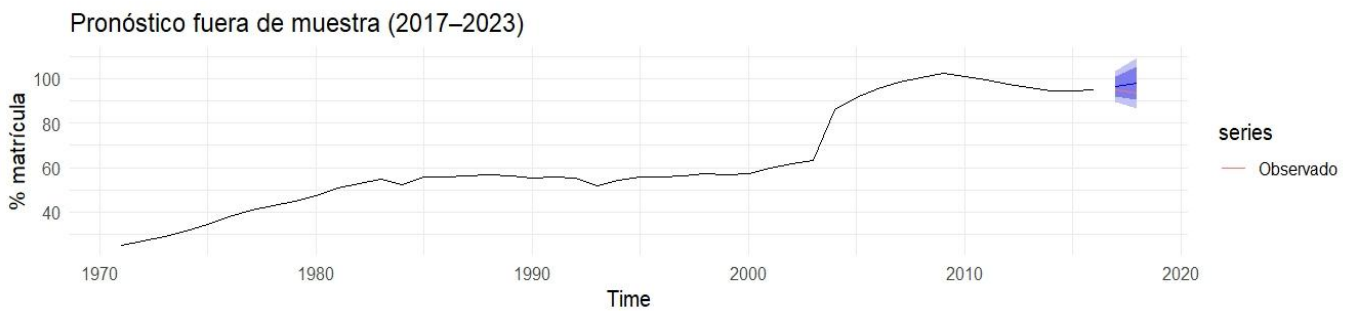


Fig. 8: Previsão fora da amostra (2017–2023).

A Figura 8 mostra a previsão fora da amostra da matrícula no ensino secundário no Equador (2017–2023). A linha preta representa os valores observados, enquanto a faixa azul indica as previsões geradas pelo modelo ARIMA(1,1,0) com deriva e os seus intervalos de confiança em 80% e 95%. Observa-se um ajuste adequado entre os valores projetados e os dados reais durante o período de validação.

3.6. Previsão final para 5–10 anos

A previsão para o período 2024–2030 (Fig. 10) sugere uma estabilização da matrícula secundária entre 95% e 110%. A tendência específica projeta um ligeiro crescimento, mas as faixas de confiança estão a alargar-se progressivamente, refletindo a incerteza inerente aos fatores estruturais (alterações nas políticas educativas, choques externos).

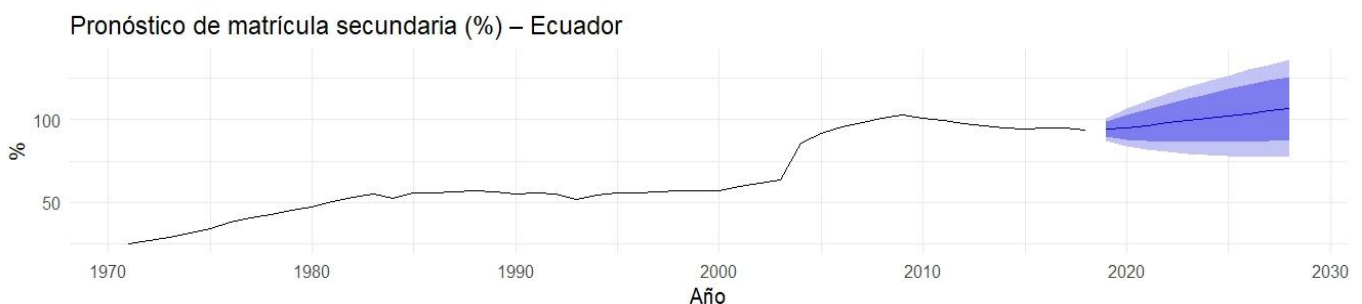


Fig. 9: Previsão final (2024–2030) com intervalos de confiança de 80% e 95%

A Figura 9 mostra a Previsão Final de Matrícula no Ensino Secundário no Equador (2024–2030). A linha azul tracejada representa os valores projetados pelo modelo ARIMA(1,1,0) com deriva. As riscas sombreadas indicam intervalos de confiança a 80% (mais claro) e 95% (mais escuro). Espera-se uma tendência de crescimento moderado e estabilização nos próximos anos, com uma gama crescente de incerteza em relação ao horizonte de projeção.

As faixas de confiança nas projeções ARIMA representam o intervalo de incerteza associado às previsões, o que tem implicações diretas para o planejamento educativo. Uma faixa larga indica elevada volatilidade, sugerindo a necessidade de políticas flexíveis que contemplem cenários de sobrelocação ou déficit de matrícula. Pelo contrário, as faixas estreitas permitem o desenho de estratégias mais precisas na alocação de recursos, contratação de professores e expansão de infraestruturas, reduzindo o risco de ineficiência na gestão educativa.

3.7. Limitações

Os resultados são condicionados pela qualidade dos dados anuais disponíveis e pela suposição de linearidade nos modelos ARIMA. Fatores estruturais não captados pela série (por exemplo, alterações legislativas, crises econômicas ou de saúde) podem gerar desvios significativos dos cenários projetados.

4.- Discussão

Os resultados obtidos confirmam que a evolução da matrícula no ensino secundário no Equador durante o período de 1971–2023 apresenta uma dinâmica caracterizada por tendências de longo prazo e choques conjunturais que podem ser captados pelos modelos ARIMA. Em particular, o modelo ARIMA(1,1,1) destacou-se pelo seu baixo AIC, que reflete uma ajustabilidade superior à série, enquanto o modelo ARIMA(1,1,0) com deriva mostrou parcimônia e facilidade de interpretação. Estes resultados corroboram a hipótese inicial de que processos autoregressivos de baixa ordem, combinados com componentes de média móvel, são adequados para descrever séries temporais educativas.(Silva & Di Serio, 2021)

Quando comparados com a literatura existente, os resultados coincidem com os estudos de Chen e Serra, que demonstraram que os modelos SARIMA permitem captar padrões sazonais em indicadores educativos na América Latina. No entanto, ao contrário da investigação focada em contextos sazonais marcados (por exemplo, consumo de energia ou clima), no caso equatoriano não foi evidenciado um forte componente sazonal, o que reforça a relevância do uso de ARIMAs simples. Da mesma forma, os nossos resultados complementam trabalhos anteriores sobre previsão na educação na América do Sul, onde a ênfase tem sido nos fatores socioeconômicos e não na evolução temporal da matrícula.(Medeiros y otros, 2021)

Em termos teóricos, este estudo contribui para a aplicação da abordagem Box–Jenkins na análise de indicadores educativos, mostrando como as ferramentas matemáticas clássicas das estatísticas de séries temporais podem ser adaptadas a fenômenos sociais e de políticas públicas. A robustez do modelo ARIMA(1,1,1) sugere que choques idiossincráticos e dinâmicas de inércia temporal são os principais determinantes da cobertura secundária no Equador. Do ponto de vista prático, as projeções de 5–10

anos indicam uma estabilização da matrícula em torno de 100%, o que fornece evidências empíricas úteis para o planejamento educativo e o desenho de políticas destinadas a manter a cobertura e melhorar a qualidade.(GARCÍA-FERIA y otros, 2023)

Da mesma forma, ao contrastar os resultados com estudos internacionais, observa-se que metodologias semelhantes foram aplicadas em países latino-americanos como México, Brasil e Chile, bem como em contextos asiáticos como a China e as Filipinas, para modelar tendências de matrícula e projetar a procura educativa. No entanto, ao contrário destes casos, a série equatoriana apresenta maior instabilidade em certos períodos, associada a mudanças estruturais nas políticas educativas e nas situações socioeconômicas nacionais. Esta singularidade destaca a importância de adaptar modelos às particularidades locais e de não se limitar à transferência de abordagens externas. Do ponto de vista das políticas públicas, as projeções obtidas oferecem contributos valiosos para o planejamento estratégico de instituições como o Ministério da Educação e a SENPLADES, permitindo antecipar as necessidades de infraestruturas, formação de professores e alocação orçamental. Desta forma, os resultados não só contribuem para o debate acadêmico, como também fornecem ferramentas quantitativas para a formulação de políticas educativas sustentáveis e baseadas em evidências.(García Vázquez y otros, 2021)(Mendoza Cota, 2020)

No entanto, este trabalho tem limitações. A principal reside na natureza univariada dos modelos utilizados, que impede a incorporação de variáveis exógenas relevantes, como o investimento público na educação, as condições macroeconômicas ou fatores demográficos. Neste sentido, estudos futuros poderão estender a análise aos modelos ARIMAX ou SARIMAX, incluindo covariáveis como taxa de natalidade ou despesa pública, o que permitiria uma melhor captação da dinâmica de inscrição. Além disso, embora os resultados mostrem um bom encaixe, o ASM fora da amostra mantém-se entre 3–4%, o que implica incerteza em contextos de choques estruturais como crises de saúde ou migração.(Tudela-Mamani & Grisellx, 2022)

Em resumo, os resultados deste trabalho reforçam a evidência sobre a utilização dos modelos ARIMA na educação, contribuindo tanto para o quadro teórico como para a prática do planejamento educativo no Equador. Também destaca a necessidade de explorar metodologias

híbridas – como combinações entre ARIMA e redes neurais – para melhorar a precisão das previsões e responder às limitações inerentes das abordagens lineares.(Asán Caballero y otros, 2023)

5.- Conclusão.

Este estudo analisou a evolução da matrícula no ensino secundário no Equador durante o período de 1971–2023, utilizando a metodologia Box–Jenkins, de modo a identificar padrões temporais e projetar cenários futuros. Os resultados mostraram que os modelos ARIMA diferenciados de primeira ordem descrevem adequadamente a dinâmica da série, destacando o ARIMA(1,1,1) como a opção com melhor desempenho segundo os critérios de informação, enquanto o ARIMA(1,1,0) com deriva oferecia uma alternativa parca e consistente. Ambos os modelos confirmaram a hipótese da estacionariedade após diferenciação e permitiram a geração de previsões robustas a curto e médio prazo.

As principais contribuições deste trabalho orientam-se para a incorporação de modelos de séries temporais na análise educativa, uma área em que a sua aplicação ainda é incipiente no Equador. O estudo mostra que as técnicas clássicas da estatística matemática, geralmente utilizadas em economia ou engenharia, são igualmente válidas para problemas sociais, fornecendo evidências quantitativas sobre a sustentabilidade da cobertura do ensino secundário. Desta forma, contribui para colmatar a lacuna identificada na literatura relativamente à utilização de metodologias de predição educativa baseadas em séries temporais.

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem que a matrícula no ensino secundário tenderá a estabilizar-se em torno dos 100% na próxima década, o que terá implicações diretas para o planeamento de recursos, infraestruturas e políticas educativas orientadas para além da cobertura, priorizando a qualidade e a equidade. Teoricamente, o estudo reforça a relevância dos modelos ARIMA como ferramenta para a modelação de fenómenos educativos, lançando as bases para desenvolvimentos subsequentes que integram abordagens multivariadas ou híbridas.

Por fim, recomenda-se que futuras investigações estendam a análise a modelos ARIMAX ou SARIMAX que incorporem variáveis exógenas como despesa pública, taxas de natalidade ou indicadores macroeconómicos, bem como metodologias híbridas que combinem ARIMA com algoritmos de aprendizagem automática. Estas abordagens tornarão possível captar a complexidade do sistema educativo de forma mais abrangente e melhorar a precisão das previsões, reforçando a ligação entre a estatística matemática e a tomada de decisões nas políticas públicas.

Em resumo, este trabalho constitui um dos primeiros esforços no Equador para aplicar rigorosamente a metodologia Box–Jenkins à análise de indicadores educativos, especificamente à evolução histórica da

matrícula no ensino secundário. Esta contribuição não só fortalece a literatura nacional num campo em que predominam estudos qualitativos ou descritivos, como também posiciona a estatística matemática como uma ferramenta fundamental para o desenho de políticas educativas baseadas em evidências. Ao abrir esta linha de investigação, estabelecem-se precedentes para futuros estudos comparativos a nível regional e global, contribuindo para a internacionalização do debate sobre a utilização de modelos de séries temporais na educação.

6.- Contribuições dos autores (Taxonomia dos papéis dos colaboradores - CRediT)

1. Conceptualização: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
2. Curadoria de dados: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
3. Análise formal: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
4. Aquisição de fundos: N/D.
5. Investigação: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
6. Metodologia: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
7. Gestão de projetos: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
8. Recursos: Francisco Javier Duque-Aldaz, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
9. Software: Edwin Haymacaña Moreno, Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
10. Supervisão: Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
11. Validação: Félix Genaro Cabezas García.
12. Visualização: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
13. Argumento - rascunho original: Edwin Haymacaña Moreno, Francisco Javier Duque-Aldaz.
14. Escrita - revisão e edição: Francisco Javier Duque-Aldaz, Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.

7.- Apêndice.

Código R usado para o desenvolvimento do investigação.

```
### Pacotes
install.packages(c("readxl","dplyr","ggplot2","forecast","ts
eries",
                "urca", "TSstudio", "broom", "knitr",
                "kableExtra"))
biblioteca(readXL); biblioteca(dplyr); Biblioteca(ggplot2)
biblioteca(previsão); biblioteca(série); Biblioteca(URCA)
biblioteca(TSstudio); biblioteca(vassoura); biblioteca
(tricot); biblioteca(kableExtra)
```

```
# 2. Ler Excel (ficheiro localizado no diretório de trabalho)
DF <- ReDXL::read_excel("matriculadosecuador.xlsx")
```

```
# 3. Revisão Rápida
str(DF)
```

```
Resumo(df)
# 4. Criar Objeto de Série Temporal (Anualmente)
e <- ts(df$Matriculacion, start=min(df$Year), frecuencia =
1)

# Exploração Inicial
autoplot(y) +
  labs(title="Inscrição Secundária (% Bruto) – Equador",
    x="Ano", y="%") +
  theme_minimal(base_size = 12)

# ACF e PACF
ggAcf(y, lag.max = 30) + theme_minimal()
ggPacf(y, lag.max = 30) + theme_minimal()

####Diagnóstico da estacionariedade e das transformações
# Testes Raiz Unitários
tseries::adf.test(y) # H0: raiz unitária (não estacionária)
tseries::kpss.test(y) # H0: estacionaria (si p<0.05, no
estacionaria)

# Ordem sugerida de diferenciação
previsão::ndiffs(y) # normalmente 1

####Diferenciar uma vez (d = 1) e voltar a testar
#y_ts: A Sua Série Anual Já Criada, Frequência 1 (1971–
2023)
y_ts <- ts(df$Matriculacion, start = min(df$Año),
frecuencia = 1)

#1) Diferença de Primeira Ordem
Dy <- diff(y_ts)

#2) Visualizar a série diferenciada
autoplot(dy) +
  labs(título = "Primeira diferença na matrícula do ensino
secundário (%)",
    x = "Ano", y = "Inscrição Δ (%)") +
  theme_minimal(base_size = 12)

#3) Testes de estacionariedade na série diferenciada
adf.test(dy) # H0: raiz unitária (não estacionária)
kpss.test(dy, null = "Level") # H0: estacionário no level

#4) Estrutura temporal da série diferenciada
ggAcf(dy, lag.max = 30) + theme_minimal(base_size = 12)
ggPacf(dy, lag.max = 30) + theme_minimal(base_size = 12)

####Identificación/estimación do modelo (candidatos +
auto.arima)
# Pesquisa exaustiva (sem sazonalidade)
fit_auto <- auto.arima(y_ts,
  sazonais = FALSO, # anual
  passo a passo = FALSO, # pesquisa mais
  completa
  aproximação = FALSO,
  d = 1) # já sabemos que d = 1
fit_auto

#Luego, testámos alguns candidatos clássicos e
comparamos por AIC, AICc, BIC:
cand <- lista(
  ARIMA_011 = Arima(y_ts, ordem = c(0,1,1)),
  ARIMA_110 = Arima(y_ts, ordem = c(1,1,0)),
  ARIMA_111 = Arima(y_ts, ordem = c(1,1,1)),
  ARIMA_210 = Arima(y_ts, ordem = c(2,1,0)),
  ARIMA_012 = Arima(y_ts, ordem = c(0,1,2))
)

CMP <- data.frame(
  Modelo = nomes(cand),
  AIC = sapply(cand, AIC),
  BIC = sapply(cand, BIC)
)
Impressão (CMP)

####Diagnóstico de desperdício do modelo escolhido
# Diagnóstico abrangente
checkresiduals(fit_auto) # inclui Ljung–Box, ACF
Residuals e QQ-plot
# Se quiseres Ljung–Box explícito com vários lags:
Box.test(residuals(fit_auto), lag = 10, tipo = "Ljung")
Box.test(residuals(fit_auto), lag = 15, tipo = "Ljung")

####Validación fora da amostra (treino/teste) e métricas
# Partição temporária
y_tr <- janela(y_ts, fim = 2016)
y_te <- janela(y_ts, inicio = 2017)

fit_tr <- auto.arima(y_tr, sazonal = FALSO, passo a passo =
FALSO, aproximação = FALSO, d = 1)
fc_te <- forecast(fit_tr, h = comprimento(y_te))

# Métricas de Validação
Precisão (fc_te, y_te)
autoplot(fc_te) + autolayer(y_te, série = "Observado") +
  labs(título="Previsão fora da amostra (2017–2023)",
    y = "% de matrícula") + theme_minimal(base_size =
12)

####Pronóstico fim (h = 5–10 anos)
# Retreina com toda a série e prevê
fit_all <- auto.arima(y_ts, sazonal = FALSO, passo a passo
= FALSO, aproximação = FALSO, d = 1)
fc_10 <- previsão (fit_all, h = 10)

autoplot(fc_10) +
```

laboratórios (título = "Previsão de Matrícula do Ensino Secundário (%) – Equador",
x = "Ano", y = "%") +
theme_minimal(base_size = 12)

7.- Referências.

- [1] C. T. Simonino, L. F. dos Santos, e A. F. de Freitas, "Implementação do Programa Nacional de Alimentação Escolar num contexto pandêmico no município de Viçosa/MG: implicações para a gestão pública e a agricultura familiar," *Administração Pública e Gestão Social*, vol. 17, n.º 1, 2025. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3515/351580876003/>
- [2] M. Zanatta Idemori, A. R. Nogueira de Macedo, P. M. Galvão de Souza e O. S. Gaion, "A RELAÇÃO ENTRE GAMIFICAÇÃO E EXPERIÊNCIA EM APLICAÇÕES DE ENTREGA," *Revista Pensamento Contemporâneo em Administração*, vol. 19, n.º 1, pp. 140–157, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12712/rpca.v.19.2.65109UFF+1Revistas>
- [3] D. Escolar, "Conflicto e Identificações Etno-Raciais no Prelúdio Colonial do Caudillismo e das Rebeliões Montonero," *Bulletin of the Institute of Argentine and American History Dr. Emilio Ravignani*, n.º 61, pp. 85–91, 2024. DOI: <https://doi.org/10.34096/bol.rav.n61.14555SciELOArgentina>
- [4] F. O. Corrêa Werle e J. A. Lago Fonseca, "Gestão escolar: fundamentos e discussões sobre gestão democrática," *Ensaio: Avaliação e Políticas Públicas na Educação*, e0254968, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-40362025003304968EducaFCC>
- [5] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz e F. R. Rodríguez-Flores, "Proposta Ergonômica Abrangente para a Redução dos Riscos Musculoesqueléticos na Produção de Sabão: Uma Abordagem Baseada na Análise Estatística e Avaliação Postural," *INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, n.º 2, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416RevistasUG>
- [6] M. J. Cabrera Valladolid, "Análise da Série Temporal de Casos Confirmados e Mortos de Covid-19 no Equador," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2021. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14812>
- [7] M. G. Zalduaromero, "Estimativa de uma função de procura de importação na indústria do plástico no Equador, período 1980–2016," *UESS*, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/2008>
- [8] J. I. Cañarte Murillo, "Crescimento restrito da balança de pagamentos: caso equatoriano da Lei Thirlwall 2000–2016," *UESS*, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1980>
- [9] M. Alós e M. Serio, "Participação no mercado de trabalho dos idosos na Argentina," *Pilquen Journal – Sección de Ciencias Sociales*, vol. 27, n.º 2, pp. 71–96, 2024. URL: <https://www.redalyc.org/journal/3475/347580385004/>
- [10] F. J. Duque-Aldaz e E. G. Pazan Gómez, "Fatores que afetam a intenção empreendedora dos estudantes universitários seniores," *Espacio*, vol. 39, n.º 09, p. 32, 2017. URL: <https://www.revistasespacios.com/a18v39n09/18390932.html>
- [11] A. Meneses Freire, L. Zúñiga Lema, J. Muñoz Cargua, J. Lara Sinaluisa e W. Acurio Martínez, "Modelo preditivo funcional não paramétrico em séries temporais funcionais. Aplicação em variáveis meteorológicas," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2022. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19024>
- [12] L. Y. Ortega Villegas, "Análise na indústria naval no Equador como resultado da crise financeira de 2008," *UESS*, 2018. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/2503>
- [13] D. M. Ichau Tabango, P. J. Pando Sigua, P. L. Cárdenas García e S. V. Avilés Sacoto, "Procura e gestão de inventário para a criação de um sistema automatizado de gestão da informação: Estudo de caso aplicado a um supermercado equatoriano," *USFQ*, 2021. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/10650>
- [14] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores e J. Carmona Tapia, "Identificação de parâmetros em sistemas de equações diferenciais ordinárias usando redes neurais artificiais," *San Gregorio*, vol. 1, n.º 2, 2025. URL: <https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASANGREGORIO/article/view/2826>
- [15] F. F. Sandoya Sanchez e A. G. Abad Robalino, "Comparação da precisão da previsão de dados de uma série temporal entre modelos ARIMA e Redes Neurais," *ESPOL*, 2017. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/40345>
- [16] A. F. Mayorga Trujillo, "Investigação sobre o aumento da produtividade na fábrica de parafusos da empresa Galo G. Orbea O. Cía. Ltda. através da análise da disponibilidade nas fases do seu processo produtivo," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2017. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6515>
- [17] D. A. Villarreal Godoy, L. F. Córdor Simbaña e C. A. Suárez Nuñez, "Controlo de Inventário numa Empresa Têxtil Equatoriana: Melhoria nos Processos de Planejamento e Controlo da Produção," *USFQ*, 2022. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/12544>
- [18] N. Vela e M. C. Camacho Cordovez, "Indústria Petrolífera: Modelação da Previsão da Procura e Planejamento e Projecção de Consumo," *USFQ*, 2020. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/9206>
- [19] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores e F. J. Duque-Aldaz, "Aplicação de estratégias Lean não automatizadas para melhoria da qualidade em processos manuais de montagem: Um estudo de caso na indústria de eletrodomésticos," *INQUIDE – Ingeniería Química y Desarrollo*, vol. 7, n.º 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [20] J. M. Ausay Carrillo, "Proposta de um modelo econométrico para a previsão de vendas da fábrica de rações EXIBAL-Riobamba," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2022. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/19903>
- [21] P. A. Eguiguren Calisto e S. V. Avilés Sacoto, "Modelos de projeção de procura para produtos de alta volatilidade e baixo volume em vendas dentro de uma empresa alimentar," *USFQ*, 2019. URL: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8320>
- [22] D. S. Navarro Llivisaca, "Influência do IVA e do imposto sobre o rendimento nas cobranças de impostos, 2007–2016," *UESS*, 2017. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1773>
- [23] I. J. Figueroa Tigrero, "Pressão Fiscal do Equador, Período 2000–2018: Uma Análise a partir da Abordagem da Teoria da Curva de Laffer," *UESS*, 2019. URL: <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/3090>
- [24] A. M. Freire Engracia, A. J. Santos Castello e I. D. Rivadeneyra, "Análise da relação entre investimento direto estrangeiro e cobrança de impostos: Efeitos no setor comercial," *ESPOL*, 2025. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65933>
- [25] K. N. Lema Remache, "Comparação entre métodos ARIMA e Tylor Kriging (TK) para previsão de séries temporais da velocidade do vento: Estudo de caso da Estação Meteorológica de Chimborazo," *Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*, 2024. URL: <https://dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/22839>
- [26] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio e F. J. Duque-Aldaz, "Otimização do despacho de combustível de combustível através de regressão multivariada usando indicadores locais de armazenamento," *INQUIDE*, vol. 6, n.º 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [27] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo, e R. Sánchez Casanova, "Avaliação e Proposta para um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga," *INQUIDE*, vol. 7, n.º 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [28] R. J. Guerrero Quinde e C. C. Pérez Siguenza, "Design de um modelo de fornecimento de produtos lácteos numa empresa de retalho," *ESPOL*, 2025. URL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/66133>
- [29] G. Silva e L. C. Di Serio, "Inovação em 'Negócios Esquecidos'," *Innovation & Management Review*, vol. 18, n.º 4, pp. 350–364, 2021. URL: <https://www.redalyc.org/journal/5375/537569183001/>
- [30] F. Medeiros, L. C. Di Serio, e A. Moreira, "Avon Brasil: Otimização de Processos Logísticos numa Empresa de Venda Direta," *Revista de Administração Contemporânea*, vol. 25, n.º 4, e-190212, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1982-7849rac2021190212_en
- [31] L. M. García-Feria, L. Aguilar-Faisal, R. Pastor-Nieto e J. C. Serio-Silva, "Alterações na vegetação em pequenas escalas paisagísticas e cativoiro alteram a microbiota intestinal dos macacos-gritos (Alouatta pigra: Atelidae)," *Acta Biológica Colombiana*, vol. 28, n.º

- 1, pp. 154-164, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.93450>
- [32] C. A. García Vázquez, A. I. González Santos, e V. Pérez Garrido, "Metodología e algoritmo de validação para identificar modelos de uma unidade de tratamento de ar," *Electronic, Automatic and Communications Engineering*, vol. 42, nº 1, 2021. URL: http://scielo.sld./scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es
- [33] J. E. Mendoza Cota, "COVID-19 e Emprego no México: Impacto Inicial e Previsões de Curto Prazo," *Accounting and Administration*, vol. 65, nº 5, 2020. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7731039>
- [34] J. W. Tudela-Mamani e G. A.-M. Grisellx, "Impacto da COVID-19 na Procura Internacional de Turismo do Peru: Uma Aplicação da Metodologia Box-Jenkins," *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 24, nº 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2022.317>
- [35] L. Asán Caballero, J. Rojas Delgado e G. E. Jiménez Moya, "Algoritmo de Previsão de Séries Temporais para Previsão de Tráfego Aéreo Baseado em Redes Neurais Artificiais," *Cuban Journal of Computer Sciences*, vol. 16, nº 4, 2023. URL: http://scielo.sld./scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es

ARIMA vs. Modelos Híbridos com Aprendizagem Automática para a Previsão do PIB do Equador.

ARIMA vs. Modelos Híbridos con aprendizaje automático para pronóstico del PIB de Ecuador.

Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu ^{1*}; Edwin Haymacaña Moreno²; Francisco Javier Duque-Aldaz ³; Félix Genaro Cabezas García ⁴; Raúl Alfredo Sánchez Ancajima ⁵

Recebido: 28/09/2025 – Aceite: 02/12/2025 – Publicado: 01/01/2025

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

A análise do Produto Interno Bruto (PIB) é essencial para compreender a dinâmica económica do Equador e orientar decisões estratégicas em contextos de elevada volatilidade macroeconómica. O objetivo do estudo foi estimar e prever a taxa de crescimento do PIB do Equador a curto prazo, utilizando modelos estatísticos robustos e validados. Foram utilizadas séries históricas do PIB (1965–2023) obtidas junto do Banco Central do Equador. Testes de estacionariedade (ADF, KPSS), correlogramas e critérios de informação (AIC, BIC) foram aplicados para selecionar modelos ARIMA adequados. A análise foi realizada com o EViews 12, gerando projeções para o período 2024–2027 sob cenários otimistas, pessimistas e esperados. Os resultados mostraram que a série do PIB equatoriano não estava estacionária no seu nível original, o que exigiu a aplicação da primeira diferença para estabilizar a média. O modelo ARIMA identificado incorporou componentes autoregressivos e de média móvel, cujos coeficientes foram estatisticamente significativos. Os resíduos do modelo não apresentaram autocorrelação, o que confirmou a sua validade. As projeções geradas para o período 2024–2027 indicaram um crescimento moderado sob cenários otimistas, pessimistas e esperados. Estes resultados foram consistentes com estimativas oficiais, validando a metodologia Box-Jenkins como uma ferramenta eficaz para a previsão económica nacional. O estudo fornece evidências empíricas úteis para o planeamento económico nacional, validando a aplicabilidade dos modelos ARIMA na análise do PIB. Além disso, promove abordagens interdisciplinares entre economia e engenharia, reforçando a capacidade técnica para enfrentar problemas macroeconómicos em contextos de elevada incerteza estrutural.

Palavras-chave.

Crescimento económico, Produto Interno Bruto, Equador, Modelos Arima, Box-Jenkins, Previsão Económica, Planeamento Macroeconómico.

Resumen.

El análisis del Producto Interno Bruto (PIB) resulta esencial para comprender la dinámica económica de Ecuador y orientar decisiones estratégicas en contextos de alta volatilidad macroeconómica. El estudio tuvo como propósito estimar y pronosticar la tasa de crecimiento del PIB ecuatoriano a corto plazo mediante modelos estadísticos robustos y validados. Se utilizaron series históricas del PIB (1965–2023) obtenidas del Banco Central del Ecuador. Se aplicaron pruebas de estacionariedad (ADF, KPSS), correlogramas y criterios de información (AIC, BIC) para seleccionar modelos ARIMA adecuados. El análisis se realizó con EViews 12, generando proyecciones para el período 2024–2027 bajo escenarios optimista, pesimista y esperado. Los resultados evidenciaron que la serie del PIB ecuatoriano no era estacionaria en su nivel original, lo que requirió la aplicación de la primera diferencia para estabilizar la media. El modelo ARIMA identificado incorporó componentes autorregresivos y de media móvil, cuyos coeficientes fueron estadísticamente significativos. Los residuos del modelo no presentaron autocorrelación, lo que confirmó su validez. Las proyecciones generadas para el período 2024–2027 indicaron un crecimiento moderado bajo escenarios optimista, pesimista y esperado. Estos resultados fueron consistentes con estimaciones oficiales, validando la metodología Box-Jenkins como herramienta eficaz para el pronóstico económico nacional. El estudio aporta evidencia empírica útil para la planificación económica nacional, validando la aplicabilidad de modelos ARIMA en el análisis del PIB. Además, promueve enfoques interdisciplinarios entre economía e ingeniería, fortaleciendo la capacidad técnica para abordar problemas macroeconómicos en contextos de alta incertidumbre estructural.

Palabras clave.

Crecimiento económico, Producto Interno Bruto, Ecuador, Modelos Arima, Box-Jenkins, Pronóstico Económico, Planificación macroeconómica

1.- Introdução

O crescimento económico é uma das variáveis mais relevantes para a análise da estabilidade e desenvolvimento dos países, uma vez que reflete a capacidade produtiva e as condições estruturais das suas economias; neste contexto, o Produto Interno Bruto (PIB) é o principal indicador utilizado para medir a atividade económica, pelo que a sua estimativa e previsão são essenciais para a formulação de políticas públicas. a tomada de decisões no ambiente

empresarial e a avaliação de cenários futuros. (Desiderio Noboa, 2022)

No caso do Equador, a evolução do PIB tem sido marcada por uma notória dependência das exportações de petróleo, vulnerabilidade a choques externos e a implementação de políticas fiscais e monetárias que influenciaram a sua dinâmica de crescimento, fatores que geraram variações significativas nas taxas de expansão da economia. o que torna necessário dispor de ferramentas estatísticas robustas

¹ Universidade Técnica de Babahoyo; lzapata@utb.edu.ec; <https://orcid.org/0009-0003-1497-2273>; Babahoyo; Equador.

² Instituto Superior de Tecnologia da Universidade Bolivariana; erhaymacana@itb.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-8708-3894>; Guayaquil; Equador.

³ Universidade de Guayaquil; franscico.duquea@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0001-9533-1635>; Guayaquil; Equador.

⁴ Investigador Independente; genaro_cabezas@hotmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3595-3584>; Hamilton, ON, Canadá.

⁵ Universidade Nacional de Tumbes; rsanchez@untumbes.edu.pe; <https://orcid.org/0000-0003-3341-7382>; Tumbes, Peru.

que nos permitam compreender o seu comportamento histórico e as tendências dos projetos com maior precisão.(Asán Caballero, 2023)

Dentro das metodologias da análise de séries temporais, a abordagem Box-Jenkins (ARIMA) estabeleceu-se como uma das mais utilizadas na modelação e previsão de variáveis económicas; a sua capacidade de identificar padrões estocásticos em dados, ajustar modelos parcimoniosos e gerar projeções fiáveis torna-a uma alternativa adequada para estudar a dinâmica do PIB. Além disso, a sua flexibilidade permite captar a natureza não estacionária das séries económicas e melhorar a qualidade das estimativas em horizontes de curto prazo.(Tudela-Mamani y otros, 2022)

Neste contexto, o presente estudo visa estimar e prever a taxa de crescimento do PIB do Equador utilizando a metodologia Box-Jenkins, de modo a avaliar a sua capacidade preditiva e fornecer evidências empíricas que contribuam para a análise da dinâmica macroeconómica nacional, procurando assim reforçar o debate académico e fornecer inputs úteis para a gestão e planeamento económico do país.(García Vázquez y otros, 2021)

A análise do crescimento económico é uma questão central na investigação económica e na formulação de políticas públicas, porque o Produto Interno Bruto (PIB) é o principal indicador que mede a capacidade produtiva de um país. No caso do Equador, a dinâmica do PIB tem sido sujeita a múltiplos fatores internos e externos, como a dependência das exportações de petróleo, a vulnerabilidade a alterações nos preços internacionais das matérias-primas, a dolarização da economia, as políticas fiscais e monetárias aplicadas, bem como fenômenos sociais e políticos que geraram ciclos de expansão e contração do seu crescimento.(de la Oliva de Con & Molina Fernández, 2020)

Esta realidade levanta a necessidade de dispor de ferramentas analíticas que nos permitam compreender o comportamento histórico do PIB e antecipar a sua evolução futura; no entanto, grande parte dos estudos sobre a economia equatoriana tem-se focado em análises descritivas ou projeções macroeconómicas agregadas, o que limita a capacidade de dispor de modelos estatísticos rigorosos e validados para fins de previsão.

Neste contexto, surge o problema de investigação: como estimar e prever de forma fiável a taxa de crescimento do PIB do Equador a partir da sua série histórica, usando um modelo estatístico que capture a dinâmica temporal dos dados?

A metodologia Box-Jenkins, utilizando modelos ARIMA, oferece uma abordagem robusta para enfrentar este desafio, permitindo modelar o comportamento estocástico da série e

gerar previsões com grau adequado de precisão para a tomada de decisões; no entanto, a sua aplicação ao caso equatoriano ainda requer mais exploração e validação empírica, o que justifica o presente estudo.

A estimativa e previsão da taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) do Equador, utilizando a metodologia Box-Jenkins, é de grande importância porque combina análise económica com ferramentas estatísticas e computacionais de engenharia; esta abordagem não só contribui para a compreensão da dinâmica macroeconómica nacional, como também fortalece a capacidade da engenharia para resolver problemas complexos em ambientes de elevada incerteza.(Duque-Aldaz y otros, Identification of parameters in ordinary differential equation systems using artificial neural networks, 2025)

Para cumprir o objetivo desta investigação, é proposta: como primeiro passo, ser capaz de estimar e prever a taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) do Equador através da utilização de modelos estatísticos, de modo a gerar informação fiável que apoie o planeamento económico e a tomada de decisões estratégicas a nível governamental, empresarial e académico. Como segundo passo, propõe-se analisar a evolução histórica da taxa de crescimento do PIB do Equador, identificando tendências, ciclos e padrões relevantes. Como terceiro passo, propõe-se selecionar e aplicar modelos estatísticos e econométricos apropriados (por exemplo: ARIMA, VAR, modelos de correção de erros) para a estimativa e previsão do PIB. Por fim, os resultados obtidos serão comparados com as projeções oficiais (Banco Central do Equador, CEPAL, FMI), avaliando semelhanças e discrepâncias.(Castro Rosales y otros, 2025)

1.1. Conceito e relevância do Produto Interno Bruto (PIB)

O Produto Interno Bruto (PIB) é um indicador económico fundamental que representa o valor monetário total de todos os bens e serviços finais produzidos dentro das fronteiras de um país durante um período específico, normalmente um ano. A sua origem teórica é principalmente atribuída a Simon Kuznets, que o introduziu na década de 1930 para medir a atividade económica nacional, e desde então estabeleceu-se como a métrica padrão para avaliar a dimensão e a saúde das economias a nível global. O PIB reflete tanto a produção tangível, como bens manufaturados ou agrícolas, como serviços intangíveis, como a educação e a saúde, captando assim a capacidade produtiva e a dinâmica económica de um país em qualquer momento.(Cruz Ramírez y otros, 2024)

No contexto do Equador, o PIB é especialmente relevante dado que o país tem uma economia fortemente dependente de setores como as exportações de petróleo, produtos agroindustriais e recursos naturais. O crescimento sustentado do PIB está associado a uma maior criação de emprego, melhoria da qualidade de vida e maior bem-estar

geral da população. Da mesma forma, a análise do PIB e da sua evolução permite aos governos e entidades públicas desenhar e ajustar políticas económicas, fiscais e sociais, orientando investimentos em infraestruturas, educação e saúde para promover um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável no território nacional. (Núñez Ordóñez, 2023)

Para além da sua utilidade na medição da produção agregada, o PIB funciona como um indicador-chave da estabilidade económica e da confiança empresarial, influenciando a perceção dos investidores nacionais e internacionais. A comparação do PIB nominal e real permite-nos identificar alterações reais na produção, descontando os efeitos inflacionários. Além disso, a sua expressão em termos per capita facilita a avaliação do nível médio de riqueza e do progresso económico da população, um aspeto de particular importância para o Equador devido às desigualdades regionais e sociais existentes. Neste sentido, o PIB não só mede o volume económico, mas também reflete as condições estruturais e os desafios enfrentados pela economia equatoriana. (Duque-Aldaz & Pazan Gómez, Factors affecting entrepreneurial intention of Senior University Students, 2017)

1.2. Fatores que Afetam o Crescimento Económico no Equador

O crescimento económico do Equador é fortemente influenciado tanto por fatores internos como externos que determinam a dinâmica do Produto Interno Bruto (PIB). Entre os fatores externos, a dependência das exportações de petróleo desempenha um papel central, pois a economia nacional está fortemente ligada às flutuações dos preços internacionais do petróleo. Estudos recentes mostram que as quedas nos preços do petróleo têm um impacto negativo significativo e mais pronunciado no PIB real, afetando também as receitas fiscais e a despesa pública, que são variáveis críticas para sustentar o crescimento económico. Esta sensibilidade evidenciou a necessidade de diversificar as fontes de rendimento para reduzir a vulnerabilidade a choques externos decorrentes da volatilidade dos mercados internacionais. (Chérrez Sánchez y otros, 2025)

Do ponto de vista interno, as políticas fiscais e monetárias implementadas pelo governo equatoriano são mecanismos chave para influenciar o crescimento económico. A cobrança de impostos, juntamente com a gestão da despesa pública, têm uma relação positiva e significativa com a evolução do PIB, uma vez que estes recursos permitem financiar investimentos em infraestruturas, educação e outros setores estratégicos. No entanto, a estabilidade política parece desempenhar um papel menos decisivo na variabilidade económica do que as variáveis económicas diretas, embora fatores sociais e políticos possam gerar incerteza que afeta a confiança empresarial e as expectativas macroeconómicas. (Sandoya Sánchez & Vásquez Villon, 2004)

Além disso, a economia equatoriana apresenta ciclos de expansão e contração relacionados com fenómenos económicos globais, como a crise financeira global e as flutuações do mercado petrolífero. Setores como mineração, agricultura e manufatura desempenham papéis importantes na estrutura produtiva, embora a sua contribuição seja condicionada por tendências internacionais e dinamismo interno. Assim, a interação entre variáveis externas e decisões de política económica interna molda a dinâmica complexa do crescimento do PIB no Equador, reafirmando a importância de estratégias destinadas a fortalecer a resiliência e promover um desenvolvimento económico sustentável e diversificado. (Romero Ruiz y otros, 2024)

1.3. Modelos e metodologias para análise e previsão económica

Para analisar e prever a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) em economias emergentes como o Equador, os modelos de séries temporais estabeleceram-se como ferramentas fundamentais. Estes modelos permitem-nos captar as dinâmicas e padrões intrínsecos aos dados económicos históricos para projetar o seu comportamento futuro. Entre os mais amplamente utilizados estão os modelos autorregressivos, médias móveis e as suas combinações, que ajustam a dependência temporal das variáveis económicas. A capacidade dos modelos de séries temporais para lidar com dados sequenciais e a sua flexibilidade para incorporar sazonalidades e tendências torna-os adequados para ambientes com dados económicos complexos e ruidosos. (Morochó Choca y otros, 2024) (Herrera Mendoza, 2024)

A metodologia Box-Jenkins, que inclui os modelos ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average), baseia-se na identificação, estimação e validação sistemáticas do modelo que melhor se ajusta à série temporal. Esta metodologia é especialmente valiosa para estimativa e previsão económica porque combina componentes autoregressivos e de média móvel após a diferenciação em série para alcançar a estacionaridade. Estudos recentes aplicados ao contexto equatoriano implementaram modelos ARIMA para prever variáveis-chave, demonstrando a eficácia da abordagem na captação de flutuações económicas e na geração de previsões ajustadas a cenários reais. (Sandoya Sanchez & Abad Robalino, 2017)

No entanto, os modelos ARIMA e outros modelos tradicionais têm tanto vantagens como limitações. Entre as suas forças está a relativa simplicidade estrutural e a capacidade de prever com dados históricos univariados. No entanto, em contextos de elevada volatilidade económica e dependência externa, como no caso do Equador, podem ter dificuldade em antecipar mudanças abruptas ou incorporar os efeitos de choques exógenos, como crises internacionais ou variações nos preços das matérias-primas, que afetam o PIB. Por esta razão, recomenda-se complementar estes modelos com abordagens multivariadas ou técnicas atuais que permitam incorporar variáveis explicativas externas e

captar melhor a complexidade estrutural da economia.(Ochoa González, 2024)

1.4. Testes estatísticos e critérios para validação de modelos

Para validar a adequação e precisão dos modelos ARIMA aplicados à análise do Produto Interno Bruto (PIB), é essencial realizar testes estatísticos para garantir a estacionariedade das séries temporais. Entre os mais usados estão os testes Dickey-Fuller (ADF) e Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) aumentados. O teste ADF contrasta a hipótese nula de que a série tem uma raiz unitária — ou seja, não é estacionária — com a alternativa de estacionariedade, e baseia-se na inclusão de termos retardados para corrigir uma possível autocorrelação. Por outro lado, o teste KPSS assume a estacionariedade como hipótese nula, avaliando se a série é a soma de uma caminhada aleatória e de um componente estacionário. A combinação de ambos os testes permite uma avaliação mais robusta, uma vez que as suas hipóteses nulas são opostas, proporcionando maior certeza sobre o comportamento da série nacional do PIB.(Pincay Moran y otros, 2025)(Varas y otros, 2023)

Além disso, a análise dos correlogramas – funções de autocorrelação e autocorrelação parcial – é essencial para identificar padrões sazonais e dependências temporais nos dados, facilitando a escolha adequada dos parâmetros AR e MA nos modelos ARIMA. Para a seleção ótima do modelo, são utilizados critérios de informação estatística como o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério Bayesiano de Informação (BIC), que equilibram o ajuste do modelo com a sua complexidade, evitando o sobreajuste. Estes critérios permitem-lhe comparar diferentes especificações e selecionar aquela que minimiza o erro de previsão com menos parâmetros.(Li Ye & Paz y Miño Robles, 2023)

Finalmente, o diagnóstico residual é um passo crucial para validar a qualidade do modelo estimado, verificando que os resíduos são ruído branco, ou seja, variáveis aleatórias independentes com média zero e variância constante. Isto envolve testes de não-autocorrelação – como o teste Ljung-Box – e testes de normalidade nos resíduos, garantindo que o modelo captou corretamente a informação relevante na série. Os modelos ARIMA que passam com sucesso nestes testes estatísticos fornecem estimativas fiáveis e robustas para a previsão do PIB, aumentando a precisão e utilidade das análises económicas no contexto equatoriano.(Arango Fuentes y otros, 2025)

1.5. Aplicações práticas e abordagens complementares

Os modelos estatísticos para a análise e previsão do Produto Interno Bruto (PIB) no Equador têm uma aplicação prática significativa no planeamento económico e na tomada de decisões estratégicas. Ao utilizar modelos de séries temporais como o ARIMA, os decisores políticos e as agências podem gerar projeções fiáveis que orientam a

alocação eficiente de recursos públicos e privados, antecipando cenários futuros. Isto é essencial para desenhar políticas fiscais, ajustar orçamentos e avaliar o impacto de variáveis externas e internas na economia nacional, permitindo uma gestão proativa perante as mudanças na dinâmica económica.(Macías Sandoval & Tutiven Galvez, 2025)

Para reforçar a capacidade preditiva e captar inter-relações entre múltiplas variáveis económicas, são utilizados modelos multivariados como o Vetor Autoregressivo (VAR) e os Modelos de Correção de Erros Vetoriais (VECM). Estes modelos permitem analisar a cointegração e as relações dinâmicas entre várias variáveis macroeconómicas, incluindo inflação, taxas de câmbio, taxas de juro e exportações, enriquecendo a compreensão das causas e efeitos na variação do PIB. A sua utilização complementa e expande a informação fornecida pelos modelos univariados, adaptando-se melhor a contextos económicos complexos e altamente interligados, como o equatoriano.(Cruz Peña, 2024)

Recentemente, também houve um aumento na incorporação de métodos híbridos que combinam modelos estatísticos tradicionais com aprendizagem automática e técnicas de inteligência artificial para melhorar a precisão das previsões económicas. Estas técnicas permitem tirar partido de grandes volumes de dados e detetar padrões não lineares que escapam às abordagens convencionais, aumentando a robustez em contextos de elevada volatilidade e dependência externa. No Equador, a integração destas abordagens representa um avanço metodológico chave para abordar as limitações inerentes aos modelos clássicos e capacitar a tomada de decisões baseada em análises preditivas mais precisas e adaptativas.(Fu-López y otros, 2025)(Lliguizaca Dávila y otros, 2020)

2.- Materiais e métodos.

A metodologia utilizada nesta investigação é descrita abaixo:

Factos:

Série histórica anual do PIB do Equador (1965–2023) fornecida pelo Banco Central do Equador (BCE).

Software e ferramentas analíticas:

EViews 12 (x64) para análise de séries temporais e estimativa do modelo ARIMA.

Desenho experimental

Tipo de estudo: quantitativo, longitudinal, baseado em séries temporais.

Variáveis estudadas:

Dependente: taxa de crescimento do PIB.

Validação do método:

Foram aplicados testes de estacionariedade (ADF, KPSS) para garantir a adequação dos modelos de séries temporais. Foram usados critérios de informação (AIC, BIC) para selecionar os modelos mais apropriados.

Os resultados foram comparados com as previsões oficiais do BCE e da CEPAL para avaliar a consistência.

Procedimentos

Recolha de dados:

Descarregue séries históricas do PIB e variáveis macroeconômicas relacionadas do BCE, CEPAL e INEC.

Depuração e preparação:

Limpeza de dados, remoção de outliers e homogeneização de unidades e períodos.

Análise exploratória:

Estatísticas descritivas e visualização de tendências, sazonalidade e ciclos econômicos.

Modelagem:

Aplicação dos modelos ARIMA para séries individuais.

Validação e ajuste do modelo:

Testes residuais, de autocorrelação e heterocedasticidade. Comparação com previsões oficiais e ajuste dos parâmetros de acordo com os resultados.

Geração de previsões:

Projeção anual do PIB para os próximos quatro anos (2024–2027).

Apresentação dos resultados:

Gráficos e quadros em EViews, incluindo cenários otimistas, pessimistas e de crescimento esperado.

Análise de dados

Estatísticas descritivas: médias, desvios padrão, tendências e sazonalidade.

Modelos de séries temporais: ARIMA, SARIMA para estimativas individuais.

Validação do Modelo:

Teste de raiz unitária (ADF, KPSS).

Análise de autocorrelação (ACF, PACF).

Crítérios de informação (AIC, BIC).

Previsões: intervalos de confiança de 95% e comparação com séries históricas.

3.- Análise e Interpretação dos Resultados.

3.1.- Apresentação dos resultados:

Identificação da Fase 1

Tabela 1. Série Histórica do Produto Interno Bruto (PIB) do Equador (1965-2023)

Year	PIB
1965	2339.033
1966	2442.572
1967	2535.654
1968	2556.129
1969	3153.717
1970	2798.598
1971	2689.986
1972	3091.270
1973	3900.130
1974	6470.751
1975	7708.141
1976	9044.610
1977	11055.22
1978	11806.45
1979	14361.49
1980	18253.79
1981	22115.45
1982	20059.81
1983	17256.55
1984	

Fonte: Banco Central do Equador.

Evolução do PIB no Equador (1965-2023)



Figura 1.- Evolução do PIB no Equador (1965-2023)

De acordo com o gráfico, a série não mostra a estacionariedade na média, embora mostre uma tendência, portanto, vamos proceder a verificar esta suposição, e depois verificaremos a suposição.

Tabela 2. Resultados do Teste de Raiz Unitária (Teste ADF) Teste de Dickey-Fuller Aumentado

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
PIB(-1)	-0.020924	0.033410	-0.626286	0.5337
C	-897.8526	1266.193	-0.709096	0.4813
@TREND("1965")	125.8258	71.07052	1.770436	0.0822

Test	Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic	-0.626286	0.9735
Test critical values:		
1% level	-4.124265	
5% level	-3.489228	
10% level	-3.173114	

*Mackinnon (1996) one-sided p-values.

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
R-squared	0.121485			2048.414
Adjusted R-squared	0.089539			4283.441
S.E. of regression	4087.177			19.51944
Sum squared resid	9.19E+08			19.62601
Log likelihood	-563.0636			19.56095
F-statistic	3.802825			1.586295
Prob(F-statistic)	0.028386			

Uma série temporal é não estacionária em média quando o seu valor esperado (a média) não é constante e muda ao longo do tempo.

Observamos que o valor p indica que a série é, em média, não estacionária, pelo que é necessário aplicar transformações, como a diferenciação, para a tornar estacionária.

As seguintes são as hipóteses do teste:

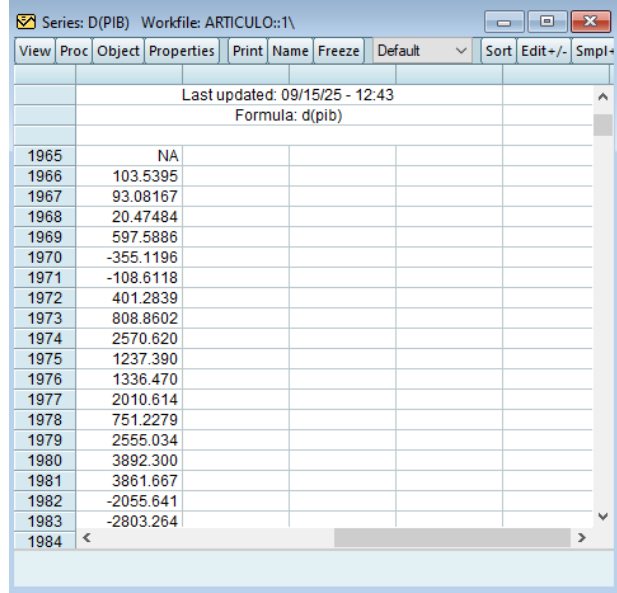
H_0 (nulo): a série tem uma raiz unitária \rightarrow não é estacionária.

H_1 (alternativa): a série não tem raiz unitária \rightarrow é estacionária.

O valor p (0,9735) é muito elevado, muito superior a qualquer nível típico de significância (0,01, 0,05, 0,1), o que não permite que H_0 seja rejeitado, o que significa que a série não está estacionária.

Primeira diferença do PIB

Tabela 3. PIB (Produto Interno Bruto) - Primeira Diferença



Year	D(PIB)
1965	NA
1966	103.5395
1967	93.08167
1968	20.47484
1969	597.5886
1970	-355.1196
1971	-108.6118
1972	401.2839
1973	808.8602
1974	2570.620
1975	1237.390
1976	1336.470
1977	2010.614
1978	751.2279
1979	2555.034
1980	3892.300
1981	3861.667
1982	-2055.641
1983	-2803.264
1984	

Primeira Diferença no PIB

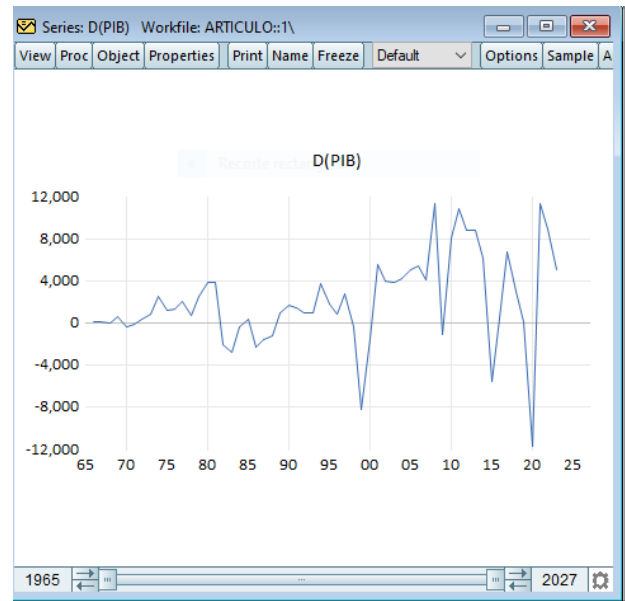


Figura 2.- Primeira diferença no PIB

Depois vemos que o gráfico já não tem tendência e aparentemente a média ronda 0, fazemos o Teste de Dickey-Fuller Aumentado (Teste ADF).

Tabela 4. Resultados do Teste de Raiz Unitária (DAF) sobre a Primeira Diferença do PIB

View	Proc	Object	Properties	Print	Name	Freeze	Sample	Genr	Sheet	Graph	Stats	Ident
Null Hypothesis: D(PIB) has a unit root												
Exogenous: Constant												
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=10)												
											t-Statistic	Prob.*
Augmented Dickey-Fuller test statistic											-5.517803	0.0000
Test critical values:											1% level	-3.550396
											5% level	-2.913549
											10% level	-2.594521

*Mackinnon (1996) one-sided p-values.

Augmented Dickey-Fuller Test Equation

Dependent Variable: D(PIB,2)
Method: Least Squares
Date: 09/15/25 Time: 12:45
Sample (adjusted): 1967 2023
Included observations: 57 after adjustments

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(PIB(-1))	-0.715090	0.129597	-5.517803	0.0000
C	1513.744	610.2960	2.480345	0.0162
R-squared	0.356320	Mean dependent var		86.14731
Adjusted R-squared	0.344616	S.D. dependent var		5154.791
S.E. of regression	4173.100	Akaike info criterion		19.54516
Sum squared resid	9.58E+08	Schwarz criterion		19.61685
Log likelihood	-555.0372	Hannan-Quinn criter.		19.57302
F-statistic	30.44615	Durbin-Watson stat		1.970695
Prob(F-statistic)	0.000001			

A nova variável $Dpbi$ foi sujeita a uma análise de estacionaridade, que confirmou que está estacionária. Subsequentemente, é realizado o correlograma.

H0 (nulo): a série tem uma raiz unitária → não é estacionária.

H1 (alternativa): a série não tem raiz unitária → é estacionária.

É muito inferior a qualquer nível típico de significância (0,01, 0,05, 0,1), o que significa que rejeitamos a hipótese nula Ho.

Depois realizamos o correlograma.

Tabela 5. Correlato da Primeira Diferença no PIB

View	Proc	Object	Properties	Print	Name	Freeze	Sample	Genr	Sheet	Graph	Stats	Ident
Date: 09/15/25 Time: 12:46 Sample (adjusted): 1966 2023 Included observations: 58 after adjustments												
Autocorrelation		Partial Correlation		AC	PAC	Q-Stat	Prob					
1	0.282	0.282	4.8681	0.027								
2	0.023	-0.062	4.9000	0.086								
3	0.062	0.080	5.1445	0.162								
4	0.203	0.179	7.7992	0.099								
5	0.218	0.127	10.912	0.053								
6	0.038	-0.054	11.009	0.088								
7	-0.060	-0.070	11.257	0.128								
8	-0.062	-0.081	11.522	0.174								
9	0.006	-0.021	11.525	0.241								
10	0.144	0.145	13.038	0.222								
11	0.169	0.155	15.165	0.175								
12	-0.126	-0.184	16.375	0.175								
13	0.021	0.142	16.409	0.228								
14	-0.036	-0.180	16.514	0.283								
15	0.021	-0.018	16.551	0.346								
16	0.187	0.239	19.456	0.246								
17	0.096	0.051	20.234	0.262								
18	-0.086	-0.127	20.879	0.286								
19	-0.097	-0.017	21.713	0.299								
20	0.060	-0.011	22.044	0.338								
21	0.074	-0.113	22.561	0.368								
22	-0.144	-0.127	24.568	0.318								
23	-0.163	0.068	27.216	0.247								
24	-0.124	-0.155	28.796	0.228								

Fase 1: Identificação

Correlação parcial AR:(1)

Autocorrelação MA:(1)

Fase 2: Escolhemos um modelo

d(PBI) c ar(1)

Tabela 6. Resultados da Estimativa do Modelo 1 d(pib) c ar(1)

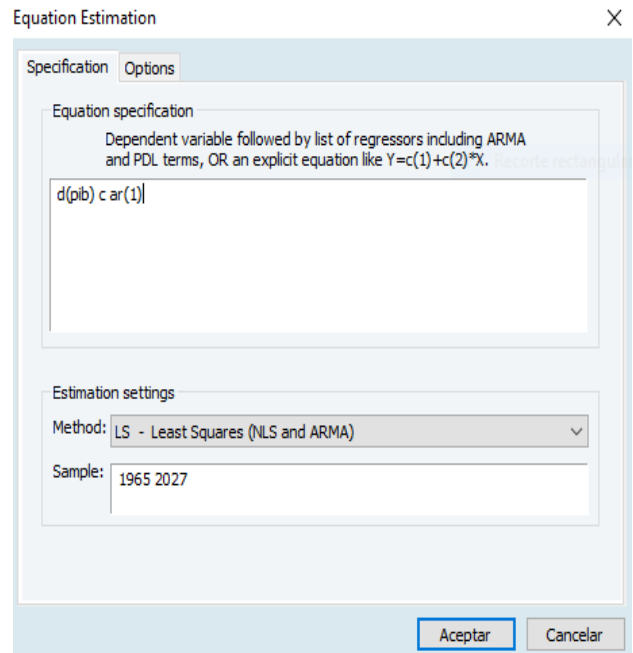


Tabela 7. Resultados da Estimativa ARMA por Máxima Verosimilhança (OPG - BHHH) d(pbi) c ar(1)

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Estimate	Forecast	Stats	Resids
Dependent Variable: D(PIB)									
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)									
Date: 09/15/25 Time: 12:50									
Sample: 1966 2023									
Included observations: 58									
Convergence achieved after 23 iterations									
Coefficient covariance computed using outer product of gradients									
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.					
C	2055.198	774.5634	2.653363	0.0104					
AR(1)	0.280924	0.088811	3.163178	0.0025					
SIGMASQ	16576666	2256256.	7.346978	0.0000					
R-squared	0.080684	Mean dependent var	2048.414						
Adjusted R-squared	0.047254	S.D. dependent var	4283.441						
S.E. of regression	4181.010	Akaike info criterion	19.56625						
Sum squared resid	9.61E+08	Schwarz criterion	19.67282						
Log likelihood	-564.4212	Hannan-Quinn criter.	19.60776						
F-statistic	2.413547	Durbin-Watson stat	1.955942						
Prob(F-statistic)	0.098919								
Inverted AR Roots	.28								

Os resultados da estimativa do modelo ARIMA mostram que todos os coeficientes são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%, concluindo-se ao observar que os seus valores-p são inferiores a 0,05.

C (Constante): O valor p de 0,0104 é inferior a 0,05, indicando que a constante do modelo é significativa. Isto sugere que existe uma média não nula na série após a diferenciação.

AR(1) (Termo Autoregressivo): Com um valor p de 0,0025, este coeficiente é altamente significativo, o que confirma que o valor atual da série está fortemente correlacionado com o seu valor no período anterior (um atraso).

SIGMASQ (Variância de Erro): O valor p de 0,0000 é extremamente baixo, o que significa que a variância dos resíduos do modelo é estatisticamente significativa. Isto é um bom indicativo de que o modelo está a captar corretamente a estrutura da série e que a variância dos erros não é zero.

Modelo proposto

$$\Delta y_t = \phi_0 + \phi_1 \Delta y_{t-1} \dots \dots 1$$

{Ho: $0\phi_0 =$

{: $\neq 0$ significativo porque o valor p é $0,0001H_1\phi_0$

Portanto, a fase 2 cumpre porque os valores dos coeficientes são significativos.

P-Valor:

Se $p < 0,05 \rightarrow$ rejeitas Ho

Se $p \geq 0,05 \rightarrow$ não rejeitas Ho

Fase 3: Diagnóstico

É uma função da normalidade dos erros e da autocorrelação dos erros.

Ver

Diagnóstico Residual

Histograma – Teste de Normalidade

Histograma dos resíduos

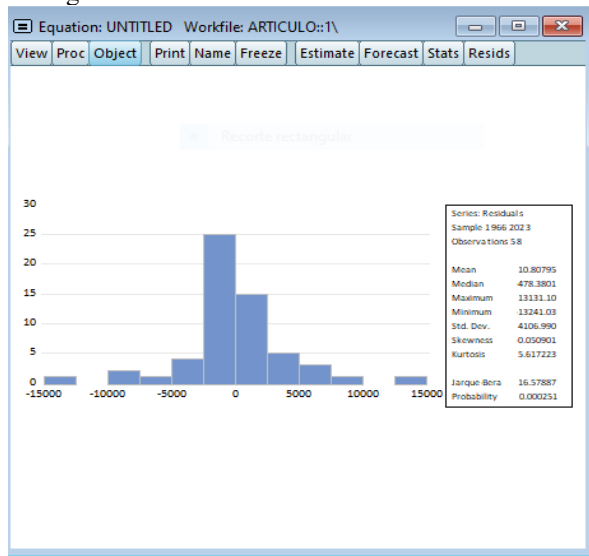


Figura 3.- Histograma dos resíduos

**Neste gráfico vemos que os erros tendem a ser normais com média 0 e variância 1.

A probabilidade de Jarque-Bera é 0,000251, portanto a distribuição de erros não é Normal.

Portanto, voltamos à Fase 1.

Então equação $d(\text{gbi}) c \text{ ar}(1) \text{ ma}(1)$

Tabela 7. Resultados da Estimativa do Modelo $d(\text{pib}) c \text{ ar}(1) \text{ ma}(1)$

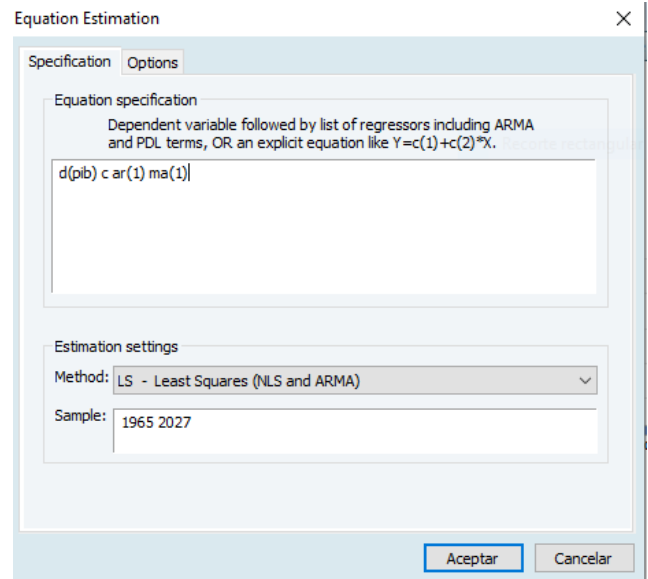


Tabela 8. Resultados da Estimativa ARMA por Verosimilhança Máxima (OPG - BHHH) $d(\text{pbi}) c \text{ ar}(1) \text{ ma}(1)$

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Estimate	Forecast	Stats	Resids
Dependent Variable: D(PIB)									
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)									
Date: 09/15/25 Time: 12:54									
Sample: 1966 2023									
Included observations: 58									
Convergence achieved after 32 iterations									
Coefficient covariance computed using outer product of gradients									
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.					
C	2050.847	746.0807	2.748827	0.0081					
AR(1)	0.061898	0.423412	0.146188	0.8843					
MA(1)	0.237986	0.418702	0.568391	0.5721					
SIGMASQ	16500629	2247270.	7.342521	0.0000					
R-squared	0.084901	Mean dependent var	2048.414						
Adjusted R-squared	0.034062	S.D. dependent var	4283.441						
S.E. of regression	4209.857	Akaike info criterion	19.59629						
Sum squared resid	9.57E+08	Schwarz criterion	19.73839						
Log likelihood	-564.2925	Hannan-Quinn criter.	19.65164						
F-statistic	1.670001	Durbin-Watson stat	1.984593						
Prob(F-statistic)	0.184307								
Inverted AR Roots	.06								
Inverted MA Roots	-.24								

{Ho: $\phi_0=0$

{H₁: $\phi_0 \neq 0$ significativo porque o valor p é 0,0001

Portanto, a fase 2 cumpre porque os valores dos coeficientes são significativos.

P-Valor:

Se $p < 0,05 \rightarrow$ rejeitas Ho

Se $p \geq 0,05 \rightarrow$ não rejeitas Ho

Fase 3: Diagnóstico

É uma função da normalidade dos erros e da autocorrelação dos erros.

Ver
Diagnóstico Residual
Histograma – Teste de Normalidade

Gráfico 4: Histograma dos resíduos

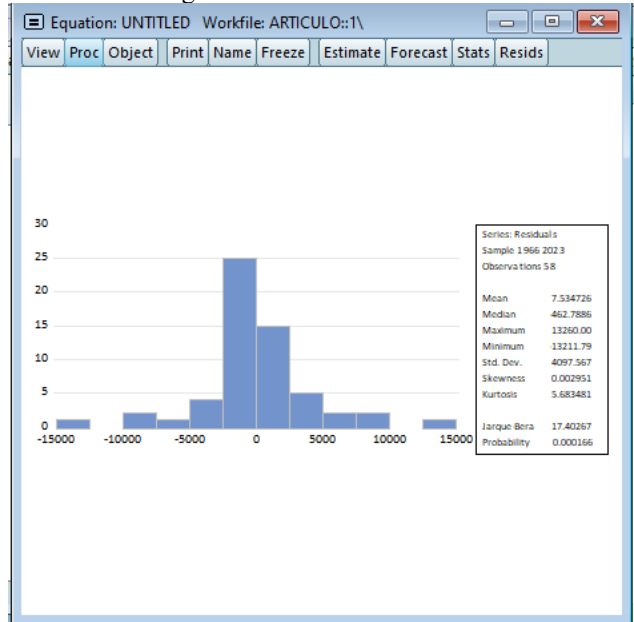


Figura 4.- Histograma dos resíduos

**Neste gráfico vemos que os erros tendem a ser normais com média 0 e variância 1.

A probabilidade de Jarque-Bera é 0,000166, portanto a distribuição de erros não é Normal.

Portanto, voltamos à Fase 1.

Então equação $d(gbi) = c + ar(1) + ma(1)$

Depois verificamos a autocorrelação

Ver

Diagnóstico Residual

Correlograma-Q-Estatísticas

Tabela 9. Mapa do modelo $d(GDP) = c + ar(1) + ma(1)$

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Estimate	Forecast	Stats	Resids
------	------	--------	-------	------	--------	----------	----------	-------	--------

Date: 09/15/25 Time: 12:57
Sample (adjusted): 1966 2023
Q-statistic probabilities adjusted for 2 ARMA terms

	Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
1	0.004	0.004	0.0011			
2	-0.001	-0.002	0.0012			
3	0.025	0.025	0.0419	0.838		
4	0.139	0.139	1.2807	0.527		
5	0.178	0.181	3.3592	0.339		
6	0.000	0.004	3.3592	0.500		
7	-0.048	-0.056	3.5154	0.621		
8	-0.047	-0.082	3.6695	0.721		
9	-0.015	-0.073	3.6860	0.815		
10	0.098	0.071	4.3887	0.820		
11	0.203	0.245	7.4434	0.591		
12	-0.207	-0.171	10.696	0.382		
13	0.096	0.128	11.416	0.409		
14	-0.054	-0.104	11.649	0.474		
15	-0.018	-0.127	11.674	0.555		
16	0.180	0.189	14.362	0.423		
17	0.072	0.150	14.802	0.466		
18	-0.083	-0.096	15.399	0.496		
19	-0.092	-0.052	16.160	0.513		
20	0.063	0.009	16.523	0.556		
21	0.101	-0.063	17.488	0.557		
22	-0.143	-0.177	19.453	0.493		
23	-0.103	0.066	20.507	0.489		
24	-0.066	-0.132	20.948	0.524		

Analisar as probabilidades de erro não é autocorrelacionado.

Fase 4. Prognóstico

2024-2027

Previsão do PIB do Equador para o período 2024-2028 (Modelo ARMA)

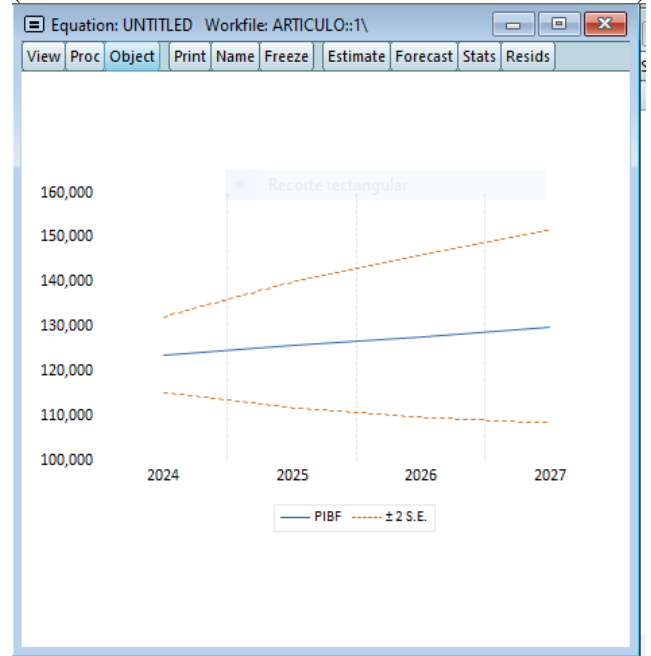


Figura 5. Previsão do PIB do Equador para o período 2024-2028 (Modelo ARMA)

Tabela 11. Produto Interno Bruto (PIB) do Equador: Valores Históricos e Previstos

View	Proc	Object	Print	Name	Freeze	Default	Sort	Edit+/-	Smpl+/-	Compare+/-
				PIB	PIBF					
				PIB	PIBF					
		1965		2339.033	2339.033					
		1966		2442.572	2442.572					
		1967		2535.654	2535.654					
		1968		2556.129	2556.129					
		1969		3153.717	3153.717					
		1970		2798.598	2798.598					
		1971		2689.986	2689.986					
		1972		3091.270	3091.270					
		1973		3900.130	3900.130					
		1974		6470.751	6470.751					
		1975		7708.141	7708.141					
		1976		9044.610	9044.610					
		1977		11055.22	11055.22					
		1978		11806.45	11806.45					
		1979		14361.49	14361.49					
		1980		18253.79	18253.79					
		1981		22115.45	22115.45					
		1982		20059.81	20059.81					
		1983		17256.55	17256.55					
		1984		16943.15	16943.15					
		1985		17304.17	17304.17					
		1986								

Tendência e Previsão do PIB

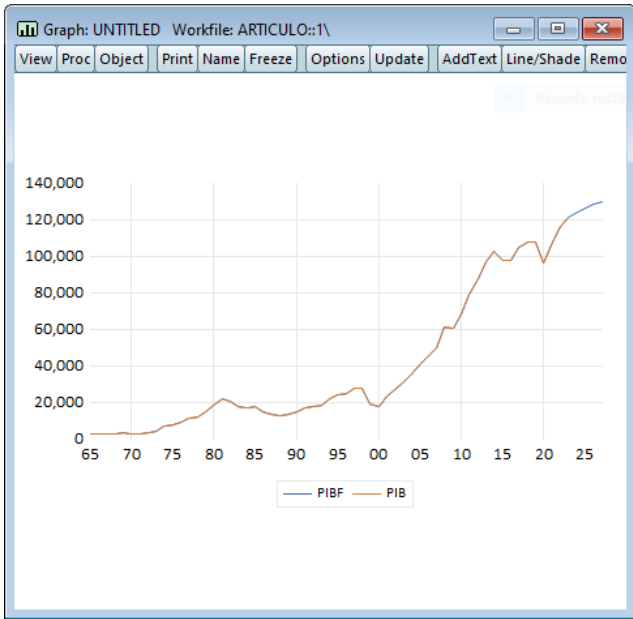


Figura 6.-Tendência e Previsão do PIB

3.2.- Análise dos resultados:

O estudo mostrou que a série do PIB do Equador não estava estacionária no seu nível original, o que exigiu a aplicação da primeira diferença para estabilizar a média. O modelo ARIMA identificado integrou componentes autoregressivos e de média móvel, cujos coeficientes foram estatisticamente significativos, confirmando a validade do ajustamento. Os resíduos não mostraram autocorrelação, o que reforçou a adequação do modelo. A previsão para o período 2024–2027 indicou uma tendência de crescimento moderada, com cenários alternativos que contemplavam variações otimistas

e pessimistas. Estes resultados foram consistentes com as estimativas oficiais emitidas por organizações nacionais e internacionais, o que reforçou a fiabilidade da análise realizada.

3.3.- Interpretação dos resultados:

Os resultados confirmaram a utilidade da metodologia Box-Jenkins na previsão do PIB equatoriano, permitindo captar a dinâmica temporal da economia a curto prazo. O desempenho projetado refletiu uma recuperação gradual após os recentes choques externos, particularmente os resultantes da pandemia e da volatilidade dos preços do petróleo. A consistência com as projeções oficiais mostrou que o modelo pode complementar os sistemas de previsão económica já implementados; da mesma forma, foi demonstrado que a utilização de séries temporais contribui para o reforço do planeamento económico, ao oferecer estimativas robustas em contextos de incerteza.

4.- Discussão.

O estudo baseou-se exclusivamente em séries históricas do PIB, que limitaram a incorporação de fatores estruturais adicionais, como investimento, consumo ou exportações não petrolíferas. A aplicação dos modelos ARIMA, embora adequada para captar padrões temporais, não permitiu explicar as causalidades económicas subjacentes. Além disso, a não normalidade dos resíduos em certos modelos representava uma restrição metodológica. Por fim, a análise centrou-se no curto prazo, o que reduziu a sua aplicabilidade a horizontes de médio e longo prazo.

Recomenda-se complementar estudos futuros com modelos multivariados, como o VAR ou o VECM, que permitem a inclusão de variáveis macroeconómicas adicionais para melhorar a capacidade explicativa. Da mesma forma, seria pertinente integrar abordagens híbridas que combinem técnicas de séries temporais com métodos de aprendizagem automática, de modo a aumentar a precisão em cenários de alta volatilidade. linguagem clara e técnica, evitando ambiguidades. Sugere-se alargar o horizonte de projeção para avaliar a sustentabilidade do crescimento a médio prazo. Por todas estas razões, recomenda-se comparar os resultados com indicadores setoriais para oferecer uma visão mais abrangente da dinâmica económica nacional.

Os resultados obtidos refletiram que a série do PIB equatoriano apresentou um comportamento não estacionário ao seu nível original, que coincidiu com a natureza dinâmica e volátil das economias emergentes. A aplicação da primeira diferença permitiu estabilizar a série e obter um modelo ARIMA com parâmetros estatisticamente significativos, que confirmou a validade metodológica da abordagem Box-Jenkins na análise de variáveis macroeconómicas. A partir do quadro teórico, os resultados ratificaram a utilidade dos modelos de séries temporais na captura de padrões estocásticos, conforme estabelecido por Box e Jenkins na sua proposta

metodológica. A consistência com as estimativas oficiais do Banco Central do Equador e da CEPAL reforça a relevância do modelo aplicado, demonstrando que, mesmo em contextos de incerteza, a metodologia utilizada constitui uma ferramenta robusta para a análise econômica.

No contexto do estudo, as projeções indicavam um crescimento moderado do PIB para o período de 2024–2027, sugerindo um cenário de recuperação gradual após os recentes choques externos. Estas conclusões estão diretamente relacionadas com o objetivo proposto de estimar e prever a taxa de crescimento econômico a curto prazo, gerando informação fiável que apoie o planeamento e a tomada de decisões estratégicas.

5.- Conclusões.

O estudo mostrou que a série do PIB do Equador não era estacionária no seu nível original, pelo que exigia diferenciação para a sua análise. O modelo ARIMA identificado apresentou coeficientes e resíduos estatisticamente significativos sem autocorrelação, validando a sua adequação para estimação. As previsões obtidas projetavam um crescimento moderado da economia entre 2024 e 2027, de acordo com cenários otimistas e pessimistas, e em linha com as estimativas oficiais das organizações nacionais e internacionais.

A investigação forneceu evidências empíricas que confirmam a utilidade da metodologia Box-Jenkins na previsão de variáveis macroeconómicas em contextos de incerteza. Foi oferecido um modelo estatístico robusto que complementa os sistemas de previsão econômica existentes, constituindo uma ferramenta prática para o planeamento e gestão macroeconómica. Além disso, o estudo reforçou a ligação entre a análise teórica das séries temporais e a sua aplicação na economia equatoriana, contribuindo tanto para o campo académico como para a tomada de decisões em políticas públicas e estratégias empresariais.

No campo prático, os resultados obtidos oferecem uma ferramenta de apoio ao planeamento econômico e à tomada de decisões estratégicas nos setores público e privado. As projeções de curto prazo do PIB permitem antecipar cenários de crescimento, o que facilita o desenho de políticas fiscais e monetárias mais eficazes, bem como a preparação de planos de negócios ajustados à situação macroeconómica.

A nível teórico, o estudo reafirma a relevância dos modelos Box-Jenkins para a análise de séries temporais aplicadas a economias emergentes, demonstrando a sua capacidade de captar padrões estocásticos e gerar previsões fiáveis. A investigação contribui também para a literatura económica ao validar um modelo específico para o Equador, reforçando a evidência sobre a aplicabilidade de metodologias econométricas avançadas em contextos caracterizados por elevada volatilidade e dependência de fatores externos.

Sugere-se que o horizonte temporal das projeções seja alargado para avaliar a sustentabilidade do crescimento económico a médio e longo prazo. É também pertinente incorporar variáveis macroeconómicas adicionais – como investimento, consumo, exportações não petrolíferas e despesa pública – para enriquecer os modelos e melhorar a sua capacidade explicativa.

Estudos futuros poderão explorar abordagens multivariadas, como VAR ou VECM, bem como modelos híbridos que combinem técnicas de séries temporais com algoritmos de aprendizagem automática, aumentando a precisão das previsões em cenários de alta volatilidade. Recomenda-se também fazer comparações com modelos estruturais para analisar não só a dinâmica temporal do PIB, mas também as relações causais entre os principais determinantes do crescimento económico.

Por fim, levanta-se a necessidade de avaliar os resultados a nível setorial, com o objetivo de identificar padrões específicos nos principais ramos produtivos e reforçar o planeamento económico a partir de uma perspetiva mais abrangente.

6.- Contribuições dos autores (Taxonomia dos papéis dos colaboradores - CRediT)

1. Conceptualização: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
2. Curadoria de dados: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu.
3. Análise formal: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
4. Aquisição de fundos: N/D.
5. Investigação: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
6. Metodologia: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
7. Gestão de projetos: Francisco Javier Duque-Aldaz, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
8. Recursos: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Francisco Javier Duque-Aldaz.
9. Software: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Edwin Haymacaña Moreno.
10. Supervisão: Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.
11. Validação: Félix Genaro Cabezas García.
12. Visualização: Edwin Haymacaña Moreno.
13. Argumento - rascunho original: Leonor Alejandrina Zapata Aspiazu, Francisco Javier Duque-Aldaz.
14. Escrita - revisão e edição: Francisco Javier Duque-Aldaz, Félix Genaro Cabezas García, Raúl Alfredo Sánchez Ancajima.

7.- Referências.

- [1] D. V. Desiderio Noboa, "Análise da procura e dos efeitos retardados nos principais produtos nas exportações (camarão, café e bananas) para a Europa "modelo de série

- temporal ARIMA"., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2022.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/18331>
- [2] L. Asán Caballero, "Algoritmo de previsão de séries temporais para previsão de tráfego aéreo baseado em redes neurais artificiais.", Cuban Journal of Computer Sciences, vol. 16, nº 4, 2023.
http://scielo.sld/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2227-18992022000400084&lang=es
- [3] J. W. Tudela-Mamani, E. Cahui-Cahui e G. Aliaga-Melo, "Impacto da COVID-19 na procura internacional de turismo do Peru. Uma aplicação da metodologia Box-Jenkins," Revista de Investigaciones Altoandinas, vol. 24, nº 1, 2022.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572022000100027&lang=es
- [4] C. A. García Vázquez, A. I. González Santos, e V. Pérez Garrido, "Metodología e algoritmo de validação para identificar modelos de uma unidade de tratamento de ar.", Ingeniería Electrónica, Automatica, y Comunicaciones, vol. 42, nº 1, 2021.
http://scielo.sld/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282021000100105&lang=es
- [5] F. de la Oliva de Con e R. Molina Fernández, "Proposta para um procedimento para a previsão da taxa de câmbio de curto prazo através do uso de técnicas contrastadas," Cofin Habana, vol. 14, nº 2, 2020.
http://scielo.sld/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2073-60612020000200007&lang=es
- [6] F. J. Duque-Aldaz, F. R. Rodríguez-Flores e J. Carmona Tapia, «Identificação de parâmetros em sistemas de equações diferenciais ordinárias usando redes neurais artificiais», San Gregorio, vol. 1, nº 2, 2025.
https://revista.sangregorio.edu.ec/index.php/REVISTASAN_GREGORIO/article/view/2826
- [7] G. E. Castro Rosales, A. D. Torres Alvarado, L. S. Zalamea Cedeño, F. J. Duque-Aldaz e F. R. Rodríguez-Flores, «Proposta Ergonómica Abrangente para a Redução dos Riscos Musculoesqueléticos na Produção de Sabão: Uma Abordagem Baseada na Análise Estatística e Avaliação Postural,» INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo, vol. 7, nº 2, 2025.
<https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2416>
- [8] E. S. Cruz Ramírez, A. F. Calvache Silvestre e D. A. Roldán Carranza, "Estimativa da procura de água em culturas de banana aplicando modelos de previsão para explorações de pequenos e médios produtores na província de El Oro," ESPOL, 2024.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/63220>
- [9] D. R. Núñez Ordóñez, "Análise e previsão de vendas para a otimização dos tempos de importação na empresa IMPORGUIDSA através da aplicação do modelo de séries temporais ARIMA.", Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2023.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/21912>
- [10] F. J. Duque-Aldaz e E. G. Pazan Gómez, «Factores que afetam a intenção empreendedora dos Estudantes Universitários Seniores», Espacio, vol. 39, nº 09, p. 32, 2017.
<https://www.revistaespacios.com/a18v39n09/18390932.html>
- [11] S. F. Chérrez Sánchez, J. V. Palacios Hurtado e F. R. Camacho Villagómez, «Determinantes na migração no Equador. Período 2000 a 2023.», Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2025.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/24241>
- [12] F. F. Sandoya Sánchez e V. V. Vásquez Villon, «Dessazonalização da série económica das contas nacionais do Equador com X12 - ARIMA», ESPOL. FCNM, 2004.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/56205>
- [13] R. I. Romero Ruiz, D. R. Palomeque Calle e F. R. Camacho Villagómez, "Impacto da volatilidade do preço internacional do camarão e do cacau na exportação do período do Equador 2014-2024.", Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2024.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/23299>
- [14] G. J. Morocho Choca, L. Á. Bucheli Carpio e F. J. Duque-Aldaz, «Otimização do despacho de combustível de combustível através de regressão multivariada usando indicadores locais de armazenamento.», INQUIDE, vol. 6, nº 2, 2024.
<https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v6i02.477>
- [15] F. d. J. Herrera Mendoza, "Incidência dos gastos públicos com a educação básica regular no crescimento económico da Região Norte do Peru, 2008-2019," Universidad Nacional de Tumbes, 2024.
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65510>
- [16] F. F. Sandoya Sanchez e A. G. Abad Robalino, «Comparação da precisão da previsão de dados de uma série temporal entre modelos ARIMA e Redes Neurais», ESPOL. FCNM, 2017.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/40345>
- [17] F. A. Ochoa González, "Análise e previsão da precipitação com inteligência artificial em Esmeraldas - Equador," Universidad Nacional de Tumbes, 2024.
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65477>
- [18] J. E. Pincay Moran, A. F. López Vargas, F. J. Duque-Aldaz, W. Villamagua Castillo y R. Sánchez Casanova, «Avaliação e Proposta para um Sistema de Gestão Ambiental numa Plantação de Manga», INQUIDE, vol. 7, nº 1, 2025.
<https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i01.1991>
- [19] A. Varas, K. E. Narváez Bermeo e R. A. Guevara Orozco, «Desenho de uma Política de Inventário baseada numa previsão de procura para uma empresa dedicada à comercialização de condutores elétricos de alumínio e cobre», ESPOL. FCNM, 2023.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65530>
- [20] K. K. Li Ye e Z. J. Paz e Miño Robles, "Aplicação do modelo ARIMA para a previsão das exportações de flores do Equador," Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2023.
<http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/21884>
- [21] L. N. Arango Fuentes, A. J. Tapia Salvador e G. E. Vilela Govea, «Análise histórica e aplicação de modelos preditivos do preço da tilápia equatoriana», ESPOL. FCSH, 2025.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65944>
- [22] R. D. Macías Sandoval e C. J. Tutiven Galvez, «Estimativa da velocidade de produção de uma máquina de mistura através da implementação de modelos de Aprendizagem Automática», ESPOL. FIEC, 2025.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65804>
- [23] C. A. Cruz Peña, "Influência do crescimento económico, inflação e taxa de juro de referência na rentabilidade da bolsa de Lima, 1992 - 2022," Universidad Nacional de Tumbes, 2024.
<https://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/65196>

- [24] J. S. Fu-López, J. P. Fierro Aguilar, F. R. Rodríguez-Flores e F. J. Duque-Aldaz, «Aplicação de estratégias Lean não automatizadas para melhoria da qualidade em processos manuais de montagem: um estudo de caso na indústria de electrodomésticos.», INQUIDE - Ingeniería Química y Desarrollo, vol. 7, nº 1, 2025.
<https://doi.org/https://doi.org/10.53591/iqd.v7i02.2417>
- [25] J. Lliguizaca Dávila, M. A. Apolinario Rodríguez e B. S. Manzo Robles, "Análise do setor petrolífero equatoriano durante a pandemia de COVID-19 e a sua incidência na balança comercial do petróleo," ESPOL. FICT., 2020.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/50497>

Design termo-hidráulico de um permutador de calor duplo e sem aletas para arrefecimento do leite. Parte 1 - Permutador de calor sem aletas.

Diseño térmico-hidráulico de un intercambiador de calor de doble tubo sin y con aletas para el enfriamiento de leche. Parte 1 – Intercambiador de calor sin aletas.

Amaury Pérez Sánchez ¹ *; Laura de la Caridad Arias Águila ²; Heily Victoria González ³; María Isabel La Rosa Veliz ⁴; Zamira María Sarduy Rodríguez ⁵ & Lizthalia Jiménez Guerra ⁶

Recebido: 06/06/2025 – Aceite: 29/10/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de
Investigação



Artigos de
Revisão



Artigos de
Ensaio



* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

Os permutadores de calor de tubo duplo (DPHEs) ganharam importância nos últimos anos devido à sua construção simples, compacidade, facilidade de manutenção e limpeza, e custos operacionais/de capital relativamente baixos, com uma utilização generalizada em serviços de transferência de calor que envolvem aquecimento ou arrefecimento sensível de fluidos de processo. Este artigo visa desenhar um DPHE do ponto de vista termo-hidráulico, para determinar a sua adequação e aplicabilidade para arrefecer um jato de leite de vaca líquido usando água fria como refrigerante. Foram calculados vários parâmetros de projeto, como o número total de alfinetes (21), a área de superfície de transferência de calor (12,92 m²), o fator de limpeza (0,752) e a percentagem sobre a superfície (32,96%), que podem ser considerados satisfatórios. Além disso, é necessário um caudal mássico de água refrigerada de 9,32 kg/s, classificado como elevado. O DPHE projetado não pode ser aplicado satisfatoriamente no serviço de transferência de calor solicitado porque a queda de pressão (9.481.246 Pa) do fluido do lado do tubo (água refrigerada) é bastante superior ao limite máximo permitido estabelecido pelo processo (85.000 Pa), o que também aumenta a potência de bombagem necessária para este fluido para um valor importante (110,5 kW). O DPHE projetado custará cerca de USD \$ 45.600 com base em maio de 2025.

Palavras-chave.

Permutador de calor duplo sem aletas; design térmico; número de ganchos; queda de pressão; potência de bombagem; custo de compra.

Resumen.

Los intercambiadores de calor de doble tubo (ICDT) han adquirido importancia en años recientes como resultado de su construcción simple, compactación, facilidad de mantenimiento y limpieza, y costos capitales/operación relativamente bajos, con uso extendido en servicios de transferencia de calor que involucren calentamiento y enfriamiento sensible de fluido de proceso. Este artículo tiene como objetivo diseñar un ICDT desde el punto de vista térmico-hidráulico, para determinar su idoneidad y aplicabilidad para enfriar una corriente de leche de vaca líquida usando agua fría como agente de enfriamiento. Varios parámetros de diseño fueron calculados tales como el número total de horquillas (21), área superficial de transferencia de calor (12,92 m²), factor de limpieza (0,752) y porcentaje de sobre superficie (32,96%), los cuales pueden considerarse satisfactorios. También, se requiere un caudal mássico de agua fría de 9,32 kg/s, clasificado como elevado. El ICDT diseñado no puede aplicarse satisfactoriamente en el servicio de transferencia de calor demandado debido a que la caída de presión (9 481 246 Pa) del fluido del lado del tubo (agua de enfriamiento) es muy superior que el límite permisible máximo fijado por el proceso (85 000 Pa), lo cual también incrementa la potencia de bombeo requerida para este fluido hacia un valor importante (110,5 kW). El IDCT diseñado costará alrededor de USD \$ 45 600 basado en Mayo del 2025.

Palabras clave.

Intercambiador de calor de doble tubo; diseño térmico; número de horquillas; caída de presión; costo de adquisición.

1. Introdução

Os permutadores de calor são aparelhos concebidos para facilitar a transferência de calor entre dois ou mais fluidos com as variações de temperatura [1]. Nas últimas décadas, a importância dos permutadores de calor cresceu substancialmente devido ao seu papel na eficiência energética, recuperação e transformação, bem como à integração de fontes de energia alternativas [2].

A energia térmica que passa por um permutador de calor pode ser tanto calor sensível como calor latente proveniente dos fluidos em movimento. O fluido que fornece a energia térmica é conhecido como fluido quente, enquanto o fluido que absorve energia térmica é designado fluido frio. Dentro de um permutador de calor, espera-se que a temperatura do fluido quente diminua, enquanto a temperatura do fluido frio aumenta. A função principal de um permutador de calor é aumentar ou diminuir a temperatura do fluido-alvo [3].

¹ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; amaury.perez84@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>, Camagüey; Cuba.

² Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; aguilaariaslaura@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6494-9747>, Camagüey; Cuba.

³ Faculdade de Ciências Aplicadas; Universidade de Camagüey; heily.victoria@reduc.edu; <https://orcid.org/0009-0007-9319-6506>, Camagüey; Cuba.

⁴ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; maria.rosa@reduc.edu; <https://orcid.org/0000-0002-9517-6118>, Camagüey; Cuba.

⁵ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; Zamira.sarduy@reduc.edu; <https://orcid.org/0000-0003-1428-3809>, Camagüey; Cuba.

⁶ Universidade de Camagüey; Faculdade de Ciências Aplicadas; lizthalia.jimenez@reduc.edu; <https://orcid.org/0000-0002-2471-7263>; Camagüey; Cuba.

Os permutadores de calor são frequentemente utilizados em vários setores, incluindo instalações de produção de energia, fabrico químico, biotecnologia, setor alimentar, engenharia ambiental e recuperação de calor residual, entre outros. O tipo mais básico de permutador de calor moderno é o permutador de calor de duplo tubo [4], também referido como permutador de calor em curva [1].

O DPHE foi desenvolvido no final da década de 1940, e a investigação realizada desde então tem em grande parte apoiado a sua eficácia para alcançar desenvolvimentos significativos. Este tipo de permutador de calor facilita a transferência de energia térmica principalmente entre líquidos quentes e frios, geralmente dentro de tubagens concêntricas dispostas em várias disposições, inicialmente montadas em paralelo e posteriormente adaptadas a projetos de contrafluxo [5].

Um permutador de calor DPHE é composto por um ou mais tubos dispostos concêntricos dentro de um tubo de maior diâmetro, com acessórios concebidos para direcionar o fluxo de uma secção para outra. Neste tipo de permutador de calor, um fluido circula dentro do tubo interior (lado do tubo), enquanto outro fluido atravessa a área anular circundante (anulus). O tubo interior é ligado por curvas em forma de U que se encontram numa caixa de retorno [1].

Um DPHE pode ser configurado em diferentes configurações em série e paralelas [1] para satisfazer as necessidades de queda de pressão, transferência de calor e diferença de temperatura média logarítmica (LMTD) [6].

Este tipo de permutador de calor é utilizado para aplicações que envolvem baixas caudais, uma ampla gama de temperaturas [7] e serviços de alta pressão devido aos tubos mais estreitos [1], sendo adequado para operações contínuas que exigem tarefas de baixo a médio calor [8], especificamente para processos que necessitam de aquecimento ou arrefecimento sensível em fluidos, onde são necessárias superfícies compactas e pequenas de transferência de calor de até 50 m² [1].

Encontra ampla aplicação em indústrias típicas como produção alimentar, química, biotecnologia e processos de gás e petróleo [9], que frequentemente requerem aquecimento ou arrefecimento de fluidos de processo, sendo também amplamente utilizado em centros de investigação relacionados com engenharia energética [10].

Como referido em [7], o DPHE é crucial para tarefas como reaquecimento, pasteurização, aquecimento e pré-aquecimento. A sua acessibilidade em termos de design e manutenção torna-a uma escolha preferida, especialmente para indústrias de pequena escala.

Como referido em [6], o DPHE é uma opção económica para sistemas de arrefecimento em circuito fechado, onde um

fornecimento suficiente de água adequada está acessível a um preço acessível para satisfazer as necessidades térmicas.

Estes permutadores de calor são adequados para processos em que um dos fluxos é um gás ou um líquido espesso, ou quando o volume é limitado em situações de grande incrustação. Isto deve-se aos seus simples processos de limpeza e manutenção. Podem servir como substituto dos permutadores de calor de casca e tubo quando funcionam como verdadeiros permutadores de calor de fluxo contrário. Os DPHEs apresentam um tubo exterior com diâmetro interno entre 50 a 400 mm e um comprimento padrão de 1,5 a 12. por grampo de cabelo. O diâmetro exterior do tubo interior pode variar de até . Uma desvantagem significativa é o seu volume e o elevado custo por unidade de área de superfície de transferência de calor [1]. 0 m¹⁹ mm¹⁰⁰ mm

Uma vantagem do DPHE reside na sua acessibilidade em termos de design e manutenção, caracterizada por uma configuração básica fácil de instalar, limpar, manter e adaptar, o que prolonga significativamente a sua vida útil e funcionalidade [10].

Peccini et al., [11] sugeriram que, quando um fluxo inclui partículas suspensas, o DPHE pode ser uma opção preferível, pois podem incorporar um tubo interior de maior diâmetro para evitar obstruções. Adicionalmente, este tipo de permutador de calor oferece versatilidade devido ao seu design modular, permitindo adaptações mais fáceis a modificações nos processos. Os mesmos autores notaram que o fluxo longitudinal dentro de um DPHE elimina zonas estagnadas, que provavelmente acumulam depósitos em permutadores de casca e tubos.

É essencial projetar termicamente os permutadores de calor de forma a potenciar a transferência de calor, mantendo a queda de pressão dos fluidos dentro de limites aceitáveis. Um desafio frequente enfrentado pelas indústrias é extrair de forma eficiente o calor de um fluxo de utilidade proveniente de um processo específico e usar essa energia para aquecer outro fluxo de processo.

Uma forma de maximizar a extração de calor pode envolver aumentar a área de transferência de calor ou aumentar a taxa de fluxo do refrigerante; No entanto, ambas as estratégias podem levar ao aumento dos custos de bombagem, tornando imprudente aumentar estes parâmetros sem considerar as quedas de pressão. A abordagem convencional ao desenho de permutadores de calor exige uma avaliação cuidadosa de todos os fatores de projeto através de um processo detalhado de tentativa e erro, tendo em conta todas as variações potenciais [12].

Em [7] é indicado que os engenheiros enfrentam dificuldades significativas ao conceber um permutador de calor eficaz. Este desafio surge não só da necessidade de avaliar com precisão a eficiência a longo prazo e os custos financeiros associados, mas também da necessidade crucial de examinar minuciosamente aspetos como a transferência de calor, a

queda de pressão e a eficácia global, que exigem um esforço intenso.

Segundo [13], a otimização no desenho de permutadores de calor é um tema amplamente explorado na literatura existente. A maior parte da investigação que abordou esta questão utilizou métodos analíticos em formato fechado para representar as características operacionais dos sistemas, incluindo técnicas como a LMTD e as abordagens de eficácia (ε -NTU). Estes métodos analíticos baseiam-se na suposição de valores físicos consistentes das propriedades e coeficientes de transferência de calor, o que pode levar a inconsistências significativas em vários cenários de conceção.

No desenho de um DPHE, a maioria das fontes académicas [14,15,16] normalmente incorpora uma coleção mais ampla de elementos de design, como dimensões físicas, distribuições de fluidos e configurações envolvendo múltiplas unidades. Frequentemente dependem de um processo convencional de experimentação e validação; Neste método. Os elementos de design são determinados inicialmente e, subsequentemente, é calculado o número de alfinetes necessários para essa configuração. Se o permutador de calor obtido for considerado inadequado — por razões como a queda de pressão permitida para os caudais especificados fora dos limites predeterminados ou a velocidade dos fluxos não dentro dos limites exigidos — sugere-se uma modificação no projeto e os cálculos são reconsiderados.

Esta metodologia depende fortemente da experiência do projetista e não garante resultados ótimos. As opções disponíveis para os projetistas para novos testes são várias; Podem modificar comprimentos, diâmetros de tubos, arranjos de ganchos e outras características para reduzir a queda de pressão ou aumentar o coeficiente de transferência de calor. Os profissionais confiam nos seus julgamentos intuitivos para, em última análise, desenvolver um permutador de calor viável, que é o objetivo principal da abordagem de design [11].

Foram reportadas inúmeras investigações em que um DPHE foi concebido utilizando diferentes metodologias e ferramentas. Neste sentido, foi realizado um estudo teórico e prático abrangente em [6], onde foram executadas simulações para avaliar o design e a funcionalidade de um DPHE. Esta avaliação de desempenho foi realizada utilizando dinâmica dos fluidos computacional (CFD), enquanto a eficácia global também foi calculada.

Da mesma forma, [9] realizou uma análise numérica sobre como a razão entre diâmetros de tubos e a relação entre diâmetro e comprimento influenciam o desempenho dos permutadores de calor num DPHE, utilizando software CFD para modelar os cenários com ar incompressível. Identificaram estatisticamente e otimizaram os fatores que conduzem à máxima transferência de calor em condições de fluxo constante, com base nos resultados. Os investigadores

notaram que os seus resultados ajudarão em futuras investigações sobre o design de permutadores de calor com dimensões ótimas para comprimento e diâmetro.

Adicionalmente, [13] discutiu a utilização de uma formulação de programação linear inteira (ILP) para desenhar DPHE. O modelo utilizado para o permutador de calor baseava-se na discretização das equações de conservação; Consequentemente, as propriedades físicas foram avaliadas localmente, incorporando a sua dependência da temperatura no modelo. Os resultados numéricos demonstraram a eficácia deste método proposto, revelando que os métodos analíticos podem subestimar ou sobrestimar o tamanho necessário de um permutador de calor.

De forma semelhante, [8] executou um projeto e montagem extensos de um DPHE do tipo laboratório, adequado tanto para disposições paralelas como de fluxo contracorrente. O permutador de calor desenvolvido nesta investigação foi construído em aço galvanizado tanto para o tubo como para a carcaça, enquanto as métricas de desempenho (como LMTD, taxa de transferência de calor, eficácia e coeficiente global de transferência de calor) foram recolhidas e comparadas entre as duas configurações utilizadas.

Em [1], vários DPHEs foram concebidos termicamente para serem utilizados como arrefecedores de óleo em navios navais, enquanto os DPHEs projetados foram avaliados entre si quanto à quantidade de alfinetes, à queda de pressão e à potência necessária para a bombagem. Esta avaliação incorporou os números de Nusselt sugeridos por vários investigadores em quatro categorias de design diferentes: nadadeiras limpas, nadadeiras enredadas, limpas sem barbatanas e sem barbatanas ensujadas.

De forma semelhante, em [10] foi avaliada a eficácia das abordagens teóricas existentes para desenhar um DPHE com espaçamento estreito dos tubos e baixas velocidades do fluido, correspondendo às características de fluxo laminar do fluido de transferência de calor dentro do anel. Esta investigação analisou minuciosamente as razões por detrás das discrepâncias ao comparar resultados teóricos com dados experimentais, oferecendo sugestões para o desenho adequado da DPHE.

Da mesma forma, em [17] um DPHE foi conceptualizado, construído e incorporado numa instalação operacional de gaseificação de biomassa para captar calor do gás de síntese libertado pelo gaseificador, que tem uma temperatura de saída próxima dos 350 °C.

Em [11], foi explorada a otimização de um DPHE usando métodos matemáticos, focando-se em minimizar a área do permutador enquanto consideram as condições termodinâmicas dos fluidos para aplicar as correlações de transporte adequadas, juntamente com restrições de projeto como quedas de pressão máximas e área mínima excedente.

Esta investigação introduziu duas estratégias de programação não linear de inteiros mistos, expandindo o leque de variáveis de design em comparação com estudos anteriores. Estas variáveis incluíam a distribuição dos fluxos de fluido (quer dentro do tubo interior, quer no anel), os diâmetros de ambos os tubos, o comprimento do tubo, a quantidade de ramos paralelos, o número de unidades dispostas em série e paralelas dentro de cada ramo, bem como o número de alfinetes em cada unidade, que afetam a configuração dos alfinetes.

Em [12], o design mais eficaz de um DPHE foi expresso como um desafio de programação geométrica de variável única. A resolução deste problema fornece as dimensões ótimas para os diâmetros dos tubos interior e exterior e o caudal utilitário necessário para um DPHE de um comprimento especificado, dado um caudal pré-determinado para o fluxo do processo e uma diferença de temperatura definida da entrada para a saída.

Em [18], foi concebido um DPHE para investigar o processo de transferência de calor que ocorre entre dois fluidos (água/água) através de um separador sólido. Foi desenvolvido com uma configuração de contrafluxo, utilizando o método de análise LMTD.

Em [19], foi utilizado um método que combina a análise relacional cinzenta (GRA) com redes neuronais artificiais (RNAs) e algoritmos genéticos (GAs) para avaliar a importância de parâmetros como eficácia, resistência térmica e coeficiente global de transferência de calor, classificando estes parâmetros numa sequência específica. A metodologia integrada introduzida nesta investigação tem o potencial de melhorar as capacidades de resolução de problemas e oferecer conhecimentos perspicazes para melhorar o desempenho dos permutadores de calor em diferentes indústrias.

Em [20] foi delineado o cálculo dos parâmetros de design térmico de um DPHE para garantir o aquecimento e esterilização eficazes de um fluxo de fluido orgânico utilizado no processo de separação semente-casca para vários vegetais.

Por fim, [21] explorou tanto métodos analíticos como numéricos no desenho de uma DPHE. A análise incluiu a consideração de uma transferência de calor sensível, e o permutador de calor foi personalizado para se adequar às condições reais de funcionamento de uma instalação química. Esta investigação utilizou um modelo analítico utilizando o método de efetividade-número de unidades de transferência (e -NTU) juntamente com a abordagem LMTD no design do DPHE, com gráficos de desempenho criados durante a fase de conceção para o permutador de calor especificado.

Numa fábrica de processamento de laticínios cubana, é necessário arrefecer o jato líquido de leite de vaca usando água fria, e para isso foram propostos dois DPHEs, o

primeiro sem aletas e o segundo com aletas longitudinais no tubo interior (com aletas). Neste contexto, o presente artigo é a primeira parte de um projeto em duas partes, onde um DPHE sem aletas é projetado para saber se este permutador de calor é adequado para ser implementado neste serviço de transferência de calor, através do cálculo de vários parâmetros de projeto, como o número total de ganchos, o fator de limpeza, a percentagem sobre a superfície, a queda de pressão e o poder de bombeamento de ambos os fluxos de líquido, entre outros.

Da mesma forma, também foi calculado o custo de compra do DPHE sem aletas. No segundo artigo, é concebido um DPHE com aletas, onde também são calculados os principais parâmetros de projeto mencionados anteriormente, enquanto os resultados serão comparados e avaliados em relação aos calculados para o DPHE sem aletas do presente estudo, de modo a selecionar o DPHE mais adequado, económico e aplicável do ponto de vista termo-hidráulico para realizar este serviço de transferência de calor.

2. Materiais e métodos.

2.1. Enunciado do problema.

É necessário arrefecer 4.320 kg/h de um fluxo líquido de leite de vaca de 60 °C a 10 °C através de água refrigerada disponível a 2 °C, onde a temperatura de saída do jato de água refrigerada não deve exceder 8 °C. Os seguintes dados estão disponíveis para o tubo e o anel:

- Anel de diâmetro nominal: 2 pol.
- Diâmetro nominal do tubo interior: 1 pol.
- Comprimento do tubo: 3 m.
- Número de tubos dentro do anel: 1.
- Material do tubo: aço carbono.
- Condutividade térmica do material do tubo: 52 W/m.K.

Projete um permutador de calor duplo sem aletas usando a metodologia reportada por [15], onde devem ser calculados vários parâmetros termo-hidráulicos e de projeto, como a área de transferência de calor, o número total de alfinetes, o fator de limpeza, a percentagem sobre a superfície, a queda de pressão e a potência de bombagem de ambos os fluxos líquidos. É exigido que a queda de pressão tanto do lado do tubo como do fluido anular não exceda 85.000 Pa. Por fim; calcular o custo do equipamento adquirido do DPHE projetado e atualizá-lo para 2025.

2.2. Metodologia de conceção.

Percentagem sobre a superfície

Passo 1. Definição dos parâmetros iniciais para os fluxos: A Tabela 1 apresenta os parâmetros iniciais que devem ser definidos para ambos os fluxos de fluido

Tabela 1. Parâmetros iniciais a definir para ambos os fluxos.

Parâmetro	Fluido quente	Fluido frio	Unidades
-----------	---------------	-------------	----------

Caudal mássico	m_h	m_c	kg/h
Temperatura de entrada	T_1	t_1	°C
Temperatura de saída	T_2	t_2	°C
Queda máxima de pressão permitida	ΔP_{mh}	ΔP_{mc}	Pa
Fator de falta	R_h	R_c	M2. K/W

Fonte: Explicação própria.

Passo 2. Definição das dimensões geométricas dos ganchos: A Tabela 2 mostra as dimensões geométricas a definir para os ganchos.

Tabela 2. Dimensões geométricas a definir para os ganchos.

Parâmetro	Símbolo	Unidades
Comprimento do tubo	L_t	m
Anel de diâmetro interno	D_i	m
Diâmetro interno do tubo interior	d_i	m
Câmara interior de diâmetro externo	d_e	m
Material metálico de condutividade térmica do tubo interior	k_m	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

Passo 3. Definição do arranjo de fluxo dentro do permutador de calor de tubo duplo:

- Contra-fluxo.
- Paralelo.

Passo 4. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor de duplo tubo

Passo 5. Considere o isolamento do permutador de calor de duplo tubo contra perdas de calor.

Passo 6. Temperatura média de ambos os fluidos:

- Fluido quente (\bar{T}):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1.1)$$

- Fluido frio (\bar{t}):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (1.2)$$

Passo 7. Parâmetros físicos de ambos os fluidos à temperatura média:

A Tabela 3 apresenta as propriedades físicas que devem ser definidas para ambos os fluidos à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 3. Parâmetros físicos a definir para ambos os fluidos.

Parâmetro	Fluido quente	Fluido frio	Unidades
Densidade	ρ_h	ρ_c	kg/m ³

Viscosidade	μ_h	μ_c	Pa.s
Capacidade calorífica	Cp_h	Cp_c	kJ/kg. K
Condutividade térmica	k_h	k_c	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

Passo 8. Carga térmica (Q):

- Usando os dados para o fluido quente:

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.3)$$

- Usando os dados para o fluido frio:

$$Q = \frac{m_c}{3,600} \cdot Cp_c \cdot (t_2 - t_1) \quad (1.4)$$

Onde tanto como são dados em kg/h. $m_h m_c$

Passo 9. Caudal mássico de um curso de água:

- Caudal mássico do fluido quente:

$$m_h = \frac{Q}{Cp_h \cdot (T_1 - T_2)} \quad (1.5)$$

- Caudal mássico do fluido frio:

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (1.6)$$

Passo 10. Temperatura da parede do tubo (T_w):

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot (\bar{T} + \bar{t}) \quad (1.7)$$

Passo 11. Viscosidade de ambos os fluidos à temperatura da parede do tubo:

Fluido quente (μ_{hw}) [Pa.s].

Fluido frio (μ_{cw}) [Pa.s].

Passo 12. Área líquida de fluxo livre do tubo interior (A_{ct}):

$$A_{ct} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (1.8)$$

Passo 13. Velocidade do fluido do lado do tubo (v_t):

$$v_t = \frac{m_t}{\rho_t \cdot A_{ct}} \quad (1.9)$$

Onde é dada em kg/s. m_t

Passo 14. Número de Reynolds do fluido do lado do tubo (Re_t):

$$Re_t = \frac{\rho_t \cdot v_t \cdot d_i}{\mu_t} \quad (1.10)$$

Passo 15. Número de Prandtl do fluido do lado do tubo (Pr_t):

$$Pr_t = \frac{Cp_t \cdot \mu_t}{k_t} \quad (1.11)$$

Onde é dado em J/kg.K. Cp_t

Passo 16. Número de Nusselt para o fluido do lado do tubo (Re_t): Nu_t

- Fluxo laminar (< 2.300) Re_t

$$Nu_t = 1.86 \cdot (Re_t \cdot Pr_t)^{0.33} \cdot \left(\frac{d_i}{L_t}\right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14} \quad (1.12)$$

Válido para tubos lisos para as seguintes condições:

$$0,48 < < 16.700 Re_t \cdot Pr_t$$

$$0,0044 < < 9,75 \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14}$$

$$\left(Re_t \cdot Pr_t \cdot \frac{d_i}{L_t}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^{0.14} \geq 2$$

- Escoamento turbulento ($2.300 < < 10Re_t^4$) [Correlação de Gnielinski]:

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{2}\right) \cdot (Re_t - 1,000) \cdot Pr_t}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_t}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_t^{2/3} - 1)} \quad (1.13)$$

Onde é o fator de atrito de Fanning para o fluido do lado do tubo e é calculado usando a seguinte correlação: f_t

$$f_t = (1.58 \cdot \ln Re_t - 3.28)^{-2} \quad (1.14)$$

- Escoamento turbulento ($104 < < 5 \times 10Re_t^6$) [Correlação de Prandtl]:

$$Nu_t = \frac{\left(\frac{f_t}{2}\right) \cdot Re_t \cdot Pr_t}{1 + 8.7 \cdot \left(\frac{f_t}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_t - 1)} \quad (1.15)$$

Válido por $> 0,5 \cdot Pr_t$

Onde:

$$f_t = (1.58 \cdot \ln Re_t - 3.28)^{-2} \quad (1.14)$$

Passo 17. Coeficiente de transferência de calor para o fluido do lado do tubo (h_t):

$$h_t = \frac{Nu_t \cdot k_t}{d_i} \quad (1.16)$$

Passo 18. Área líquida de fluxo livre do anel (A_{ca}):

$$A_{ca} = \frac{\pi \cdot (D_i^2 - d_e^2)}{4} \quad (1.17)$$

Passo 19. Velocidade do fluido anular (v_a):

$$v_a = \frac{m_a}{\rho_a \cdot A_{ca}} \quad (1.18)$$

Passo 20. Diâmetro hidráulico (D_h):

$$D_h = D_i - d_e \quad (1.19)$$

Passo 21. Número de Reynolds do fluido anular (Re_a):

$$Re_a = \frac{\rho_a \cdot v_a \cdot D_h}{\mu_a} \quad (1.20)$$

Passo 22. Número de Prandtl do fluido anular (Pr_a):

$$Pr_a = \frac{Cp_a \cdot \mu_a}{k_a} \quad (1.21)$$

Onde é dado em J/kg.K. Cp_a

Passo 23. Número de Nusselt para o fluido anular (Nu_a):

- Fluxo laminar (< 2.300) Re_a

$$Nu_a = 1.86 \cdot (Re_a \cdot Pr_a)^{0.33} \cdot \left(\frac{D_h}{L_t}\right)^{0.33} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14} \quad (1.22)$$

Válido para tubos lisos para as seguintes condições:

$$0,48 < < 16.700 Re_a \cdot Pr_a$$

$$0,0044 < < 9,75 \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14}$$

$$\left(Re_a \cdot Pr_a \cdot \frac{D_h}{L_t}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^{0.14} \geq 2$$

- Escoamento turbulento ($2.300 < < 10Re_a^4$) [Correlação de Gnielinski]:

$$Nu_a = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right) \cdot (Re_a - 1,000) \cdot Pr_a}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_a}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_a^{2/3} - 1)} \quad (1.23)$$

Onde é o fator de atrito de Fanning para o fluido anular e é calculado usando a seguinte correlação: f_a

$$f_a = (1.58 \cdot \ln Re_a - 3.28)^{-2} \quad (1.24)$$

- Escoamento turbulento ($104 < < 5 \times 10Re_a^6$) [Correlação de Prandtl]:

$$Nu_a = \frac{\left(\frac{f_a}{2}\right) \cdot Re_a \cdot Pr_a}{1 + 8.7 \cdot \left(\frac{f_a}{2}\right)^{0.5} \cdot (Pr_a - 1)} \quad (1.25)$$

Válido por $> 0,5 \cdot Pr_a$

Onde:

$$f_a = (1.58 \cdot \ln Re_a - 3.28)^{-2} \quad (1.24)$$

Passo 24. Diâmetro equivalente para transferência de calor (D_e):

$$D_e = \frac{D_i^2 - d_e^2}{d_e} \quad (1.26)$$

Passo 25. Coeficiente de transferência de calor para o fluido anular (h_a):

$$h_a = \frac{Nu_a \cdot k_a}{D_e} \quad (1.27)$$

Passo 26. Coeficiente global de transferência de calor contaminado com base na área exterior do tubo interior (U_f):

$$U_f = \frac{1}{\frac{d_e}{d_i \cdot h_t} + \frac{d_e \cdot R_t}{d_i} + \frac{d_e \cdot \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2 \cdot k_m} + R_a + \frac{1}{h_a}} \quad (1.28)$$

Passo 27. Diferença de temperatura em média logarítmica (ΔT_m):

- Para fluxo paralelo:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \quad (1.29)$$

- Para o contrafluxo:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (1.30)$$

Passo 28. Área de superfície de transferência de calor (A_o):

$$A_o = \frac{Q \cdot 1,000}{U_f \cdot \Delta T_m} \quad (1.31)$$

Onde é dada em kW.Q

Passo 29. Área de transferência de calor por grampo (A_{hp}):

$$A_{hp} = 2 \cdot \pi \cdot d_e \cdot L_t \quad (1.32)$$

Passo 30. Número de ganchos (N_h):

$$N_h = \frac{A_o}{A_{hp}} \quad (1.33)$$

Passo 31. Coeficiente global de transferência de calor limpo com base na área exterior de transferência de calor (U_c):

$$U_c = \frac{1}{\frac{d_e}{d_i \cdot h_t} + \frac{d_e \cdot \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right)}{2 \cdot k_m} + \frac{1}{h_a}} \quad (1.34)$$

Passo 32. Fator de limpeza (CF):

$$CF = \frac{U_f}{U_c} \quad (1.35)$$

Passo 33. Total de faltas (R_{ft}):

$$R_{ft} = \frac{1 - CF}{U_c \cdot CF} \quad (1.36)$$

Passo 34. Percentagem sobre a superfície (OS):

$$OS = 100 \cdot U_c \cdot R_{ft} \quad (1.37)$$

Queda de pressão e potência de bombeamento

Passo 35. Queda de pressão por fricção do fluido do lado do tubo (Δp_t):

$$\Delta p_t = 4 \cdot f_t \cdot \frac{2 \cdot L_t}{d_i} \cdot N_h \cdot \frac{\rho_t \cdot v_t^2}{2} \quad (1.38)$$

Onde para o fluxo laminar (< 2.300): Re_t

$$f_t = \frac{16}{Re_t} \quad (1.39)$$

Correção do fator de atrito de Fanning para o fluxo laminar

$$f_{ct} = f_t \cdot \left(\frac{\mu_t}{\mu_{tw}}\right)^m \quad (1.40)$$

Onde $m = -0,58$ para aquecimento e $-0,50$ para arrefecimento sob fluxo laminar.

Passo 36. Potência de bombagem para o fluido do lado do tubo (P_t):

$$P_t = \frac{\Delta p_t \cdot m_t}{\eta_p \cdot \rho_t} \quad (1.41)$$

Onde é dada em kg/s e é a eficiência isentrópica da bomba. $m_t \eta_p$

Passo 37. Queda de pressão por fricção do fluido anular (Δp_a):

$$\Delta p_a = 4 \cdot f_a \cdot \frac{2 \cdot L_t}{D_h} \cdot \rho_a \cdot \frac{v_a^2}{2} \cdot N_h \quad (1.42)$$

Onde para o fluxo laminar (< 2.300): Re_a

$$f_a = \frac{16}{Re_a} \quad (1.43)$$

Correção do fator de atrito de Fanning para o fluxo laminar

$$f_{ca} = f_a \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_{aw}}\right)^m \quad (1.44)$$

Onde $m = -0,58$ para aquecimento e $-0,50$ para arrefecimento sob fluxo laminar.

Passo 38. Potência de bombeamento para o fluido anular (P_a):

$$P_a = \frac{\Delta p_a \cdot m_a}{\eta_p \cdot \rho_a} \quad (1.45)$$

Onde é dada em kg/s e é a eficiência isentrópica da bomba. $m_a \eta_p$

Custo do equipamento adquirido

De acordo com [22], o custo do equipamento adquirido para um DPHE é calculado usando a seguinte correlação:

$$C_{DPHE}^{2007} = 1,600 + 2,100 \cdot A_o^{1,0} \quad (1.46)$$

Onde:

- C_{DPHE}^{2007} - Custo do equipamento adquirido pelo DPHE referido a janeiro de 2007 (USD \$).

- A_o - Área de transferência de calor da DPHE, calculada no Passo 28 (m²).

Mais tarde, este custo do equipamento adquirido, calculado pela equação (1,46), é atualizado para março de 2025 utilizando o Índice de Custos das Fábricas de Engenharia Química correspondente a março de 2025 e aplicando a seguinte equação:

$$C_{DPHE}^{2025} = C_{DPHE}^{2007} \cdot \frac{CEPCI^{2025}}{CEPCI^{2007}} \quad (1.47)$$

Onde:

- C_{DPHE}^{2025} - Custo do equipamento adquirido do DPHE referido a maio de 2025 (USD \$).
- C_{DPHE}^{2007} - Custo do equipamento adquirido pela DPHE até janeiro de 2007 (USD \$).
- $CEPCI^{2025}$ - Índice de Custos de Plantas de Engenharia Química referido em maio de 2025 = 806,8 [23].
- $CEPCI^{2007}$ - Índice de Custos das Fábricas de Engenharia Química referido a janeiro de 2007 = 509,7 [22].

3. Análise e interpretação dos resultados. 3,1 por cento sobre a superfície.

Passo 1. Definição dos parâmetros iniciais para os fluxos:
A tabela seguinte (Tabela 4) apresenta os valores dos parâmetros iniciais a definir para ambos os fluxos.

Tabela 4. Valores dos parâmetros iniciais a definir para ambos os fluxos.

Parâmetro	Fluido quente (Leite)		Fluido frio (Água)		Unidades
	Símbolo	Valor	Símbolo	Valor	
Caudal mássico	m_h	4,320	m_c	-	kg/h
Temperatura de entrada	T_1	60	t_1	2	°C
Temperatura de saída	T_2	10	t_2	8	°C
Queda máxima de pressão permitida	ΔP_{mh}	85,000	ΔP_{mc}	85,000	Pa
Fator de falta	R_h	0.0001 ^δ	R_c	0.000176 ^φ	M2. K/W

Fonte: Explicação própria.

^δ Retirado de [14].

^φ Retirado de [15].

Passo 2. Definição das dimensões geométricas dos ganchos:

A Tabela 5 mostra os valores das dimensões geométricas a definir para os ganchos.

Tabela 5. Valores das dimensões geométricas a definir para os ganchos.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
Duração	L_t	3	m
Anel de diâmetro interno	D_i	0.05250 ^φ	m
Diâmetro interno do tubo interior	d_i	0.02664 ^φ	m
Câmara interior de diâmetro externo	d_e	0.03340 ^φ	m
Material metálico de condutividade térmica do tubo interior	k_m	52	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

^φ Segundo [15].

Passo 3. Definição do arranjo de fluxo dentro do permutador de calor de tubo duplo:

Os fluidos fluirão sob arranjo de contrafluxo dentro do DPHE.

Passo 4. Alocação de fluidos dentro do permutador de calor de tubo duplo.

Como sugerido por [14] e [22], o fluido quente (leite) estará localizado no anular, enquanto o fluido frio (água) estará localizado no tubo interior.

Passo 5. Considere o isolamento do permutador de calor de duplo tubo contra perdas de calor.

O permutador de calor será termicamente isolado para evitar perdas excessivas de calor.

Passo 6. Temperatura média de ambos os cursos de água (ribeiros):

- Fluido quente (leite) (\bar{T}):

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{60 + 10}{2} = 35 \text{ °C} \quad (1.1)$$

- Fluido frio (água) (\bar{t}):

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{2 + 8}{2} = 5 \text{ °C} \quad (1.2)$$

Passo 7. Parâmetros físicos de ambos os fluidos à temperatura média:

De acordo com [24,25,26], tanto o leite como a água têm os parâmetros físicos apresentados na Tabela 6 à temperatura média calculada no passo anterior.

Tabela 6. Valores dos parâmetros físicos do leite e da água.

Parâmetro	Fluido quente (Leite)	Fluido frio (Água)	Unidades
-----------	-----------------------	--------------------	----------

	Símbolo	Valor	Símbolo	Valor	
Densidade	ρ_h	1,013	ρ_c	999.97	kg/m ³
Viscosidade	μ_h	0.00106	μ_c	0.00152	Pa.s
Capacidade calorífica	Cp_h	3.919	Cp_c	4.205	kJ/kg.K
Condutividade térmica	k_h	0.580	k_c	0.571	W/m.K

Fonte: Explicação própria.

Passo 8. Carga térmica (Q):

- Usando os dados para o fluido quente (leite):

$$Q = \frac{m_h}{3,600} \cdot Cp_h \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.3)$$

$$Q = \frac{4,320}{3,600} \cdot 3.919 \cdot (60 - 10) = 235.14 \text{ kW}$$

Onde é dado em kg/h. m_h

Passo 9. Caudal mássico de um curso de água:

- Caudal mássico do fluido frio (água):

$$m_c = \frac{Q}{Cp_c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{235.14}{4.205 \cdot (8 - 2)} = 9.32 \text{ kg/s} \quad (1.6)$$

Passo 10. Temperatura da parede do tubo (T_w):

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot (\bar{T} + \bar{t}) = \frac{1}{2} \cdot (35 + 5) = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1.7)$$

Passo 11. Viscosidade de ambos os fluidos à temperatura da parede do tubo:

Segundo [25,26], tanto o leite como a água apresentam os seguintes valores de viscosidade em $= 20 \text{ }^\circ\text{C}$. T_w

- Fluido quente (leite) (μ) [Pa.s] = 0,00205 Pa.s μ_{hw}
- Fluido frio (μ) [Pa.s] = 0,00100 Pa.s μ_{cw}

Passo 12. Área líquida de fluxo livre do tubo interior (A_{ct}):

$$A_{ct} = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.02664^2}{4} = 0.00056 \text{ m}^2 \quad (1.8)$$

Como o fluido frio (água) fluirá pelo tubo interior, e o fluido quente (leite) fluirá pelo anel, a seguinte nova nomenclatura apresentada na Tabela 7 será aplicada para os caudais, parâmetros físicos e fatores de incrustação de ambos os cursos de água.

Tabela 7. Nova nomenclatura a ser aplicada para ambos os ramos.

Parâmetro	Fluido quente (leite)		Fluido frio (água)	
	Nomenclatura anterior	Nova nomenclatura	Nomenclatura anterior	Nova nomenclatura
Caudal	m_h	m_a	m_c	m_t
Densidade	ρ_h	ρ_a	ρ_c	ρ_t

	μ_h	μ_a	μ_c	μ_t
Viscosidade				
Capacidade calorífica	Cp_h	Cp_a	Cp_c	Cp_t
Condutividade térmica	k_h	k_a	k_c	k_t
Fator de falta	R_h	R_a	R_c	R_t

Fonte: Explicação própria.

A Tabela 8 mostra os valores dos parâmetros incluídos nos passos 13-25.

Tabela 8. Valores dos parâmetros incluídos nos passos 13-25.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
13	Velocidade do fluido do lado do tubo (água)	v_t	16.64	m/s
14	Número de Reynolds do fluido do lado do tubo (água)	Re_t	291,629	-
15	Número de Prandtl do fluido do lado do tubo (água)	Pr_t	11.19	-
16	Fator de fricção do ventilador para o fluido do lado do tubo (água)	f_t	0.00362	-
17	Número de Nusselt para o fluido do lado do tubo (água) ¹	Nu_t	1,237.84	-
17	Coefficiente de transferência de calor para o fluido do lado do tubo (água)	h_t	26,531.78	W/m ² . K
18	Área líquida de fluxo livre do anel	A_{ca}	0.00129	M2
19	Velocidade do fluido do anel (leite)	v_a	0.92	m/s

20	Diâmetro hidráulico	D_h	0.0191	m	do tubo interior				
21	Número de Reynolds do fluido do anel (leite)	Re_a	16,796	-	Diferença média logarítmica de temperatura ¹	ΔT_m	23.51	°C	
22	Número de Prandtl do fluido anular (leite)	Pr_a	7.16	-	Área de superfície de transferência de calor	A_o	12.92	M2	
23	Fator de fricção do leque para o fluido do anel (leite)	f_a	0.00684	-	Área de transferência de calor por gancho de cabelo	A_{hp}	0.629	M2	
24	Número de Nusselt para o fluido do anel (leite) ²	Nu_a	99.49	-	Número de alfinetes	N_h	21	-	
25	Diâmetro equivalente para transferência de calor	D_e	0.0491	m	Coefficiente global de transferência de calor limpo com base na área exterior de transferência de calor	U_c	1,030.11	W/m ² . K	
	Coefficiente de transferência de calor para o fluido do anel (leite)	h_a	1,175.24	W/m ² . K	Fator de limpeza	CF	0.752	-	
					Faltas totais	R_{ft}	0.00032	M2. K/W	
					Porcentagem sobre a superfície	OS	32.96	%	

Fonte: Explicação própria.

¹Como $104 < 5 \times 10Re_t^6$, o fluido do lado do tubo (água) flui sob regime turbulento, pelo que a correlação de Prandtl (equação 1.15) foi usada para calcular o número de Nusselt para este fluido. Esta equação também é válida porque $11,19 > 0,5.Pr_t$

²Como $104 < 5 \times 10Re_a^6$, o fluido do lado anular (leite) flui sob regime turbulento, pelo que a correlação de Prandtl (equação 1.25) será usada para calcular o número de Nusselt para este fluido. Esta equação também é válida porque $7,16 > 0,5.Pr_a$

A Tabela 9 revela os valores dos parâmetros incluídos nos passos 26-34.

Tabela 9. Valores dos parâmetros incluídos nos passos 26.-34.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
26	Coefficiente global de transferência de calor contaminado com base na área exterior	U_f	774.31	W/m ² . K

Fonte: Explicação própria.

¹ Para disposição de contrafluxo.

3.2. Queda de pressão e potência de bombeamento.

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros incluídos nos passos 35-38.

Mesa 10. Valores dos parâmetros incluídos nos passos 35-38.

Passo	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidades
35	Queda de pressão por fricção do fluido do lado do tubo (água)	Δp_t	9,481,246	Pa

36	Potência de bombagem para o fluido do lado do tubo (água) ¹	P_t	110.5	kW
37	Queda de pressão por fricção do fluido anular (leite)	Δp_a	77,392	Pa
38	Potência de bombagem para o fluido do anel (leite) ¹	P_a	114.58	W

Fonte: Explicação própria.

Foi selecionado um valor de 1A de 0,80 para a eficiência isentrópica da bomba [15].

3.3. Custo do equipamento adquirido

Usando a equação (1,46) e para um valor da área de transferência de calor de 12,92 m², o custo do equipamento adquirido do DPHE projetado, com base em janeiro de 2007, é:

$$C_{DPHE}^{2007} = 1,600 + 2,100 \cdot A_o^{1.0} \quad (1.46)$$

$$= USD \$ 28,732$$

$$C_{DPHE}^{2007} \approx 28,800$$

Assim, o custo adquirido do DPHE projetado, referido em maio de 2025, é:

$$C_{DPHE}^{2025} = C_{DPHE}^{2007} \cdot \frac{CEPCI^{2025}}{CEPCI^{2007}} = 28,800 \cdot \frac{806.8}{509.7} \quad (1.47)$$

$$C_{DPHE}^{2025} = USD \$ 45,588 \approx 45,600$$

4. Discussão

A carga térmica tinha um valor relativamente elevado de 235,14 kW, enquanto é necessário um caudal mássico de 9,32 kg/s para a água refrigerada, o que pode ser considerado elevado. Isto deve-se ao baixo valor necessário para a temperatura de saída do jato de água gelada (8 °C), que reduziu a diferença de temperatura do fluido frio (= = 6 °C), enquanto o valor algo elevado do caudal do leite líquido (4.320 kg/h ou 1,2 kg/s) e a diferença relativamente elevada de temperatura do fluxo de leite (= = 50 °C) também influenciam o valor relativamente elevado da carga térmica, o que, por sua vez, afeta o valor elevado obtido para o caudal mássico da água arrefecida, como mostrado pela equação (1.6). Em [15], o valor da carga térmica era de 87,1 kW para um DPHE água-água. $\Delta t t_2 - t_1 \Delta T T_1 - T_2$

O valor da velocidade do fluido do lado do tubo (água gelada) é elevado (16,64 m/s), devido ao elevado valor obtido para o caudal de massa da água refrigerada. Este valor da velocidade da água arrefecida é 18 vezes superior ao valor calculado da velocidade (0,92 m/s) para o fluido do anel (leite), e está muito acima do intervalo recomendado reportado por [22] para a velocidade da água em permutadores tubulares de calor (1,5-2,5 m/s).

O número de Reynolds do fluido do lado do tubo (água gelada) era 291.629, o que é 17,4 vezes superior ao número de Reynolds (16.796) do fluido do anel (leite). Este valor elevado obtido para o número de Reynolds do fluxo de água gelada ocorre essencialmente devido ao valor elevado da velocidade obtida para este fluido. Este resultado concorda com o DPHE água-água sem aletas desenhado em [15], onde o valor do número de Reynolds do fluido do lado do tubo (159.343) é superior ao número de Reynolds do fluido anular (15.201).

No caso do número de Prandtl, o valor deste parâmetro para a água refrigerada (11,19) foi 1,56 vezes superior ao número de Prandtl para o leite (7,16). Isto deve-se fundamentalmente ao valor mais elevado da capacidade calorífica (4.205 J/kg. K) e a viscosidade (0,00152 Pa.s) obtida para a água em comparação com os valores destes parâmetros para o leite, que foram 3.919 J/kg para a capacidade calorífica e 0,00106 Pa.s para a viscosidade.

Em [1] o número de Prandtl do fluido do lado do tubo (água do mar) a uma temperatura de 25 °C, para arrefecer um jato de óleo de motor num DPHE, era 6,29, com um valor para a capacidade térmica específica e viscosidade de 4.004 J/kg. K e 0,000964 Pa.s, respetivamente. Da mesma forma, em [15] o número de Prandtl de água fria a 27,5 °C, para ser aquecida por água quente num DPHE, foi de 5,77, com um valor para a capacidade térmica específica e viscosidade de 4.179 J/kg. K e 0,000841 Pa.s, respetivamente.

Relativamente ao número de Nusselt, o fluido do lado do tubo (água gelada) tinha um valor de 1.237,84 para este parâmetro, que era 12,44 vezes superior ao valor do número de Nusselt (99,49) para o fluido anular (leite). Considerando que a mesma equação (correlação de Prandtl) foi empregue para calcular o número de Nusselt para ambos os cursos de água, o valor mais alto obtido deste parâmetro para a água arrefecida deve-se aos valores mais elevados que o fluxo de água refrigerada apresenta para os números de Reynolds e Prandtl, em comparação com os valores mais baixos destes parâmetros para o fluxo de leite. Estes resultados coincidem com os relatados por [1], onde o número de Nusselt do fluido do lado do tubo (água do mar) variou entre 422,0330 e 634,7506, que foi superior ao número de Nusselt (34,692) do fluido anular (óleo do motor).

De forma semelhante, também concordam com os resultados reportados por [15], onde o número de Nusselt (375,3) para o fluido do lado do tubo (água quente) é superior ao número de Nusselt (89,0) do fluido do anular (fluido frio). Vale a pena mencionar que todos estes autores também utilizaram a correlação de Prandtl aplicada no nosso estudo para calcular o número de Nusselt para ambos os fluxos.

O coeficiente de transferência de calor (26.531,78 W/m². K) para a água (fluido do lado do tubo) foi 22,57 vezes superior ao valor do coeficiente de transferência de calor (1.175,24 W/m². K) para o leite (fluido anular). Este resultado é

diretamente influenciado pelo valor mais elevado do número de Nusselt que a água arrefecida apresenta em relação ao valor do número de Nusselt para o leite.

Estes resultados coincidem com os relatados por [1], onde os valores dos coeficientes de transferência de calor para o fluido do lado do tubo (água do mar) variaram entre 12.885 – 19.379 W/m². K e eram superiores ao valor do coeficiente de transferência de calor (64,549 W/m². K) para o fluido anular (óleo de motor). Da mesma forma, os nossos resultados são semelhantes aos reportados por [15] onde o coeficiente de transferência de calor (4.911 W/m². K) do fluido do lado do tubo (água quente) é 3,65 vezes superior ao coeficiente de transferência de calor para o anel (1.345 W/m². K).

O valor da queda de pressão do fluido do lado do tubo (água gelada) é bastante elevado (9.481.246 Pa) e está bem acima do limite máximo permitido estabelecido pelo sistema de transferência de calor (85.000 Pa). Isto ocorre fundamentalmente devido ao alto valor da velocidade obtida para este fluido (16,64 m/s) e ao número relativamente elevado de ganchos (21). Este elevado valor da queda de pressão para a água arrefecida influencia o valor significativo da potência de bombagem obtida para este fluido (110,5 kW). Por outro lado, a queda de pressão calculada para o fluido anular (leite, 77.392 Pa) está abaixo do máximo permitido pelo sistema, exigindo assim uma potência de bombagem de 114,58 W.

Como referido em [15], quando um volume significativo de fluido se move através do tubo ou do anel de um DPHE, a queda de pressão pode exceder os níveis aceitáveis devido às elevadas velocidades de fluxo, o que se aplica à nossa investigação. Nestas situações, é aconselhável dividir o escoamento mássico em vários fluxos paralelos, enquanto o lado do caudal mássico mais baixo pode ser colocado numa configuração em série. Consequentemente, o sistema será organizado numa disposição em série paralela.

De forma semelhante, [14] aponta que um aumento na velocidade do fluido resulta em maiores quedas de pressão e, se o permutador de calor tiver de ser integrado num processo existente, o projetista deve cumprir a queda máxima de pressão permitida para ambos os fluxos. Esta referência também indica que, se a queda de pressão calculada for demasiado elevada, será necessário aumentar a área de fluxo, seja aumentando o diâmetro dos tubos ou adicionando mais ramos paralelos. Por outro lado, se a queda de pressão determinada for menor do que o permitido, reduzir a área de fluxo pode ser uma opção. Em qualquer dos cenários, o processo de conceção precisa de ser reiniciado.

Este autor enfatiza ainda que uma área de fluxo menor para ambos os fluidos (e, conseqüentemente, um diâmetro reduzido do tubo) conduz a um aumento da velocidade e dos coeficientes de transferência de calor, mas também provoca maiores quedas de pressão. Ele recomenda, como passo inicial, escolher o diâmetro do tubo com base nas

velocidades do fluido, sugerindo velocidades de 1-2 m/s para líquidos com baixa viscosidade, e também propondo que, quando o comprimento final for conhecido, se possa calcular a queda de pressão para cada fluido, o que pode exigir ajustes nos diâmetros escolhidos dos tubos.

Em [15] a queda de pressão do fluido do lado do tubo é de 460,1 Pa, exigindo assim uma potência de bombagem de 0,84 W, enquanto a queda de pressão do fluido anular é de 2.876,4 Pa, exigindo assim uma potência de bombagem de 5,0 W. Em [1], a queda de pressão e a potência de bombeamento do fluido do lado do tubo (água do mar) para o tipo de projeto DPHE limpo sem aletas são de 9.376,4 kPa e 27,468 kW, respetivamente, enquanto os valores destes parâmetros para o tipo de projeto DPHE sem aletas e enrebaixadas são, respetivamente, 9.597 kPa e 28,114 kW. Esta referência também indica que a queda de pressão e a potência de bombeamento para o fluido anular (óleo de motor) no tipo de DPHE limpo sem aletas são de 42,237 MPa e 298,193 kW, respetivamente, enquanto os valores destes parâmetros para o tipo de DPHE sem aletas e enredadas são 43,231 MPa e 305,211 kW, respetivamente.

Por fim, o DPHE projetado custará cerca de USD \$45.600 em maio de 2025.

5. Conclusões.

Neste artigo, foi concebido um permutador de calor de duplo tubo sem aletas do ponto de vista termo-hidráulico, para realizar o arrefecimento de um jato líquido de leite de vaca usando água fria como refrigerante.

O fluido quente (leite) localizava-se no anulus, enquanto o fluido frio (água fria) encontrava-se no tubo interior. Vários desenhos; foram calculados parâmetros geométricos e operacionais para o DPHE, como a área de transferência de calor (12,92m²), o número total de ganchos (21), o fator de limpeza (0,752) e a percentagem sobre a superfície (32,96%), que podem ser considerados aceitáveis e adequados. Foi obtido um valor elevado do caudal mássico necessário da água refrigerada, totalizando 9,32 kg/s.

Da mesma forma, a queda de pressão do fluido do lado do tubo é bastante elevada (9.481.246 Pa) e ultrapassa a queda máxima de pressão permitida pelo processo de troca de calor para ambos os fluxos (85.000 Pa), enquanto a queda de pressão do fluido anular (77.392 Pa) está abaixo deste limite máximo permitido. O valor elevado obtido para a queda de pressão do fluido do lado do tubo aumenta a potência de bombagem necessária para este fluido para um valor significativo (110,5 kW), enquanto o valor necessário da potência de bombagem para o fluido anular é de 114,58 W. Concluiu-se que o DPHE concebido neste estudo não pode ser implementado com sucesso neste sistema de troca de calor devido aos elevados valores de queda de pressão e potência de bombagem obtidos para o fluido do lado do tubo (água refrigerada). O DPHE projetado custará cerca de USD \$ 45.600 com base em maio de 2025. Recomenda-se

umentar o diâmetro de ambos os tubos e redesenhar o DPHE sem aletas para diminuir a queda de pressão do fluido do lado do tubo para um valor abaixo do limite mínimo permitido pelo sistema de transferência de calor para este parâmetro.

6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização Formal: Amaury Pérez Sánchez.
2. Curadoria de dados: Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, Zamira María Sarduy Rodríguez.
3. Análise formal: Amaury Pérez Sánchez, María Isabel La Rosa Veliz, Lizthalía Jiménez Guerra.
4. Aquisição de fundos: Não aplicável.
5. Investigação: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, María Isabel La Rosa Veliz
6. Metodologia: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Lizthalía Jiménez Guerra.
7. Gestão de projetos: Não aplicável.
8. Recursos: Não aplicável.
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.
11. Validação: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila, Heily Victoria González, Zamira María Sarduy Rodríguez.
12. Ecrã: Não aplicável.
13. Redação - rascunho original: Heily Victoria González, María Isabel La Rosa Veliz, Zamira María Sarduy Rodríguez, Lizthalía Jiménez Guerra.
14. Escrita - revisão e edição: Amaury Pérez Sánchez, Laura de la Caridad Arias Aguila.

7.- Referências.

- [1] C. Ezgi e Ö. Akyol, "Design térmico de permutador de calor de duplo tubo usado como arrefecedor de óleo em navios: um estudo de caso comparativo," *Journal of Ship Production and Design*, vol. 35, nº 1, pp. 12-18, 2019. <http://dx.doi.org/10.5957/JSPD.170009>
- [2] N. Kocyigit e H. Bulgurcu, "Modelação do coeficiente global de transferência de calor de um permutador de calor concêntrico duplo com dados experimentais limitados usando encaixe de curvas e combinação ANN," *Thermal Science*, vol. 23, nº 6A, pp. 3579-3590, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCI171206111K>
- [3] N. Kumar e A. Bhandari, "Design e Análise Térmica de Permutador de Calor de Duplo Tubo Alterando a Taxa de Fluxo Mássico," *International Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 10, nº 5, pp. 1-4, 2022.
- [4] S. Kotian, N. Methekar, N. Jain e P. Naik, "Transferência de Calor e Fluxo de Fluidos num Permutador de Calor de Dupla, Parte I: Investigação Experimental," *Asian Review of Mechanical Engineering*, vol. 9, nº 2, pp. 7-15, 2020. <https://doi.org/10.51983/arme-2020.9.2.2482>
- [5] S. Alhulaifi, "Análise Computacional de Transferência de Calor em Dinâmica dos Fluidos de Permutadores de Calor e Características de Fluxo de Duplo Tubo usando Nanofluido TiO₂ com Água" *Designs*, vol. 8, p. 39, 2024. <https://doi.org/10.3390/designs8030039>
- [6] Rakesh, C. Nallode, M. Adhvaith e A. H. A. Krishna, "Design e Análise de Desempenho de Permutador de Calor de Duplo Tubagem," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 6, nº 7, pp. 12578-12584, 2017. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2017.0607017>
- [7] Rahman, "Aumento de Desempenho Térmico do Permutador de Calor de Dupla-Tubo - Uma Revisão Crítica," *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, vol. 12, nº 24, pp. 227 – 246, 2025. <https://doi.org/10.22075/JHMTR.2024.34771.1581>
- [8] E. Ebierto, R. R. Ana, O. E. Nyong e E. G. Saturday, "Projeto e Construção de um Permutador de Calor de Duplo Tubo para Aplicação Laboratorial," *European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 5, nº 11, pp. 1-6, 2020. <http://dx.doi.org/10.24018/ejers.2020.5.11.1950>
- [9] S. Tazegül, M. Bitkin, A. N. Öztekin, A. Korkmaz, Ö. S. Şahin, e O. Babayigit, "Design e Otimização de Desempenho de Trocadores de Calor do Tipo Dupla-Tubo Baseados em CFD e Análises Econômicas - Um Estudo Numérico," *Journal of Engineering and Sciences*, vol. 2, nº 2, pp. 100-110, 2024.
- [10] J. Havlik, T. Dluohy e J. Krempasky, "Transferência de Calor em Permutadores de Calor de Duplo Tubo com Espaçamento de Tubos Pequenos," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 147, pp. 1-10, 2025. <https://doi.org/10.1115/1.4066930>
- [11] Peccini, J. C. Lemos, A. L. H. Costa e M. J. Bagajewicz, "Projeto Ótimo de Estruturas de Permutadores de Calor de Duplas Tubagens," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 58, pp. 12080-12096, 2019. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b01536>
- [12] P. K. Swamee, N. Aggarwal e V. Aggarwal, "Projeto ótimo de permutador de calor duplo de tubagem," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, pp. 2260-2266, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.028>
- [13] L. M. Nahes, M. J. Bagajewicz e A. L. H. Costa, "Otimização de Projeto de Permutadores de Calor de Dupla-Tubo Usando um Modelo Discretizado," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 60, p. 17611-17625, 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02455>
- [14] E. Cao, *Transferência de calor em engenharia de processos*. Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill, 2010.
- [15] S. Kakaç, H. Liu, e A. Pramuanjaroenkij, *Trocadores de Calor - Seleção, Classificação e Design Térmico*, 3.ª ed. Boca Raton, EUA: Taylor & Francis Group, LLC, 2012. <https://doi.org/10.1201/b11784>
- [16] M. Flynn, T. Akashige e L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*, 2.ª ed. Beverly, EUA: Scrivener Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119364825>
- [17] N. Nwokolo, P. Mukumba e K. Obileke, "Avaliação do Desempenho Térmico de um Permutador de Calor de Duplo Tubo Instalado num Sistema de Gaseificação de Biomassa," *Journal of Engineering and Sciences*, pp. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6762489>
- [18] F. Joshua, "Design e Construção de um Permutador de Calor de Tubos Concêntricos," *AU J.T.*, vol. 13, nº 2, pp. 128-133, 2009.
- [19] Venkatesh et al., "Otimização de Projeto de Permutador de Calor Duplo de Contrafluxo Usando Algoritmo de Otimização Híbrida," *Processes*, vol. 11, p. 1674, 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11061674>
- [20] R. Gutiérrez, A. A. D. L. Rosa, L. V. Benítez, R. Serrano e Y. Aguilera, "Determinação dos Parâmetros Térmicos de um Permutador de Calor de Tubos Concêntricos com Fluidos de Vapor Orgânico," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 26, nº 4, pp. 76-88, 2017.
- [21] K. Silaipillayarputhur, T. A. Mughanam, A. A. Mojil e M. A. Dhמוש, "Análise Analítica e Numérica de Concêntricos de Trocadores de Calor de Tubos – Uma Revisão," *IOP Conf. Series: Ciência e Engenharia de Materiais*, vol. 272, p. 012006, 2017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/272/1/012006>
- [22] R. Sinnott e G. Towler, *Design de Engenharia Química*, 6.ª ed. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2020.
- [23] S. Jenkins, "Indicadores Econômicos," *Chemical Engineering*, vol. 132, nº 9, p. 56, 2025.
- [24] P. Parmar et al., "O Efeito das Alterações Composicionais Devido à Variação Sazonal na Densidade do Leite e a Determinação dos Fatores de Conversão de Densidade Baseados na Estação para Utilização na Indústria Láctea," *Foods*, vol. 9, p. 1004, 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9081004>
- [25] P. F. Fox e P. L. H. McSweeney, *Química e Bioquímica de Laticínios*, 1.ª ed. Londres, Reino Unido: Blackie Academic & Professional, 1998.
- [26] ChemicalLogic, "Propriedades Termodinâmicas e de Transporte da Água e do Vapor," 2.0 ed. Burlington, EUA: ChemicalLogic Corporation, 2003.

Nomenclatura.

A_o	Área de superfície de transferência de calor	M2
A_{ca}	Área líquida de fluxo livre do anel	M2
A_{ct}	Área líquida de fluxo livre do tubo interior	M2
A_{hp}	Área de superfície de transferência de calor	M2
C_p	Capacidade calorífica	kJ/kg. K
CF	Fator de limpeza	-
d_e	Câmara interior de diâmetro externo	m
d_i	Diâmetro interno do tubo interior	m
D_e	Diâmetro equivalente para transferência de calor	m
D_h	Diâmetro hidráulico	m
D_i	Anel de diâmetro interno	m
f	Fator de atrito do leque	-
f_c	Fator de atrito de leque corrigido	-
h	Coefficiente de transferência de calor	W/m ² . K
k	Condutividade térmica	W/m.K
k_m	Material metálico de condutividade térmica do tubo interior	W/m.K
L_t	Comprimento do tubo	m
m	Caudal mássico	kg/h
m	Fator	-
N_h	Número de alfinetes	-
Nu	Número de Nusselt	-
OS	Porcentagem sobre a superfície	%
P	Potência de bombagem	kW ou W
Pr	Número de Prandtl	-
Δp	Queda de pressão por fricção	Pa
ΔP_m	Queda máxima de pressão permitida	Pa
Q	Carga térmica	kW
R	Fator de falta	M2. K/W
Re	Número de Reynolds	-
R_{ft}	Faltas totais	M2. K/W
t	Fluido frio de temperatura	°C
\bar{t}	Temperatura média do fluido frio	°C
T	Fluido quente de temperatura	°C
T_w	Temperatura da parede do tubo	°C
\bar{T}	Fluido quente a temperatura média	°C
ΔT_m	Diferença de temperatura média logarítmica	°C
U_c	Coefficiente global de transferência de calor limpo	W/m ² . K
U_f	Coefficiente global de transferência de calor contaminado	W/m ² . K
v	Velocidade	m/s

Símbolos gregos

ρ	Densidade	kg/m ³
μ	Viscosidade	Pa.s
μ_w	Viscosidade do fluido à temperatura da parede do tubo	Pa.s
η_p	Eficiência isentrópica da bomba	-

Subíndices

1	Entrada
2	Saída
a	Fluido anular
c	Fluido frio
h	Fluido quente
t	Fluido do lado do tubo

Análise comparativa da distribuição granulométrica de grãos moídos em moinho de bolas e moinho de martelos.

Análisis comparativo de la distribución granulométrica de granos molidos en molino de bolas y molino de martillos.

Stefanie Bonilla Bermeo ^{1*}; Fernando Noblecilla Arévalo ²; Iván Torres Tapia ³; Carlos Valdiviezo Rogel ⁴

Recebido: 25/10/2025 – Aceite: 05/12/2025 – Publicado: 01/01/2026

Artigos de
Investigação

Artigos de
Revisão

Artigos de
Ensaio

* Autor
correspondente.



Esta obra está licenciada sob uma licença internacional Creative Commons Atribuição-NãoComercial-Partilha Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Os autores mantêm os direitos sobre os seus artigos e podem partilhar, copiar, distribuir, executar e comunicar publicamente a obra, desde que a autoria seja reconhecida, não utilizada para fins comerciais e que a mesma licença seja mantida em obras derivadas.

Resumo.

A moagem de grãos é fundamental em processos industriais, onde a distribuição granulométrica resultante afeta diretamente a qualidade do produto. O objetivo foi comparar a distribuição granulométrica do milho e da soja processados em moinho de martelo, moinho de bolas e sua combinação. Amostras de milho e soja foram moídas utilizando três configurações: moinho de martelo, moinho de bolas e a sequência de ambos. O material obtido foi peneirado, determinando-se as percentagens retidas por malha e calculando-se os diâmetros característicos (D10, D50, D90). Além disso, foi realizada uma análise microscópica das partículas e ANOVA para avaliar diferenças significativas. O moinho de martelo produziu distribuições grossas e heterogêneas, especialmente na soja (D50 ≈ 2,9 mm). O moinho de bolas gerou uma maior percentagem de finos no milho (D50 ≈ 1,38 mm), mas foi ineficaz para a soja (D50 ≈ 3,53 mm). A combinação de moinhos alcançou a distribuição mais uniforme para ambos os grãos (D50 ≈ 1,05-1,25 mm). A ANOVA não detectou diferenças globais significativas, embora tenham sido observadas disparidades morfológicas e de distribuição na análise por peneiras. A combinação de moinhos otimizou a distribuição granulométrica, superando as limitações de cada equipamento separadamente..

Palavras-chave.

Distribuição do tamanho das partículas, moinho de martelo, moinho de bolas, moinho de milho, moinho de soja.

Resumen.

La molienda de granos es fundamental en procesos industriales, donde la distribución granulométrica resultante incide directamente en la calidad del producto. El objetivo fue comparar la distribución granulométrica de maíz y soja procesados en molino de martillo, molino de bolas y su combinación. Se molieron muestras de maíz y soja utilizando tres configuraciones: molino de martillo, molino de bolas y la secuencia de ambos. El material obtenido se tamizó, determinándose los porcentajes retenidos por malla y calculándose los diámetros característicos (D10, D50, D90). Adicionalmente, se realizó análisis microscópico de partículas y ANOVA para evaluar diferencias significativas. El molino de martillo produjo distribuciones gruesas y heterogéneas, especialmente en soja (D50 ≈ 2.9 mm). El molino de bolas generó un mayor porcentaje de finos en maíz (D50 ≈ 1.38 mm), pero fue ineficaz para soja (D50 ≈ 3.53 mm). La combinación de molinos logró la distribución más uniforme para ambos granos (D50 ≈ 1.05-1.25 mm). El ANOVA no detectó diferencias significativas globales, aunque se observaron disparidades morfológicas y de distribución en el análisis por tamices. La combinación de molinos optimizó la distribución granulométrica, superando las limitaciones de cada equipo por separado.

Palabras clave.

Distribución granulométrica, Molino de martillo, Molino de bolas, Molienda de maíz, Molienda de soja.

1. Introdução

A redução do tamanho das partículas é um processo implementado em várias indústrias, que consiste em reduzir a dimensão física dos materiais sólidos através da aplicação de forças mecânicas. Este processo é essencial em operações como mistura, secagem, sinterização e reações químicas, onde o tamanho das partículas pode influenciar a velocidade e uniformidade do processo. Equipamentos comuns para redução de tamanho incluem moinhos de bolas, moinhos de martelo, trituradores de mandíbulas e moinhos de roletes. A escolha do equipamento certo depende das propriedades do material e do tamanho desejado da partícula, sendo um fator crítico para a otimização dos processos industriais. [1]

Além disso, a distribuição de partículas desempenha um papel fundamental, pois afeta diretamente a qualidade e as

propriedades do produto final, como o fluxo, a compactação e a dissolução. A análise do tamanho das partículas é uma técnica essencial para avaliar a distribuição do tamanho das partículas num material pulverizado, e o crivo é um dos equipamentos mais amplamente utilizados para este fim. A precisão na classificação de partículas é vital para garantir a consistência do produto. [2]

A moagem e a redução de tamanho não só aumentam a área superficial específica dos materiais, como também melhoram a sua reatividade e facilitam processos a jusante como dissolução, extração de compostos de interesse e homogeneização em misturas. Na indústria alimentar, por exemplo, o controlo adequado do tamanho das partículas ajuda a otimizar a textura, solubilidade e biodisponibilidade dos nutrientes, enquanto na indústria

¹ Universidade de Guayaquil / stefanie.bonillab@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-9391-3698>, Guayaquil; Equador.

² Investigador Independente/ fernandoanoblex18@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0005-1898-8373>, Guayaquil; Equador.

³ Investigador Independente/ ivanalejo17@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-9193-0524>, Guayaquil; Equador.

⁴ Universidade de Guayaquil / carlos.valdiviezor@ug.edu.ec; <https://orcid.org/0000-0002-6550-975>, Guayaquil, Equador.

farmacêutica a uniformidade do tamanho das partículas é fundamental para garantir a dosagem e a liberação controlada dos ingredientes ativos. [3]

No campo dos materiais de construção e mineração, a eficiência de equipamentos de cominuição, como moinhos de bolas e moinhos de martelo, tem um impacto direto no consumo de energia e nos custos operacionais. Estima-se que até 50% da energia total utilizada numa planta de processamento mineral corresponde a operações de moagem, o que torna a seleção de equipamentos e a otimização do tamanho das partículas fatores estratégicos para a sustentabilidade do processo. Além disso, a redução excessiva de partículas pode levar a perdas de material devido à formação de finos, afetando a eficiência global do sistema.[4]

O moinho de martelo é um dos equipamentos mais utilizados para redução do tamanho do grão devido à sua simplicidade de design, baixo custo e elevada capacidade de processamento. O seu princípio de funcionamento baseia-se no impacto repetido dos martelos rotativos sobre as partículas, o que gera fraturas rápidas e produz materiais com um tamanho de partícula relativamente heterogêneo. Este tipo de moinho é amplamente utilizado na indústria alimentar e para rações, pois permite processar cereais como milho, trigo e soja de forma eficiente, embora tenha a desvantagem de gerar um maior teor de finos e poeira. [5]

Por outro lado, o moinho de esferas funciona segundo o princípio do impacto e fricção, onde esferas de aço ou outro material de moagem rodam dentro de um tambor cilíndrico, causando a redução gradual do tamanho das partículas. Ao contrário do moinho de martelo, este equipamento permite uma distribuição mais controlada e fina das partículas, com menos variabilidade de tamanho. Os moinhos de bolas são amplamente utilizados nas indústrias mineira, cerâmica e farmacêutica, bem como na investigação de novos materiais, embora exijam um consumo de energia mais elevado e tempos de funcionamento mais longos em comparação com os moinhos de martelo. [6]

A análise do tamanho das partículas por peneira, difração a laser ou outros métodos modernos é utilizada como ferramenta de controlo de qualidade para estabelecer a distribuição de tamanho nos produtos processados. A técnica de peneiração, embora tradicional, continua a ser uma das mais amplamente utilizadas devido ao seu baixo custo, simplicidade e reprodutibilidade em comparação com métodos mais sofisticados. A informação obtida destas análises permite estabelecer correlações entre a distribuição das partículas e o comportamento do material nos processos subsequentes, garantindo a uniformidade do produto final e contribuindo para a otimização da cadeia de produção. [7]

A escolha entre um moinho de martelo e um moinho de bolas depende em grande parte do material a processar e das propriedades desejadas no produto final. Para grãos, o moinho de martelo é preferido pela sua rapidez e eficiência em grandes volumes, enquanto o moinho de esferas é mais adequado quando é necessária moagem fina e uniforme. Ambos os equipamentos desempenham um papel fundamental na otimização dos processos industriais, e a sua comparação do ponto de vista da distribuição do tamanho das partículas permite-nos identificar vantagens competitivas e áreas de melhoria na redução do tamanho das partículas. Neste contexto, é pertinente destacar a importância da moagem em cereais amplamente utilizados, como o milho e a soja, cujo processamento responde não só a fins industriais, mas também à otimização da qualidade nutricional e funcional dos produtos derivados. [8][9]

Apesar do uso generalizado de moinhos de martelo e bolas em diferentes indústrias, ainda existem lacunas na compreensão comparativa da sua eficiência na redução do tamanho e na distribuição final de partículas de cereais como o milho e a soja. Embora ambos os equipamentos desempenhem funções semelhantes, diferenças no seu princípio de funcionamento, consumo de energia e uniformidade do produto podem influenciar significativamente a qualidade e utilização dos cereais processados. Estudos recentes destacaram que parâmetros de moagem, como a velocidade de rotação, a carga da bola ou a abertura do ecrã, têm um impacto direto na distribuição das partículas e na qualidade nutricional do produto final. A investigação comparativa demonstrou que os moinhos de martelos tendem a gerar partículas mais irregulares e um maior teor de finos, enquanto os moinhos de esferas produzem distribuições mais homogêneas, embora com maior consumo de energia e tempo de operação. No entanto, a maioria destes estudos concentrou-se em grãos individuais ou em condições experimentais específicas, pelo que é necessária uma análise mais abrangente que relacione tanto o equipamento sob condições controladas como comparáveis. Desta forma, a presente investigação procura fornecer evidências quantitativas e atualizadas que permitam orientar decisões técnicas e económicas no processamento do milho e da soja, reforçando a base científica para a seleção do sistema de moagem mais eficiente.[10][11]

No caso de cereais como o milho e a soja, amplamente utilizados na indústria alimentar e de rações, a moagem desempenha um papel fundamental na melhoria das suas propriedades funcionais e nutricionais. No milho, o controlo do tamanho das partículas influencia a digestibilidade do amido e a qualidade de produtos derivados, como farinha e cereais, enquanto na soja determina a disponibilidade de proteínas e lípidos, além de facilitar a sua incorporação em formulações equilibradas para alimentação animal. Estudos demonstraram que a redução adequada do tamanho das partículas nestes grãos

não só otimiza o desempenho dos processos de extração e a digestibilidade, como também impacta o [12]Eficiência energética da moagem e na qualidade final do produto. [13] Estudos anteriores têm limitações específicas que exigem atenção. Por exemplo, a investigação mostrou que, na moagem de milho, a energia específica necessária varia consideravelmente consoante a fração do material (grão, resto, corda), o que sugere que os dados não podem ser extrapolados diretamente para cereais comerciais processados. Outro estudo mostrou que a combinação de moinhos (martelos + roletes) melhora a uniformidade da distribuição de partículas, mas não compara diretamente moinhos de martelo com moinhos de bolas em cereais como milho ou soja. No campo da moagem de bolas, um estudo analisou como o diâmetro do meio afeta a eficiência da moagem, mas na mineralização, não nos cereais agrícolas, o que deixa uma lacuna no conhecimento aplicável ao setor alimentar. Consequentemente, não existe uma comparação direta, sob condições controladas dos cereais alimentares (milho e soja), entre moinhos de martelo e moinhos de bolas, que quantifique simultaneamente a uniformidade do tamanho das partículas, o consumo de energia e a sua ligação com funcionalidades nutricionais ou procedimentais. Esta lacuna confere relevância e urgência à investigação atual, destinada a garantir uma seleção técnica sólida do sistema de moagem mais adequado para a sua aplicação industrial.[14][15][16]

Estudos recentes indicam que a fresagem por martelo pode representar até 50% do consumo total de eletricidade de uma central elétrica. Por outro lado, a investigação em biomassa mostra que a energia específica necessária para a redução de tamanho pode variar entre 35–65 kJ/kg, Depende do tipo de material e das condições de moagem. Além disso, análises com modelos empíricos indicam que a energia necessária nos moinhos de bolas pode variar entre [17]~3–12 kW·h·t⁻¹ Dependendo da dureza e do tamanho desejado do produto. Portanto, a seleção incorreta do tipo de moinho não só afeta a qualidade da moagem e a uniformidade do tamanho das partículas, como também pode aumentar consideravelmente o [18]Custos operacionais e o Consumo de energia, impactando a viabilidade e competitividade do processo industrial.

Portanto, o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa da distribuição do tamanho das partículas dos cereais moídos em moinhos de bolas e moinhos de martelo, considerando a sua aplicação no processamento de matérias-primas como milho e soja. Esta análise procura estabelecer relações entre o tipo de equipamento, as condições de moagem e a uniformidade das partículas obtidas, de modo a fornecer critérios técnicos que orientem a seleção do sistema de redução de tamanho com base na eficiência e qualidade do produto final.

1.1. Moagem

A moagem é uma operação unitária responsável por reduzir o tamanho das partículas para atingir o tamanho necessário para um processo específico, aumentando assim a superfície de contacto do material para maior eficiência no processo industrial. Esta redução é realizada dividindo ou fracionando a amostra por meios mecânicos até atingir o tamanho necessário.

Para a Engenharia Química é essencial compreender as leis que regem a desintegração em relação ao consumo de energia (tempo), as características da matéria e o tipo de máquinas a utilizar; isto demonstra o estudo baseado em deduções e observações empíricas. [1]

1.1.1. Tipos de moagem

Diferentes tipos de moinhos, como o moinho de bolas e o moinho de martelos, têm mecanismos de ação e eficiência distintos; os moinhos de bolas são eficientes para moagem fixa e o moinho de martelo é mais para materiais frágeis. [19]

1.2. Peneirado

O método de peneiramento envolve a utilização de uma série de peneiras com diferentes aberturas para separar as partículas do solo de acordo com o seu tamanho [20]

1.3. Análise granulométrica por peneiramento

É a separação em tamanho de um conjunto de partículas sólidas de acordo com uma escala de tamanho de partícula. Esta separação é feita com peneiras colocadas em série, de modo que a peneiração da primeira peneira é a alimentação da segunda, e assim sucessivamente. [21]

Alimentação para a peneira (F): É a massa total que chega à peneira para ser separada ou classificada.

Retido (R): É a massa que permanece na superfície do crivo.

Peneiramento (C): É a massa que passa pelas aberturas da peneira, ou seja, que atravessa a sua superfície.

1.4. Distribuição do Tamanho das Partículas

A distribuição do tamanho das partículas descreve a proporção de diferentes tamanhos de partículas presentes numa amostra. É essencial caracterizar o comportamento dos materiais em vários processos industriais. [22]

1.5. Curvas granulométricas

As curvas de tamanho de partícula são representações gráficas que mostram a distribuição do tamanho das partículas numa amostra. Estas curvas são essenciais para compreender a distribuição e previsibilidade do comportamento dos materiais. [23]

2. Materiais e métodos.

Foram realizados testes de moagem com dois tipos de cereais (milho e soja) para avaliar a granulometria que podia ser obtida através da moagem nos moinhos de

esferas e de martelo. Trabalhámos com uma rosa RBN modelo de moinho de martelos, com 20 martelos com barra fundida e 4 eixos, bem como com um laminador tubular de esferas de aço descontínuo, de câmara única, com descarga por grelha. A calibração do equipamento de moagem e peneira foi realizada antes dos testes, verificando que todos os componentes: câmara, corpos de moagem, crivos e malha estavam dentro das suas especificações dimensionais e mecânicas, garantindo condições reprodutíveis entre as réplicas. Um conjunto de crivos certificados segundo normas equivalentes à ASTM E11 / ISO 3310 foi utilizado para peneiramento, e a uniformidade das aberturas foi verificada com métodos de calibração em malha de acordo com os procedimentos recomendados na literatura para garantir a precisão e minimizar erros de classificação. Seguem-se os estudos de caso avaliados:

Caso 1. Moinho de martelo e peneiração, fig. 1.

Caso 2. Moagem e peneiração por moinho de bolas, fig. 2.

Caso 3. Moagem num moinho de martelo, seguida pelo moinho de bolas e peneiração, fig. 3.

Depois de realizados os três casos, foi utilizado um microscópio (Digital Microscope USB) para examinar a geometria obtida em cada tipo de moagem.

O protocolo de amostragem foi estabelecido seguindo critérios de representatividade e homogeneidade recomendados para estudos de granulometria em matrizes agrícolas. Para cada tratamento de moagem, as amostras eram recolhidas imediatamente após a descarga do equipamento, utilizando o método manual de quarteamento para reduzir o volume e garantir que a fração analisada mantinha a distribuição original do lote. Este procedimento é amplamente utilizado em estudos de moagem devido à sua eficácia em minimizar os vieses de segregação de tamanho e densidade, especialmente em cereais como o milho e a soja. Pesquisas recentes enfatizam que a homogeneização correta e a redução do tamanho do lote são essenciais para garantir a reprodutibilidade da distribuição do tamanho das partículas, uma vez que variações no protocolo de amostragem podem gerar diferenças até 15% na percentagem retida pelo crivo em sistemas de moagem por impacto ou compressão. Além disso, estudos comparativos em moagem agrícola recomendam a utilização entre 200 e 500 g como massa analítica mínima para evitar perdas de frações finas e garantir uma representatividade suficiente, considerada no presente trabalho.[24]

Para a representação e análise dos dados recolhidos, foram usados grafos de distribuição granulométrica da distribuição do tamanho das partículas. Estes gráficos permitem visualizar a relação entre o tamanho das partículas e a percentagem cumulativa do material peneirado, proporcionando uma compreensão quantitativa e comparativa da distribuição do tamanho das partículas.

Por fim, foi aplicada a análise da variância (ANOVA) de um único fator utilizando o complemento do Kit de Ferramentas de Análise, que permitiu avaliar diferenças significativas entre tratamentos.

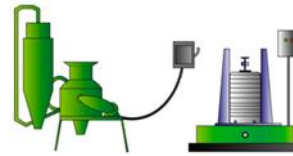


Fig. 1. Caso 1. Moinho de martelo e peneiração.

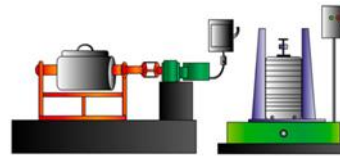


Fig. 2. Caso 2. Moagem e peneiração por moinho de bolas

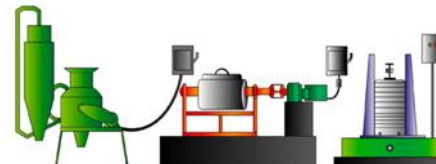


Fig. 3. Caso 3. Moagem de martelos, seguida de moagem de esferas e peneira

2.1. Matéria-prima

Foram usados 4540 g de milho e soja, 2270 g de cada grão. Milho com diâmetro médio de 0,78 mm e densidade de grãos de 0,75 g/cm³, soja com diâmetro médio de 0,57 mm e densidade de grãos de 0,85 g/cm³.

A humidade do grão é uma variável determinante na eficiência da moagem, pois modifica a sua dureza, a sua resposta mecânica e a granulometria resultante. Para manter a estabilidade experimental, os grãos foram mantidos no mesmo lote e armazenados num ambiente seco a uma temperatura controlada de 22–24 °C, condições que minimizam a variação higroscópica e preservam as propriedades físicas do material. Esta abordagem coincide com as recomendações da literatura, que destacam que o controlo simultâneo da temperatura e das condições ambientais evita flutuações na humidade interna do grão e, portanto, no seu comportamento durante o processo de cominuição. Isto garante que as diferenças observadas no tamanho dos grãos refletem principalmente o desempenho do equipamento de moagem.[25]

2.2. Moinho de bolas

Foi utilizado um moinho de bolas, com uma carga de esferas configurada conforme indicado na tabela 1:

Tabela 1. Configuração dos corpos de moagem.

Carroçarias de moagem	Diâmetro médio (cm)	Peso Total (g)	% Peso
Pequeno	2.46	5447	18.43
Média	2.97	9286	31.43
Grande	3.89	14815	50.14
Pequeno	2.46	5447	18.43

Fonte: Bonilla, et al, 2024

O peso total dos corpos de moagem era de 29.548 g.
O peso médio e o diâmetro equivalente dos corpos de moagem foram determinados com as seguintes equações:

$$\text{Peso promedio} = \frac{\text{peso total de cuerpos moedores}}{\text{número de cuerpos moedores}} \quad [1]$$

Peso médio= 126,27 g

$$\text{Diámetro equivalente} = \left[\left(\frac{\text{peso promedio}}{\text{densidad}} \right) \frac{6}{\pi} \right]^{1/3} \quad [2]$$

Diâmetro equivalente= . 3,12 cm

2.2.1. Cálculos de parâmetros para moinho de bolas

O moinho de esferas era alimentado com 2270 g de cada grão (milho e soja) e os parâmetros de trabalho eram determinados pelas seguintes equações de projeto:

Grau de preenchimento (f):

$$f = \frac{\text{Volumen de la carga}}{\text{Volumen del molino}} \times 100 \quad [3]$$

Peso da Carga Corporal de Desgaste (Q):

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 L i f Y q \quad [4]$$

Onde:

D: Diâmetro interior do moinho de bolas, m.

Li: comprimento do moinho, m.

Yq: Peso equivalente a corpos de moagem, t/m³

Velocidade crítica de fresagem (nc):

$$nc = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad [5]$$

Onde:

D: Diâmetro interior do moinho de bolas, m

$$n = k nc \quad [6]$$

Onde:

K: Percentagem da velocidade crítica (75%)

NC: Velocidade Crítica, RPM

Potência do motor do moinho de bolas (N):

$$N = c D Q n \quad [7]$$

Onde:

c: fator de consumo de energia, adimensional

D: diâmetro interior do moinho, m

P: Peso de carga do moinho de bolas, t

N: Velocidade de Funcionamento da Fresadora, RPM

Consumo específico de energia (CEE):

$$CEE = \frac{N}{P} \quad [8]$$

Onde:

N: potência do moinho, kW

P: Produção do moinho de bolas, t

2.3. Moinho de Martelos

Os grãos eram colocados na boca de ração, passados pelos martelos num período de 4 minutos e recebidos no descarregamento, para pesar e peneirar.

2.4. Peneirado

As peneiras foram colocadas em coluna de forma crescente de acordo com o número de peneiras, o que significa que a peneira com o maior número receberá o material mais fino. A coluna de peneiras era colocada na máquina vibratória durante um minuto e depois cada peneira era pesada, recolhendo o peso do crivo retido.

O fluxograma do processo de estudo é mostrado abaixo na Figura 4.

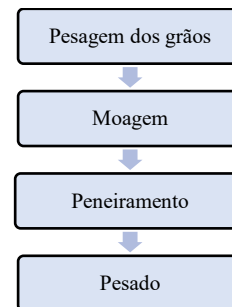


Fig.4. Diagrama geral de fluxo do processo.

2.5. Peneiras

A coluna de peneiras utilizada neste estudo é apresentada na tabela 2, com as respectivas características da seguinte forma:

Tabela 2. Classificação por peneiras

Número de Malha	Abertura da malha (mm)	Peso do crivo (g)
5	4,00	387
6	3,35	383
8	2,36	372
12	1,70	358
16	1,18	309
18	1,00	303
20	0,85	294
30	0,60	289
50	0,30	255
70	0,212	250
Base	-	270

Fonte: Bonilla, et al, 2024

3. Análise e Interpretação dos Resultados.

3.1. Condições de Funcionamento da Moagem

A tabela 3 seguinte apresenta as condições de trabalho nos casos 2 e 3, tanto com grãos de milho como de soja.

Tabela 3. Condições de funcionamento na moagem

Parâmetro	Caso 2		Caso 3	
Granos	Maíz	Soja	Maíz	Soja
Temperatura (°C)	27	27	27	27

f(%)	14,13	14,8	14,1	16,51
P (t)	0,0280	0,0293	0,0279	0,0327
NC (RPM)	68,61	68,61	68,61	68,61
N (RPM) @ 75%	51	51	51	51
N (HP)	0,194	0,203	0,194	0,203
CEE (kW h / t)	80,61	83,17	80,17	92,70

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A Tabela 3 indica as condições usadas no moinho de esferas nos casos 2 e 3, para ambos os grãos trabalhados à temperatura ambiente. O grau de preenchimento (f) do caso 2 com milho apresenta 14,13% e a soja 14,8%, respectivamente. Quanto mais denso o grão, maior o grau de preenchimento. No caso 3, com milho, apresenta 14,1% e soja 16,51%, estes resultados dependem de fatores como o volume de carga dos corpos de moagem, o volume da matéria-prima e o volume do moinho. Assim, a farinha de milho, por ser mais densa, ocupa menos volume no moinho em comparação com a farinha de soja, que ocupa um volume maior, por isso era necessária uma maior carga de corpos de moagem.

Foi necessário determinar a velocidade crítica (nc) a que o moinho opera para não ultrapassar, pois isso fará com que a força centrífuga seja igual à força da gravidade e os corpos de moagem não descerão até à moagem.

O consumo específico de energia (CEE) calculado no caso 2 com milho teve um consumo de 80,61 kW hr/t por cada tonelada processada; em contraste, a soja aumentou para 83,7 kW hr/t consumida por cada tonelada processada, devido ao facto de trabalharem com uma maior carga de corpos de moagem para este grão, pelo que o moinho teve de consumir mais energia do que com milho. finalmente, o caso 3, com milho, apresentou um consumo de 80,17 kW hr/t por cada tonelada produzida e a soja consumiu 92,70 kW hr/t por cada tonelada produzida; a diferença no consumo específico de energia (CEE) entre os grãos no caso 3 deve-se à densidade do grão de soja. Ou seja, quanto maior o grau de preenchimento, maior será o consumo específico de energia. [26]

3.2. Rendimentos do moinho

A Tabela 4 compara a percentagem de rendimento dos moinhos nos três estudos de caso com milho e soja.

Caso 1. Moinho de martelo.

O moinho de martelo apresentava um rendimento mais elevado no processamento de cereais de milho em comparação com a soja, com uma diferença de 3,5%. Esta variação é principalmente atribuída à diferença de densidade entre os dois

grãos. O milho, por ser menos denso, facilita a moagem em comparação com a soja.

Caso 2. Moinho de bolas.

No moinho de bolas, obteve-se o maior rendimento ao moer ambos os grãos em comparação com os três casos

analisados, devido à capacidade do moinho de esferas de processar quase todo o grão alimentado com perdas atribuíveis a incrustações no blindagem e na tampa do moinho.

Caso 3. Moinho de martelo + moinho de bolas.

A combinação dos moinhos apresenta uma diferença de 5,47% entre milho e soja, resultando numa percentagem de prejuízo maior em comparação com os casos 1 e 2, deve-se ao facto de o grão passar por dois processos de moagem. O moinho de martelo tinha um rendimento superior com grão de milho em comparação com a soja, devido às suas diferenças de densidade. O moinho de bolas oferece um desempenho semelhante em ambos os casos, porque não apresenta uma perda significativa no momento do processamento.

Tabela 4. O moinho produz.

Fonte: Bonilla, et al, 2024

Matéria-prima	Rendimento (%)		
	Caso #1	Caso #2	Caso #2
Milho	Moinho de Martelos	Moinho de bolas	Moinho de martelo + Moinho de esferas
Milho	77,05	96,34	74,89
Soja	73,57	96,17	69,47

3.3. Análise comparativa do tamanho das partículas

3.3.1. Caso 1. Moinho de martelo com milho

A Figura 5, que mostra a distribuição das partículas, que cobre um intervalo de 2,33 a 3,7 milímetros, indica uma falta de uniformidade na redução do tamanho. Enquanto o diâmetro mediano (D_{50}) é aproximadamente 2,8-2,9 milímetros.

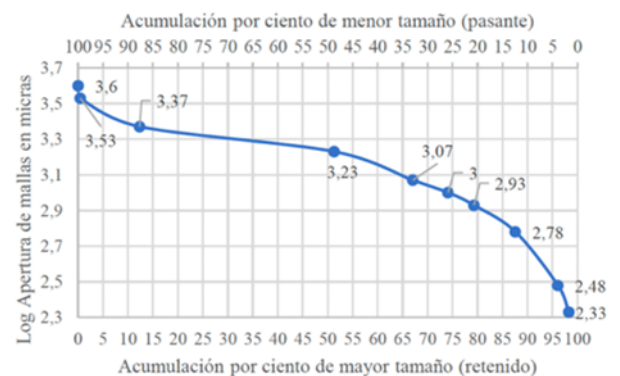


Fig.5. Curva de tamanho de partícula Caso 1 (milho)

Os dados na Tabela 5 indicam uma distribuição heterogénea com uma concentração massiva na faixa média. A peneira número 12 (2,03 mm/2030 micrômetros) retém 38,94% do material total, representando o ponto máximo de distribuição. Isto indica que o processo de moagem gera predominantemente partículas de tamanho médio. Embora a fração grosseira seja adequadamente minimizada (apenas 0,47% acima de 3,68 mm), a baixa proporção de finos (10,71% abaixo de 0,45 mm) sugere

ineficiências no mecanismo de fratura, possivelmente relacionadas com a velocidade do rotor, tempo de residência ou humidade do grão.

Tabela 5. Percentagem de dados experimentais retidos (milho)

Número de Malha	Tamanho médio das partículas (mm)	Tamanho médio das partículas (micrómetros)	% Retidos
5	4,00	4000	0,06
6	3,35	3680	0,41
8	2,36	2860	11,87
12	1,70	2030	38,94
16	1,18	1440	15,77
18	1,00	1090	7,04
20	0,85	930	5,18
30	0,60	730	8,32
50	0,30	450	8,50
70	0,212	260	2,21

Fonte: Bonilla, et al, 2024

3.3.2. Caso 1. Moinho de martelo (soja)

A Figura 6 mostra a distribuição das partículas numa ampla gama de tamanhos, desde aproximadamente 2,3 mm até 3,7 mm, o que indica uma moagem heterogénea com presença simultânea de partículas finas e grosseiras. O D50 (tamanho médio) localiza-se cerca de 2,9 mm, o ponto em que 50% do material é mais fino e 50% mais espesso, um valor que representa o tamanho característico do produto final. A inclinação suave da curva de acumulação sugere uma distribuição alargada com dispersão significativa nos tamanhos das partículas. Observa-se que aproximadamente 30-35% do material tem tamanhos superiores a 3,1 mm (fração grosseira), enquanto apenas cerca de 15-20% está abaixo de 2,5 mm (fração fina), evidenciando um desequilíbrio em relação a partículas maiores. A acumulação de material retido indica que existe uma proporção de partículas na gama média (2,7-3,1 mm), representando entre 40-50% do total. Esta distribuição sugere que o processo de moagem gera um excesso de partículas de tamanho intermédio, possivelmente devido a parâmetros operacionais como velocidade do rotor inadequada, tempo de residência insuficiente, desgaste do martelo ou abertura excessiva da peneira.

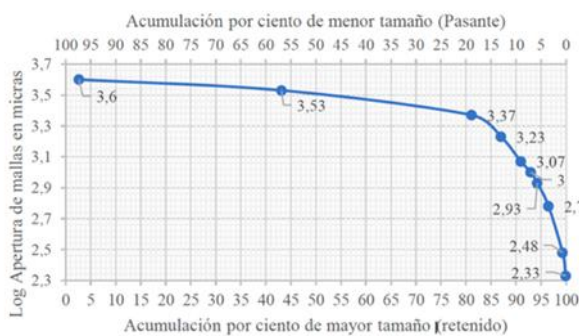


Fig.6. Curva de tamanho de partícula Caso 1 (soja)

Os dados na Tabela 6 indicam que as novas peneiras têm uma percentagem maior de retenção de partículas na ordem dos 3680 a 2860 micrómetros, o que está associado à presença de partículas maiores de soja. presença de

partículas maiores de soja. Além disso, observa-se uma diminuição na percentagem de retenção para tamanhos intermédios e pequenos. Esta tendência indica que o

Tabela 6. Percentagem de dados experimentais retidos (soja)

Número de Malha	Tamanho médio das partículas (mm)	Tamanho médio das partículas (micrómetros)	% Retidos
5	4,00	4000	2,66
6	3,35	3680	40,49
8	2,36	2860	37,97
12	1,70	2030	5,87
16	1,18	1440	3,99
18	1,00	1090	1,96
20	0,85	930	1,33
30	0,60	730	2,24
50	0,30	450	2,80
70	0,212	260	0,63

Fonte: Bonilla, et al, 2024

3.3.3. Caso 2. Moinho de Bola (Milho)

A distribuição do tamanho das partículas obtida do moinho de milho no moinho de esferas indica uma ampla dispersão dos tamanhos das partículas. Os resultados na Figura 7 mostram que o D10 tem cerca de 0,48 mm, o que significa que apenas 10% do material é menor do que este valor, enquanto o D50 tem 1,38 mm, indicando que metade do material está abaixo deste tamanho. O D90 de 1,96 mm revela que 90% do material é menor do que este valor. Estes indicadores permitem-nos inferir que a moagem produz partículas numa gama considerável, maioritariamente concentradas entre 0,5 mm e 2 mm.

A distribuição cumulativa mostra que o material moído tem uma proporção significativa de partículas grosseiras (>2 mm), aproximadamente 8% do total, o que indica que o moinho de esferas não alcança uma moagem completamente fina para todo o material processado. A dispersão do tamanho das partículas é relativamente elevada, como confirmado pelo índice de uniformidade (D90/D10 ≈ 4,08), indicando uma mistura considerável de partículas finas e grosseiras. Esta característica é comum na moagem feita em moinhos de bolas.

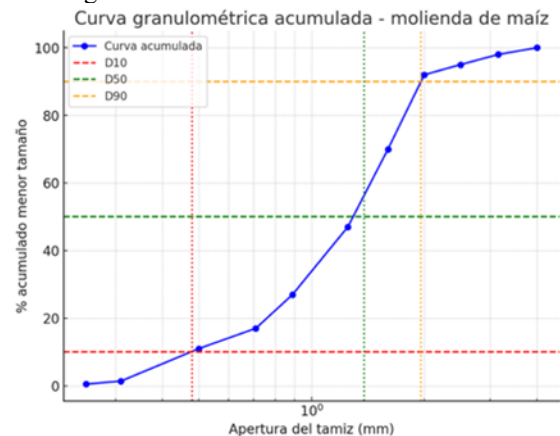


Fig.7. Curva cumulativa do tamanho das partículas Caso 2 (milho)

3.3.4. Caso 2. Moinho de bolas (soja)

A distribuição do tamanho das partículas da soja moída na Figura 8 mostra que o material é maioritariamente grosseiro: os parâmetros representativos são $D_{10} \approx 1,59$ mm, $D_{50} \approx 3,53$ mm e $D_{90} \approx 3,94$ mm. Isto indica que 10% das partículas são menores que 1,59 mm, a mediana é de 3,53 mm (metade do material é mais fina do que este valor) e que 90% é mais fina do que 3,94 mm. Estes valores colocam a maior parte da massa na faixa de $\sim 1,6$ – $4,0$ mm, com a mediana próxima de 3,5 mm. A curva de inclinação (o through-% nas malhas) tem uma inclinação acentuada no vão entre aproximadamente 2,86 mm (18,9% through) e 4,00 mm (97,34% through-screen), o que significa que uma fração significativa do material passa por grandes malhas e que a "zona de corte" da distribuição está centrada em torno de 3–4 mm. A fração de multas (<1 mm) é muito pequena (valores through-% em 0,45 mm e 0,26 mm são 0,70% e 0,07%, respetivamente), pelo que as multas são praticamente insignificantes no produto final. A dispersão da distribuição pode ser quantificada com o índice de uniformidade $D_{90}/D_{10} \approx 3,94 / 1,59 \approx 2,48$, indicando uma distribuição relativamente estreita e bastante uniforme em tamanhos grosseiros (menos dispersão do que uma distribuição muito ampla). Ou seja, a maior parte do material está agrupada numa gama relativamente compacta (maioritariamente entre $\sim 1,6$ e ~ 4 mm), sem grandes caudas de partículas muito finas ou uma mistura muito heterogênea de tamanhos. Do ponto de vista operacional e da qualidade do produto, esta granulometria sugere que o processo de moagem está a produzir um produto adequado quando se procura farinha/partículas grossas ou intermédias (por exemplo, para determinados usos industriais ou alimentação animal). Se o objetivo fosse obter frações mais finas ou aumentar a proporção de partículas <1 mm, seria necessário intervir no processo (mais tempo de moagem, maior energia de impacto, ajustar a carga e o tamanho do meio, ou usar triagem e recirculação).

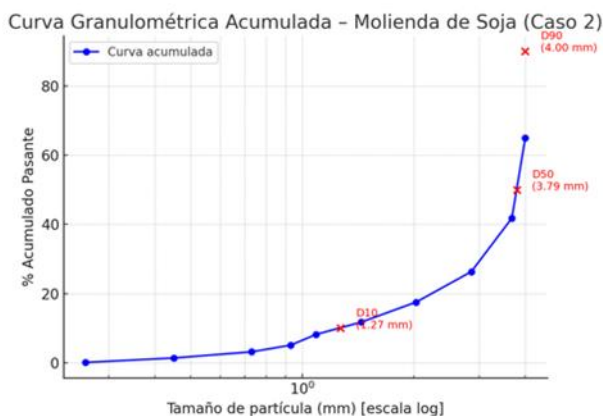


Fig.8. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 2 (soja)

3.3.5. Caso 3. Moinho de Martelo de Moagem + Moinho de Bolas (Milho)

A moagem combinada (martelo + bolas) gera um produto de tamanho intermédio, com um $D_{50} \approx 1,08$ mm, o que significa que metade do material está na gama de partículas

próxima de 1 mm. A $D_{10} \approx 0,60$ mm indica a fração mais fina do material, enquanto a $D_{90} \approx 2,60$ mm mostra que 90% do material está abaixo deste tamanho, com uma ampla distribuição de dados.

A curva acumulada na Figura 9 mostra que a maior parte do material está concentrada entre 0,6 e 2,6 mm, com uma fração muito baixa de finos ($<0,5$ mm) ($<1\%$). Isto indica que a moagem é eficiente para produzir granulometria de meio, sem pós em excesso, uma característica favorável para usos em ração animal e processos que requerem um fluxo adequado sem encaixe.

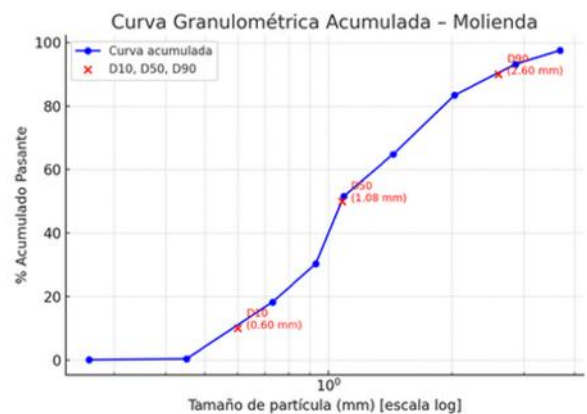


Fig.9. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 3 (milho)

O índice de uniformidade, calculado como $D_{90}/D_{10} \approx 4,3$, indica uma distribuição ampla, com coexistência de partículas finas e grosseiras. Esta amplitude pode estar associada à combinação de tecnologias de moagem: o moinho de martelo parte de forma mais irregular e o moinho de esferas refina, mas mantém alguma dispersão.

3.3.6. Caso 3. Moinho de martelo de moagem + Moinho de esferas (soja)

A distribuição resultante do tamanho das partículas mostra, na Figura 10, uma concentração clara na gama $\approx 0,9$ – $1,5$ mm, com $D_{50} \approx 1,35$ mm, o que significa que metade da massa está abaixo desse tamanho. Os dados de peneiramento indicam que as maiores quantidades foram retidas em malhas de 1,25 mm e 1,00 mm (498 g e 588 g, respetivamente), sublinhando que a "massa crítica" do material está próxima destes tamanhos e que o processo produziu um produto de tamanho intermédio de partículas. A fração de finos é muito pequena: apenas 0,94% passa pela malha de 0,315 mm e a malha acumulada através dessa malha é de 0,94%, por isso partículas menores que $\approx 0,5$ mm são praticamente insignificantes. Isto significa baixa geração de pó e maiores facilidades de manuseamento e transporte (menos dispersão aérea e menos problemas de acumulação por multas), um aspeto positivo para a logística e para os processos subsequentes que beneficiam de menos material poeirento. A dispersão da distribuição pode ser quantificada com o índice de uniformidade $D_{90}/D_{10} \approx 2,05 / 0,77 \approx 2,66$, um valor que indica uma distribuição relativamente estreita e homogênea em torno do tamanho mediano. Na prática,

isto significa que a maior parte do material está agrupada numa gama limitada (cauda fina baixa e cauda moderadamente grossa), o que é desejável quando se procura reprodutibilidade nas propriedades reológicas, tamanho das partículas e processos (mistura, extrusão, pelletização).

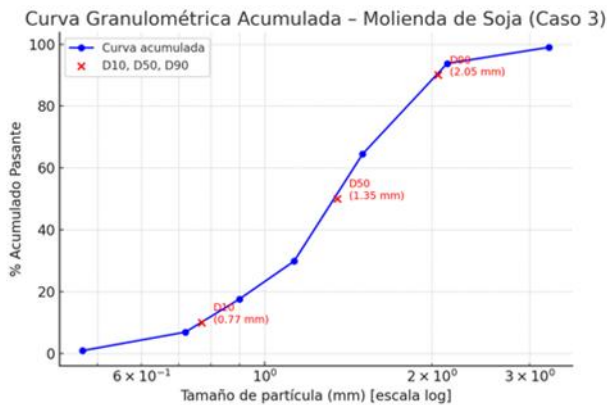


Fig.10. Curva cumulativa de tamanho de partícula Caso 3 (soja)

Do ponto de vista operacional, estes resultados sugerem que a combinação martelo + moinho de bolas produziu uma redução suficiente para aplicações que requerem partículas intermédias.

3.3.7. Comparação da percentagem de retenção em cada caso nas peneiras com a maior e menor abertura.

A Tabela 7 mostra uma comparação entre os três estudos de caso relativamente à percentagem de retenção obtida nas malhas com maior abertura (4 mm) e menor abertura (0,121 mm), bem como a retenção na base (<0,212 mm).

Tabela 7. Comparação da percentagem de detidos.

Nã. Malha	Abertura (mm)	Caso 1 (%)		Caso 2 (%)		Caso 3 (%)	
		milho	Soja	milho	Soja	milho	Soja
5	4	0,06	2,66	2,47	35,01	0,23	0,77
70	0,212	2,21	0,63	1,12	1,28	1,93	0,28
Base	< 0,212	1,69	0,07	0,04	0,09	0,12	0,14

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A maior percentagem de retenção na moagem de soja foi obtida no caso 2, com 35,01%, devido à densidade do grão em comparação com o milho. No caso 3, observa-se uma diminuição da retenção, pois, após uma moagem anterior no moinho de martelos, podiam ser obtidas partículas mais pequenas. Nos três estudos de caso, foi possível obter partículas menores, no entanto, as percentagens de retenção não excedem os 3%. A maior acumulação de retenção foi obtida na moagem de milho em todos os três casos, devido à menor densidade do grão. A moagem da soja nos três estudos de caso não atingiu 1% nas partículas retidas nas partículas inferiores a 0,212 mm. No entanto,


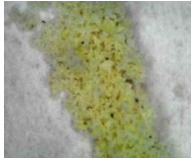

na moagem de milho, apenas no caso 1 poderia ser obtido 1,69% do retido com tamanho de partículas inferior a 0,212 mm.

3.3.8. Análise microscópica de farinha de milho e soja

A análise microscópica da farinha de milho mostra, na tabela 8, diferenças na forma das partículas produzidas pelos diferentes estudos de caso.

Caso 1 (Hammer Mill): As partículas têm uma forma retangular, o que sugere que o mecanismo de impacto do hammer mill tende a fragmentar as partículas em formas angulares. Caso 2 (Moinho de Bolas). As partículas têm uma forma oval, indicando que o processo de abrasão no moinho de bolas tende a arredondar as partículas. Caso 3 (Hammer Mill + Ball Mill): Observa-se uma forma intermédia entre o retangular e o oval. Isto pode dever-se à combinação de ambos os processos de moagem, que produzem uma mistura de formas de partículas. [27]

Tabela 8. Análise microscópica da farinha de milho

Caso 1	Caso 2	Caso 3
		
Tamanho das partículas: < 0,212 mm Forma das partículas: Retangular.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: oval.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: Entre retangular e oval.




Fonte: Bonilla, et al, 2024

3.3.9. Análise microscópica da farinha de soja

A análise microscópica da farinha de soja mostra as seguintes observações na Tabela 9.

Caso 1 (Moinho de Martelo): As partículas têm uma forma retangular, o impacto direto do moinho de martelo produz partículas angulares semelhantes às observadas no milho. Caso 2 (Moinho de Bolas). As partículas têm uma forma elipsoide. O processo de abrasão do moinho de bolas contorna as partículas, gerando esta forma pelo método de impacto do moinho e pelas características do grão. Caso 3 (Hammer Mill + Ball Mill): Observa-se uma mistura de formas retangulares e elipsoidais. Isto pode resultar de combinações de processos, onde a pré-moagem no moinho de martelos seguida de abrasão no moinho de esferas produz uma variedade de formas.

Tabela 9. Análise microscópica da farinha de soja

Caso 1	Caso 2	Caso 3
		

Tamanho das partículas: < 0,212 mm Forma das partículas: Retangular.	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: Elipsoide	Tamanho da partícula: < 0,212 mm Forma da partícula: retangular elipsoide. Entre e
---	---	--

Fonte: Bonilla, et al, 2024

3.3.10. Análise estatística

Foi realizada uma análise da variância para um fator que permitiu, em cada caso, determinar se existem diferenças significativas entre os resultados.

3.3.10.1. Caso 1. Moinho de Martelos

A Tabela 10 mostra os dados analisados sobre o peso dos retidos nas peneiras de grãos de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p > 0.05$)

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p < 0.05$)

Mesa 10. Pesos de Retidos em Peneiras Caso 1

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	2	55	472	701	296	80	96	37	2.21
Soja (g)	38	543	84	57	28	19	32	40	2.93
Valor Crítico F									4,39
Probabilidade									0,33

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise de um fator da variância (ANOVA) aplicada às distribuições do tamanho das partículas do milho e da soja mostra que não existe diferença estatisticamente significativa entre ambos os produtos moídos, evidenciada por um p-valor de 0,33, muito superior ao nível usual de significância de 0,05, o que indica que as variações observadas nos pesos retidos em cada malha podem ser atribuídas à aleatoriedade do processo e não a um efeito real do tipo de material. No entanto, pode mascarar diferenças práticas relevantes nos padrões de moagem, como a concentração marcada de soja na malha de 2,36 mm (543 g) em comparação com uma distribuição mais uniforme do milho, sugerindo que, embora globalmente semelhantes, os mecanismos de fratura e as características de degradação de cada material podem ser influenciados por fatores não capturados por esta análise univariada.

3.3.10.2. Caso 2. Moinho de bolas

A Tabela 11 mostra os dados analisados sobre o peso do retido nas peneiras de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p > 0.05$)

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p < 0.05$)

Tabela 11. Pesos de Retidos em Peneiras Caso 2

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	55	62	482	511	447	202	153	217	1.63
Soja (g)	762	338	192	127	77	68	42	39	1.28
Valor Crítico F									4,49
Probabilidade									0,61

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância (ANOVA) de um fator aplicada aos dados de distribuição do tamanho das partículas de milho e soja moídos num moinho de bolas indica que não existe diferença estatisticamente significativa entre as distribuições de ambos os cereais, evidenciada por um p-valor de 0,612, muito superior ao nível de significância de 0,05, e um valor F (0,267) que não ultrapassa o valor crítico (4.494). Embora as médias dos pesos retidos difiram numericamente (milho: 236,74 g, soja: 183,25 g), a elevada variância dentro de cada grupo (38.378,68 para milho e 58.008,20 para soja) sugere que a dispersão dos dados em cada malha é considerável, mascarando possíveis diferenças específicas pelo tamanho das partículas. Isto pode dever-se à natureza heterogênea da moagem em moinhos de bolas, onde fatores como dureza, humidade ou tempo de residência geram variabilidade que a ANOVA global não consegue detetar, recomendando uma análise por frações específicas do tamanho das partículas para identificar diferenças práticas no processo.

3.3.10.3. Caso 3. Moinho de martelo + Moinho de esferas

A Tabela 12 mostra os dados analisados sobre o peso dos retidos nas peneiras de milho e soja.

Hipótese nula: A análise granulométrica não mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p > 0.05$)

Hipótese alternativa: A análise granulométrica mostra diferenças significativas entre as peneiras utilizadas. ($p < 0.05$)

Tabela 12. Pesos de retidos em peneiras caso 3.

Malha (mm)	4	2,36	1,70	1,18	1,00	0,85	0,60	0,30	0,212
Milho (g)	4	23	12	25	28	41	34	21	1.9
			1	5	7	8	9	3	2

Soja (g)	11	65	13	26	18	30	17	25	0.2
		9	4	9	4	0	4	8	
Valor Crítico F									4,49
Probabilidade									0,63

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância (ANOVA) de um fator aplicada aos dados do tamanho das partículas do caso 3, onde milho e soja foram processados por um moinho de martelo seguido por um moinho de bolas, indica que não existe diferença estatisticamente significativa entre as distribuições do tamanho das partículas de ambos os grãos. Isto é suportado por um valor p de 0,637, muito superior ao nível de significância de 0,05, e um valor F de 0,231 que não ultrapassa o valor crítico de 4,494. Embora o peso retido médio difera (milho: 185,77 g, soja: 155,14 g), a elevada variabilidade dentro de cada grupo (variâncias de 24.235,87 para milho e 12.286,76 para soja) sugere que as diferenças observadas podem dever-se à dispersão natural do processo de moagem e não ao tipo de grão. Este resultado reflete que a sequência de moagem (martelo + bolas) homogeneiza as distribuições ao ponto de eliminar diferenças significativas, possivelmente devido à combinação de mecanismos de fratura (impacto e abrasão) que compensam as propriedades individuais de cada material. No entanto, uma análise por frações específicas pode revelar comportamentos diferenciais em determinados intervalos de tamanho, não captados pela ANOVA global.

3.3.10.4. Comparações de Diâmetros no Milho

A Tabela 13 mostra os dados analisados para os diâmetros D10, 50 e 90 para milho nos seus três estudos de caso.

Hipótese nula: Não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 na distribuição do tamanho das partículas do milho. ($p > 0,05$)

Hipótese alternativa: Pelo menos um dos percentis (D10, D50 ou D90) difere significativamente dos restantes na distribuição do tamanho das partículas do milho. ($p < 0,05$)

Tabela 13. Acumulação ao longo da colheita em D10, 50 e 90 para milho

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	3,39	0,48	0,60
D50 (mm)	2,80	1,38	1,08
D90 (mm)	0,30	1,96	2,60
Valor Crítico F	0,03		
Probabilidade	0,97		

Fonte: Bonilla, et al, 2024

A análise da variância mostra que não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 para cereais de milho ($p > 0,05$). Isto indica que, considerando os três tratamentos de moagem, a variação entre as distribuições características do tamanho das partículas (percentis de tamanho) é estatisticamente semelhante. Por outras palavras, a moagem gera tamanhos de partículas que, embora diferentes em valor numérico, não apresentam variabilidade suficiente para que as diferenças entre percentis sejam estatisticamente detetáveis no milho.

3.3.10.5. Comparações de Diâmetros de Soja

A Tabela 14 mostra os dados analisados para diâmetros D10, 50 e 90 para milho nos seus três estudos de caso.

Hipótese nula: Não existem diferenças significativas entre os valores de D10, D50 e D90 na distribuição do tamanho das partículas da soja. ($p > 0,05$)

Hipótese alternativa: Pelo menos um dos percentis (D10, D50 ou D90) difere significativamente dos restantes na distribuição do tamanho das partículas da soja. ($p < 0,05$)

Tabela 14 Acumulação do cesta através de um cesto em D10, 50 e 90 para soja

Parâmetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
D10 (mm)	1,8	1,9	0,70
D50 (mm)	2,90	3,53	1,35
D90 (mm)	3,98	3,94	2,05
Valor Crítico F	4,04		
Probabilidade	0,07		

Fonte: Bonilla, et al, 2024

No caso da soja, existe uma tendência para diferenças entre percentis ($p = 0,773$), mas estas não atingem a significância estatística ao nível convencional de $\alpha = 0,05$. Isto sugere que a soja apresenta maior variação no tamanho das partículas do que o milho entre D10, D50 e D90, provavelmente devido à sua estrutura interna mais frágil e maior heterogeneidade na fratura. No entanto, a evidência estatística não é suficiente para afirmar diferenças significativas, embora seja possível que, com uma amostra maior, os resultados sejam conclusivos.

4.- Discussão

4.1.- Caso 1. Moinho de Martelos

Os dados sobre o tamanho das partículas revelam diferenças significativas no comportamento de moagem entre a soja e o milho usando novas peneiras. A soja tem um Distribuição extremamente grosseira, com 81,12% do material retido nas três primeiras malhas ($\geq 2,36$ mm) e apenas 18,88% como material atravessado na malha 8. Em contraste, o milho apresenta um Distribuição mais equilibrada, com 87,66% do material atravessador na malha 8 e uma acumulação progressiva em malhas intermédias, atingindo o seu ponto de inflexão (D50) em torno da malha 12 (1,7 mm). Esta diferença é evidente nos valores de Menor percentagem de acumulação, onde o milho mantém percentagens significativamente mais elevadas em todas as malhas, indicando moagem mais eficiente e uniforme. Estas conclusões são consistentes com a teoria da moagem que afirma que as Propriedades físicas do material determinar a sua resposta à fratura. A soja, com maior teor de óleo e estrutura celular mais flexível, tem maior resistência à fratura por impacto, resultando em partículas mais grossas. O milho, com endosperma vítreo e maior teor de amido, fractura-se mais facilmente, gerando uma distribuição mais fina e uniforme. A literatura relata que materiais com dureza superior a 45 kg/cm² (como a soja) requerem mais energia de moagem e

produzem distribuições mais grosseiras, enquanto cereais como o milho (dureza 25-35 kg/cm²) respondem melhor à moagem por impacto. O comportamento observado na soja, com 81,12% do acumulado acumulado na malha 8, coincide com estudos anteriores que relatam baixa eficiência de moagem em leguminosas oleaginosas devido à sua capacidade de absorver energia sem se fraturarem completamente. Por outro lado, a distribuição do milho segue o modelo de Gates-Gaudin-Schuhman típico dos materiais frágeis. Noutros estudos, reporta 72-88% do material abaixo de 2 mm para milho, coincidindo com a nossa malha atravessadora de 87,66%. [28] natureza vítrea do endosperma. Assim como confirma que o [29] Presença de petróleo Na soja (18-22%) atua como amortecedor, reduzindo a geração de finos em 30-40% em comparação com materiais secos. Em contraste, noutras investigações obtém distribuições mais finas (D50 ≈ 1,2 mm) usando azoto líquido, sugerindo que as nossas condições convencionais limitam a eficiência. Isto mostra que ajustes adaptativos em tempo real podem melhorar a uniformidade da soja até 60%, indicando potencial de otimização não explorado no nosso estudo. Alguns estudos afirmam que moinhos de última geração com controlo de velocidade variável podem alcançar distribuições mais estreitas do que os equipamentos convencionais, além da incorporação dos protocolos atuais que recomendam o controlo de humidade implementado nos estúdios. Estas descobertas coincidem com trabalhos recentes sobre comportamento de rações e PSD na moagem por martelo, que mostram como a soja e o milho respondem de forma diferente à mesma triagem/triagem e como a humidade e a composição afetam a geração de finos e a distribuição de nutrientes por fração. Em particular, estudos observaram que, após a moagem por martelo, a soja tendem a reter frações relativamente grosseiras e que a adição de humidade modifica significativamente tanto a PSD como o consumo de energia, o que apoia a interpretação de que as propriedades dos grãos (óleo, estrutura) condicionam a eficiência do martelo e a orientação da curva do tamanho das partículas.[30][31] [32] [33] [34]

4.2.- Caso 2. Moinho de bolas

O milho tem um Distribuição significativamente mais fina além da soja, com 91,6% do material passante na malha 8 (2,36 mm) comparado com apenas 26,32% na soja. O ponto de inflexão (D50) está localizado aproximadamente em 1,3-1,4 mm para milho Versus 3,0-3,2 mm para soja, evidenciando uma diferença significativa na eficiência da moagem. Exposição de Soja Resistência à fratura, com 73,68% do acumulado retido na malha 8, consistente com estudos de *Chen et al. (2021)* sobre a capacidade dos materiais oleaginosos de absorver energia de impacto. O milho, com o seu endosperma vítreo, responde melhor à moagem por impacto, gerando uma maior proporção de partículas médias e finas. Os resultados coincidem com a maior eficiência de moagem dos cereais em comparação com as oleaginosas em condições semelhantes, mas destacam a necessidade de otimizar parâmetros

operacionais específicos para cada material. A interpretação dos resultados baseia-se em referências científicas recentes, como o estudo que explica a resistência à fratura da soja devido ao seu elevado teor de óleo e estrutura celular flexível, o que coincide com as nossas conclusões sobre distribuições de tamanho de partículas mais grosseiras em comparação com o milho. Igualmente [28] [35], Outros estudos elas destacam a influência do módulo elástico na retificação, reforçando a diferença marcada em D50 entre os dois materiais. Ao comparar os nossos resultados com a literatura, há coincidências que relatam distribuições mais finas para o milho em condições semelhantes de moagem, enquanto as discrepâncias surgem quando comparadas com aqueles que usaram moagem criogénica em soja e obtiveram distribuições significativamente mais finas, sugerindo que as nossas condições convencionais de funcionamento limitam a eficiência do processo. Revisões e trabalhos experimentais confirmam que o moinho de esferas é muito eficaz a fracionar e reduzir partículas quando o material é essencialmente friável ou rico em polissacarídeos, mas o seu desempenho em sementes oleaginosas densas pode ser limitado sem ajustes de parâmetros (tempo, meio, atmosfera). Isto é consistente com os nossos resultados: o milho (endosperma) é efetivamente reduzido, a soja não, exceto por alterações cirúrgicas ou tratamentos combinados.[36][28] [30] [37]

4.3.- Caso 3. Moinho de martelo + Moinho de esferas

A análise granulométrica do Caso 3 apresenta uma distribuição visivelmente mais fina e uniforme em comparação com casos anteriores, onde o milho apresenta um D50 ≈ 1,05 mm (perto da malha 18) e o Soja um D50 ≈ 1,25 mm (entre 16-18 malhas), evidenciando uma moagem mais eficiente. Esta melhoria é atribuída ao possível uso de Moinho de martelo seguido de moinho de esferas, uma combinação que segundo Alguns estudos neste caso Otimiza a fratura de materiais heterogéneos ao integrar mecanismos de impacto e abrasão. Os resultados coincidem com aqueles que relatam distribuições com D50 entre 0,9-1,2 mm para milho sob moagem sequencial, enquanto persistem discrepâncias relativamente à soja, cujos estudos indicam D50 >1,5 mm na moagem convencional, sugerindo que o nosso processo sequencial mitiga parcialmente a sua resistência à fratura. Entre as limitações, a ausência de controlo de humidade e o desgaste não monitorizado das peneiras podem ter afetado a reprodutibilidade, enquanto o viés do equipamento subestima o potencial de moagem criogénica. Estes fatores destacam a necessidade de incorporar métricas específicas de energia (em pesquisas futuras para validar a eficiência do processo sequencial). Por isso, é evidente que os métodos de fragmentação impactam diretamente o tamanho das partículas, bem como a forma obtida na sua farinha. Na literatura recente, foi demonstrado que o uso de etapas sequenciais ou moagem multi-etapas pode diminuir o consumo de energia por unidade de redução (dependendo da humidade e do tamanho do alvo) e

estabilizar a produção de partículas intermédias/finas; Além disso, a fase de pré-fragmentação facilita a ação da moagem fina subsequente e reduz o tempo de contacto necessário para atingir o tamanho alvo. [30] [28] [35] [33] [38][39] [40]

Embora os resultados obtidos mostrem diferenças claras entre grãos e tratamentos, existem limitações inerentes ao desenho experimental e aos fatores biofísicos do grão que podem modular a eficiência da moagem. No Composição interna (conteúdo lipídico, proteínas, estrutura celular) e o Humidade dos grãos influenciar a sua suscetibilidade à fratura. Por exemplo, um estudo recente mostra que, quando a humidade aumenta, os cereais (milho, arroz e soja) modificam o seu comportamento mecânico: passam de frágeis a viscoelásticos, alterando a força de fratura e a energia necessária. Estas variações podem alterar a fragmentação durante a moagem, sugerindo que fatores intrínsecos do grão para além do tipo de moinho podem condicionar a distribuição final do tamanho das partículas.[41]

Outra hipótese para explicar a menor eficiência de moagem da soja, em comparação com o milho, é o efeito tampão do teor de óleo. Na moagem da soja, foi reportado que teores mais elevados de lípidos limitam a redução do tamanho: o óleo reduz a fragilidade e favorece aglomerados ou partículas grosseiras após a moagem por impacto. Além disso, estudos de moagem por fricção ou moagem fina mostram que os métodos mecânicos afetam os grãos com matriz rica em amido de forma diferente daqueles com elevado teor de lípidos, modificando a eficiência, a forma das partículas e a dispersibilidade. Assim, os resultados atuais podem refletir uma interação entre a técnica de moagem e as propriedades bioquímicas do grão; Esta hipótese alternativa merece ser explorada em trabalhos futuros através da caracterização do óleo, proteína e estrutura celular, e controlo rigoroso da humidade.[42][28]

5.- Conclusões

O moinho de martelos (Caso 1) apresentou uma distribuição heterogénea, com um D50 \approx 2,8-2,9 mm para o milho e \approx 2,9 mm para a soja, evidenciando uma moagem ineficiente na soja, onde 81,12% do material foi retido em malhas de \geq 2,36 mm. Em contraste, o moinho de esferas (Caso 2) gerou distribuições mais finas para o milho (D50 \approx 1,38 mm), mas foi ineficaz para a soja (D50 \approx 3,53 mm), confirmando que a soja, devido ao seu maior teor de óleo e estrutura flexível, resiste à fratura por impacto e abrasão convencional.

A combinação de moinhos (Caso 3) alcançou a distribuição mais equilibrada, com D50 \approx 1,05 mm para o milho e **\approx 1,25 mm para a soja**, reduzindo a heterogeneidade observada nos casos individuais. Isto sugere que a sinergia entre os mecanismos de impacto (martelo) e abrasão (bolas) mitiga as limitações de cada

método separadamente, embora uma maior dispersão persista no milho (índice de uniformidade D90/D10 \approx 4,3) em comparação com a soja (\approx 2,66)

O moinho de bolas (Caso 2) teve o maior consumo específico de energia (CEE): 92,70 kW·h/t para soja contra 80,17 kW·h/t para milho no Caso 3, associado à maior densidade e resistência da soja. No entanto, este elevado consumo não se traduziu numa moagem fina da soja, o que indica ineficiência energética no processamento das oleaginosas em condições padrão.

A ANOVA aplicada mostrou $p > 0,05$ nos três casos, indicando "nenhuma diferença significativa" entre milho e soja. No entanto, os dados sobre o tamanho das partículas revelam disparidades operacionais críticas, como a concentração de 40,49% da soja na malha de 3,35 mm (Caso 1) em comparação com uma distribuição mais uniforme no milho. Isto expõe a insensibilidade da ANOVA univariada para captar diferenças em distribuições complexas, sublinhando a necessidade de uma análise específica por frações.

Os resultados da ANOVA para milho ($F = 0,0314$; $p = 0,9692$) mostram uma total ausência de diferenças significativas entre os parâmetros de tamanho das partículas D10, D50 e D90 segundo o método de moagem, evidenciando um comportamento uniforme. Na soja, embora a ANOVA mostre $F = 4,0430$ e $p = 0,0773$, a diferença não atinge significância estatística, mas sugere uma tendência para a variação, possivelmente influenciada pelo seu maior teor de óleo e pela resposta mecânica diferente à fratura.

A análise microscópica revelou que o moinho de martelo gera partículas angulares (retangulares), enquanto o moinho de esferas produz formas arredondadas (oval ou elipsoidal). No Caso 3, foi observada uma combinação de morfologias, que afeta propriedades funcionais como fluxo, compactação e reatividade. Isto destaca a importância de selecionar a tecnologia de moagem de acordo com as características desejadas no produto final.

Os resultados deste estudo podem ser aplicados na otimização dos processos de moagem na indústria de rações, farinha e óleo vegetal, onde o controlo do tamanho das partículas influencia diretamente a digestibilidade, homogeneidade da mistura e eficiência da extrusão. A configuração de moagem sequencial (martelo + bolas) está a emergir como uma alternativa viável para reduzir o consumo de energia e melhorar a consistência do tamanho das partículas em linhas de produção contínuas. Recomenda-se aprofundar a análise da energia específica de moagem e da sua relação com a humidade e composição do grão, bem como avaliar o efeito do tamanho das partículas na qualidade nutricional e funcional do produto final. Além disso, seria valioso explorar a implementação de tecnologias híbridas (como a moagem criogénica ou

assistida por ultrassom) para aumentar a eficiência e reprodutibilidade do processo, especialmente em sementes oleaginosas de difícil fratura.

6.- Contribuições dos Autores (Taxonomia dos Papéis dos Colaboradores (CRediT))

1. Conceptualização: Iván Torres
2. Curadoria de dados: Alejandro Noblecilla
3. Análise formal: Alejandro Noblecilla
4. Aquisição de fundos: Não aplicável
5. Investigação: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
6. Metodologia: Iván Torres, Alejandro Noblecilla, Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo.
7. Gestão de projetos: Stefanie Bonilla
8. Recursos: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
9. Software: Não aplicável.
10. Supervisão: Stefanie Bonilla
11. Validação: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo
12. Visualização: Alejandro Noblecilla
13. Argumento - rascunho original: Iván Torres, Alejandro Noblecilla
14. Escrita - revisão e edição: Stefanie Bonilla, Carlos Valdiviezo

7.- Referências.

[1] L. McCabe e J. Smith, Operações Unitárias em Engenharia Química, sétimo, 2007. <https://iestpcabana.edu.pe/wp-content/uploads/2021/11/OPERACIONES-UNITARIAS-EN-LA-INGENIERIA-QUIMICA.pdf>

[2] M. Roostaie, M. Soroush, V. Arian e A. Ghalambor, "Comparação de Vários Métodos de Distribuição-Medição do Tamanho de Partículas," SPE Reservoir evaluation & engineering, vol. 23, n.º 04, 2020. <https://doi.org/10.2118/199335-PA>

[3] G. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas e P. Juliano, Pós Alimentares: Propriedades Físicas, Processamento e Funcionalidade, Boston, MA: Springer, 2005. https://doi.org/10.1007/0-387-27613-0_12

[4] A. Gupta e D. Yan, Design e Operação de Processamento Mineral, Austrália Ocidental: Elsevier., 2016. https://toc.library.ethz.ch/objects/pdf03/e01_978-0-444-63589-1_01.pdf

[5] V. B. L.G. Austin, "Métodos experimentais para estudos de moagem em moinhos laboratoriais," Powder Technology, vol. 5, n.º 5, pp. 261-266, 2020. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(72\)80029-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(72)80029-9)

[6] B. Wills e J. Finch, Tecnologia de Processamento Mineral de Wills: Uma Introdução aos Aspectos Práticos do Tratamento de Minérios e Recuperação de Minerais, Butterworth-Heinemann, 2016. <https://shop.elsevier.com/books/wills-mineral-processing-technology/wills/978-0-08-097053-0>

[7] A. International, ASTM E11-17: Especificação Padrão para Tecido de Teste de Fio Tecido e Peneiras de Teste, 2017. <https://standards.globalspec.com/std/3863958/astm-e11-17>

[8] F. Etzler e R. Deanne, "Análise do tamanho das partículas: uma comparação de vários métodos ii," Caracterização de sistemas de partículas e partículas, vol. 14, n.º 6, pp. 278-282, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140604>

[9] A. Freire e M. A. Lalbay Fuentes, "Implementação de um moinho de martelo para o processo de farinha de trigo," Universidade Técnica de Cotopaxi, La Maná, 2022. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8473>

[10] F. Lyu, A. van del Poel, W. Hendriks e M. Thomas, "Distribuição do tamanho das partículas do milho e farinha de soja moída em martelo, a sua composição nutricional e características de digestão

in vitro," Animal Feed Science and Technology, vol. 281, p. 115095, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>

[11] R. Mugabi, Y. B. Byaruhanga, K. Eskridge e C. Welle, "Avaliação de desempenho de um moinho de martelo durante a moagem de cereais de milho," AgricEngInt: CIGR, vol. 21, n.º 2, p. 170, 2019. https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/download/5257/3011/23827?utm_source=chatgpt.com

[12] P. Pagán, R. Mollehuara-Canales, M. Sinche e J. Martínez, Operações Mecânicas de Separação Sólido-Líquido, Espanha: Mc Graw Hill Interamericana, 2023. https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=UYfEAAAQB-AJ&oi=fnd&pg=PA2&dq=P.+Mart%C3%ADnez-Pag%C3%A1n,+Tecnolog%C3%ADa+Mineral%C3%Argica,+Cartagena:+Universidad+T%C3%A9cnica+de+Cartagena,+2011.+&ots=XT4vyqxq_5&sig=apv8WuHNxMtMiepuo-IAccQsUU&red

[13] H. G. Merkus, Produção, Manuseamento e Caracterização de Materiais Particulados, Países Baixos: Springer Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4>

[14] J. Fu, Z. Xue, Z. Chen e L. Ren, "Estudo experimental sobre a distribuição específica da energia de moagem e do tamanho das partículas do grão de milho, espiga e espiga," International Journal of Agricultural and Biological Engineering, vol. 13, n.º 4, p. 135-142, 2020. <https://doi.org/10.25165/ij.ijabe.20201304.5327>

[15] G. Niu, T. Zhang, S. Cao, X. Zhang e L. Tao, "Efeito dos Métodos de Moagem do Milho e do Tamanho das Partículas na Digestão Nutricional das Galinhas Chahua.," Animals, vol. 13, n.º 14, p. 2364, 2023. <https://doi.org/10.3390/ani13142364>

[16] P. Tomach, "A Influência do Diâmetro do Meio de Moagem na Eficiência de Moagem num Moinho de Esferas Vibratórias," MDPI, vol. 17, n.º 12, p. 2924, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17122924>

[17] Y. Catillo Álvarez, R. Jiménez, J. Monteagudo, B. Rodríguez e C. Patiño, "Modelo Matemático para Melhorar a Eficiência Energética em Fábricas de Martelos e a Sua Utilização na Indústria de Alimentação: Análise e Validação num Estudo de Caso em Cuba.," Processes, vol. 13, n.º 5, p. 1523., 2025. <https://doi.org/10.3390/pr13051523>

[18] T. Son, H. B. Trinh, S. Kim, B. Dugarjav e J. Lee, "Estimativa do Consumo de Energia para o Processo de Concentrado de Minério de Tungstênio para a Integração de Fontes de Energia Renovável na Mongólia.," Minerals, vol. 13, n.º 8, p. 1059, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13081059>

[19] P. Martínez-Pagán, M. Sinche González e J. Martínez, Operações Mecânicas de Separação Sólido-Líquido, Cartagena: Mc Graw Hill, 2023. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=990926>

[20] W. Gutiérrez, "Ensaio granulométrico de solo usando o método de peneiração.," Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, vol. 7, n.º 2, pp. 6923-69-25, 2023. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5834

[21] A. Roca, "Padronização do método de peneiramento para estabelecer critérios de aceitação e/ou rejeição em matérias-primas para uma linha extrudida na indústria alimentar.," Universidad de Antioquia, Medellín, Colômbia, 2021. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/beatd1f9-a1d0-49d2-a007-1993bc2de107/content>

[22] A. Terence, Amostragem de Pó e Determinação do Tamanho das Partículas, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2023. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=.+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Politécnica+A9cnica+de+Cartagena.+\(2020\).,+2023.&ots=1B0GeyOWcy&sig=QkuduBccOmwyOrSmeJxjTPD1](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5NgqTf9L63kC&oi=fnd&pg=PP1&dq=.+Terence,+Powder+Sampling+and+Particle+Size+Determination,+Cartagena:+Universidad+Politécnica+A9cnica+de+Cartagena.+(2020).,+2023.&ots=1B0GeyOWcy&sig=QkuduBccOmwyOrSmeJxjTPD1)

[23] P. Mort, "Análise e representação gráfica das distribuições de tamanho de partículas," Powder Technology, vol. 420, p. 118100, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118100>

[24] G. Lyman, "Uma Teoria Estatística para Amostragem de Materiais Particulados.," Minerals, vol. 13, n.º 7, p. 905, 2023. <https://doi.org/10.3390/min13070905>

[25] H. Jung, Y. Ju Lee e W. B. Yoon, "Efeito do Conteúdo de Umidade no Processo de Moagem e Propriedades do Pó nos Alimentos: Uma Revisão.," Processes, vol. 6, n.º 6, p. 69, 2018. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>

[26] M. Warechowska, "Algumas propriedades físicas dos cereais e consumo energético da moagem.," Agricultural Engineering, vol. 1,

- n° 149, pp. 239-2049, 2014.
<http://dx.medra.org/10.14654/ir.2014.149.025>
- [27] H. V. . J. Dodds, "Caracterização da forma de partículas usando descritores morfológicos," *Caracterização de sistemas de partículas e partículas*, vol. 14, n.º 6, pp. 272-277, 2004. <https://doi.org/10.1002/ppsc.19970140603>.
- [28] X. Tian, X. Wang e Z. Wang, "Controlo da distribuição do tamanho das partículas durante a moagem do trigo: qualidade nutricional e base funcional dos produtos de farinha — uma revisão abrangente," *International Journal of Food Science + Technology*, vol. 57, n° 12, p. 7556–7572, dezembro de 2022. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16120>
- [29] N. Mohamad, I. Rodriguez-Donis, A. Cavaco-Soares e P. Evon, "Bio-Refinaria de Oleaginosas: Extração de Óleo, Separação de Metabólicos Secundários para a Valorização da Farinha de Proteína — Uma Revisão," *Processes*, vol. 10, n.º 5, p. 841, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10050841>
- [30] S. Li, S. Ge, Z. Huang, Q. Wang e H. Zhao, , "Tecnologia de moagem criogénica para medicina tradicional chinesa à base de plantas," *Cryogenics*, vol. 31, n° 2, pp. 136-137, 1991. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(91\)90260-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(91)90260-4)
- [31] N. Yancey, C. T. Wright e T. L. Westover, "Otimização do desempenho do moinho de martelos através da seleção de peneiras e design do martelo," *Biofuels*, vol. 4, n° 1, pp. 85-94, 2014. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.77>
- [32] W. B. Rowe, "Rumo à Alta Produtividade na Rectificação de Precisão," *MPDI*, vol. 3, n° 2, p. 24, 2018. <https://doi.org/10.3390/inventions3020024>
- [33] D. Wang, C. He, H. Tian, F. Liu e T. Zhang, "Otimização de parâmetros e investigação experimental no moinho de martelos," *Imateh-Agricultural Engineering*, vol. 62, n° 3, pp. 342-349, 2020. <https://doi.org/10.35633/inmateh-62-36>
- [34] F. Lyu, M. Thomas e W. H. Hendriks, "Distribuição do tamanho das partículas do milho e farinha de soja moída a martelo, a sua composição nutricional e características de digestão in vitro," *Animal Feed Science and Technology*, vol. 281, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115095>
- [35] R. K. Gupta e S. K. Das, "Resistência à fratura de sementes e grãos de girassol à carga compressiva," *Journal of Food Engineering*, vol. 46, n.º 1, pp. 1-8, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00061-3)
- [36] Y. Haddad, F. Mabilille, J. Abecassis e J. Benet, "Propriedades reológicas do endosperma de trigo com uma visão sobre o comportamento de moagem," *Powder Technology*, vol. 105, n° 1-3, pp. 89-94, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00122-9)
- [37] J. Ke, X. Wang, X. Gao e Y. Zhou, "Moagem por bolas melhora as características físico-químicas, funcionais e de emulsificação da fibra alimentar insolúvel de *Polygonatum sibiricum*," *MDPI*, vol. 13, n° 15, p. 2323, 2024. <https://doi.org/10.3390/foods13152323>
- [38] Y. Xie, C. Zhang e S. Mei, "Decisão de otimização dos parâmetros do processo de usinagem considerando o consumo de energia de fresagem e a energia específica de corte," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 128, pp. 786-795, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [39] L. Feltner, E. Korte, D. F. Bahr e P. Mort, "Análises de tamanho e forma de partículas para fabrico aditivo em leite de pólvora," *Particuology*, vol. 101, pp. 33-42, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.034>
- [40] Y. Liu, J. Wang, J. C. Barth, K. R. Welsch, V. McIntyre e M. P. Wolcott, "Efeitos do método de moagem em múltiplas etapas no consumo energético dos resíduos florestais cominutivos," *Industrial Crops and Products*, vol. 145, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111955>
- [41] W. Kruszelnicka, Z. Chen e K. Ambrose, "Propriedades Físico-Mecânicas Dependentes da Humidade do Milho, Arroz e Soja Relacionadas com o Manuseamento e Processamento," *Materials*, vol. 15, n° 24, p. 8724, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15248729>
- [42] R. Politiek, M. Bruins, J. Keppler e M. Schutyser, "Efeito do teor de óleo na moagem de pinos da soja," *Journal of Food Engineering*, vol. 334, p. 111149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111149>

Diretrizes para publicação na revista INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento

1. Informação Geral

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 periodicidade bienal e foca-se em contribuições originais na área da ciência e engenharia.

A INQUIDE é uma revista revisada por pares que utiliza um sistema de revisão externa revista, sob a metodologia de revisão dupla-cega, seguindo os padrões de publicação do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Este sistema garante um processo de revisão objetivo, imparcial e transparente, que facilita a inclusão da revista em bases de dados, repositórios e índices internacionais de referência.

Atualmente, o INQUIDE está indexado em:

- 1.- Catálogo Latindex 2.0 (Sistema Regional de Informação Online para Revistas Científicas da América Latina, Caraíbas, Espanha e Portugal).
- 2.- Dialnet (Fundação Dialnet, Universidade de La Rioja).
- 3.- Rede de Editores e Revistas Científicas Equatorianas (RERCIE).
- 4.- Crossref, com atribuição DOI (Identificador Digital de Objetos) 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 investigação de alta qualidade a nível internacional.

2. Âmbito e Política

2.1. Tema

A INQUIDE – Engenharia Química e Desenvolvimento publica contribuições 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 dá prioridade à publicação de:

- Artigos de investigação empírica que apresentam resultados originais e significativos.
- Relatórios de desenvolvimento tecnológico que descrevem inovações ou aplicações práticas em engenharia e ciência.
- Propostas para modelos e soluções inovadoras que contribuam para o avanço do conhecimento.
- Revisões de ponta que sintetizam e analisam criticamente o conhecimento atual numa área específica.
- Artigos de ensaio que apresentam reflexões teóricas ou metodológicas relevantes para a área.

2.3. Requisitos de originalidade

A INQUIDE publica apenas obras originais e inéditas escritas em espanhol, inglês ou português. Os manuscritos não devem ter sido previamente publicados em qualquer meio impresso ou eletrónico, nem estar em processo de arbitragem ou publicação noutra revista.

2.4. Processo de arbitragem

Todos os artigos submetidos serão sujeitos a um rigoroso processo de revisão por pares sob a metodologia de revisão dupla-cega. A avaliação baseia-se em critérios de:

- Originalidade: A obra deve apresentar contribuições inovadoras para a área.
- 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.
- Cumprimento das normas editoriais: O manuscrito deve seguir as diretrizes de formato e estilo da revista.

A receção de um manuscrito não implica um compromisso com a publicação. A decisão final de publicação será tomada pelo Conselho Editorial, com base nas recomendações dos revisores especializados.

2.5. Documentos Obrigatórios

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 dos direitos: Disponível para download em <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7GC76hgz?e=ldbXMf>.

2.6. Submissão de manuscritos

Os manuscritos devem ser submetidos através do Open Journal System (OJS) da revista, disponível em:

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

Além disso, os autores podem enviar consultas ou documentos complementares para o email:

inquide@ug.edu.ec o francisco.duquea@ug.edu.ec.

3. Apresentação e estrutura dos manuscritos

Todos os manuscritos submetidos à INQUIDE devem seguir o formato estabelecido pela revista. As regras e requisitos para a apresentação e estrutura dos artigos são detalhados abaixo:

3.1. Formato do manuscrito

- Os manuscritos devem ser escritos no Microsoft Word (formato.doc ou .docx).
- O modelo oficial da revista pode ser descarregado em: https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EXSf2GX2MuJEn-hf5qwsswUBzx4-1vYE_6qKE8ba2UF62g?e=68U2h9.

- O documento deve estar numa coluna dupla, com as seguintes margens: Cima: 3,5 cm, Inferior: 3,5 cm, Esquerda: 1,5 cm, Direita: 1,5 cm
- Use fonte Times New Roman, tamanho 10, justificada, com espaçamento de linha única e espaçamento zero.

3.2. Estrutura do manuscrito

3.2.1. Apresentação e Carta de Apresentação

1. Título (espanhol) / Título (inglês):
 - Deve ser conciso mas informativo, com um máximo de 20 palavras.
 - Se o artigo estiver 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.
 - Especifique a afiliação institucional de cada autor, incluindo: Dependência e instituição; Email institucional; ORCID; Cidade e campo.
 - Nota: Um máximo de 40% dos autores pode estar afiliado 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. Resultados principais.
 5. Principais conclusões.
4. Palavras chave (espanhol) / Palavras-chave (inglês):
 - Forneça um máximo de 7 palavras-chave em cada língua, diretamente relacionadas com o tema do trabalho.
 - Recomenda-se utilizar termos do Dicionário de Sinos da UNESCO.
5. Carta de Apresentação:
 - Inclua uma declaração certificando que o manuscrito é uma contribuição original, não submetida ou em revisão noutra revista.
 - Confirmar a autoria e aceitação de alterações formais de acordo com os padrões da revista.
 - Descarregue o formato da carta de apresentação em:

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

<https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwIhD7GC76hgzg?e=ldbXMF>

3.2.2. Estrutura do manuscrito

1. Introdução:
 - Apresente o problema de investigação, o contexto, a justificação e os objetivos do estudo.
 - Inclua uma revisão da literatura mais relevante e atual, tanto a nível nacional como internacional.
2. Materiais e métodos:

- Descreva a metodologia, os materiais, o desenho experimental e os procedimentos de forma clara e detalhada.
- Se for utilizada uma metodologia original, explique a sua justificação e possíveis limitações.

3. Resultados:

- Apresentar 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:

- Interprete os resultados, relacionando-os com os objetivos do estudo e a literatura existente.
- Discutir as implicações teóricas e práticas dos resultados.

5. Conclusões:

- Resuma as conclusões mais importantes do estudo.
- Destaque as contribuições do trabalho e propõe futuras linhas de investigação.

6. Agradecimentos (opcionais):

- Reconhecer fontes de financiamento, colaboradores ou instituições que apoiaram a investigação.

7. Referências:

- Siga o estilo IEEE para citações e a lista de referências.
- Use o gestor de referências do Microsoft Word para gerir as citações.
- Certifique-se de que todas as referências são citadas no texto e vice-versa.

3.3. Figuras, tabelas e equações

- Figuras e tabelas:
 - Devem ser numeradas consecutivamente (Fig. 1, Tabela 1, etc.) e citadas no texto.
 - As figuras 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:
 - Usa 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 manuscritos 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).
 - As figuras estão em ficheiros separados, com a resolução e formato adequados.
 - A carta de apresentação e outros documentos obrigatórios.

4. Processo de Submissão

A submissão dos manuscritos ao INQUIDE deve ser realizada seguindo os seguintes passos e requisitos:

4.1. Plataforma de transporte

- Todos os manuscritos 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 de submeter.

4.2. Documentos Obrigatórios

No momento da submissão, os autores devem carregar os 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 os dados completos dos autores e a sua afiliação institucional.
2. Figuras e tabelas:
 - As figuras devem ser enviadas 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 noutra revista.
 - Confirmar a autoria e aceitação de alterações formais de acordo com os padrões da revista.

Descargue el formato de Carta de Apresentação desde: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EZYnPTveWCtKgV5aNNZ1icQBdaFzvOYKCLwlhD7Gc76hgz?e=ldbXMf>

4. Lista de verificação:

- Certifique-se de que o manuscrito cumpre todos os requisitos técnicos e de formatação.

Descarregue a lista de verificação em: <https://1drv.ms/w/c/7bce1d25160b4657/EdRL-JU4fBVBqSt1GD7t1N8BZVFXyapjNxM8ji3Fa9LFhA?e=Z7OqeO>

4.3. Gestor de Correspondência

- Um dos autores deve ser designado como **oficial de correspondência**.
- Este autor será o principal ponto de contacto para todas as comunicações relacionadas com manuscritos.

4.4. Confirmação de receção

- Uma vez submetido o manuscrito, o sistema OJS enviará automaticamente um email de confirmação ao autor correspondente.

4.5. Consultas e Apoio

- Para questões sobre o processo de submissão ou problemas técnicos, os autores podem contactar a equipa editorial através dos seguintes emails:
 - inquide@ug.edu.ec
 - francisco.duquea@ug.edu.ec

5. Processo Editorial

O processo editorial da INQUIDE é concebido para 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 sujeito a uma verificação de plágio utilizando software especializado. É aceite um máximo de 15% de semelhança com outras obras.

Se o manuscrito não cumprir nenhum destes requisitos, o autor será solicitado a fazer as correções necessárias antes de prosseguir com o processo de avaliação.

5.2. Revisão por Pares

Os manuscritos que passam na revisão inicial serão sujeitos a um rigoroso processo de revisão por pares sob a metodologia de revisão dupla-cega. Este processo inclui os seguintes passos:

1. Atribuição dos revisores:
 - O editor atribuirá 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 a área.
 - Cada revisor emitirá um relatório com um dos seguintes resultados:
 - Publicável sem alterações.
 - Publicável com sugestões de alterações.
 - Publicável com alterações obrigatórias.
 - Não é publicável.
3. Decisão editorial:
 - O editor analisa os relatórios dos revisores e toma a decisão final sobre aceitar ou rejeitar o 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. Hora da Revisão

- O processo de revisão por pares dura, no mínimo, 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

- Se o manuscrito for aceite com alterações, o autor deve 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 aceites serão publicados nas edições bienais 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 Química e Desenvolvimento publica dois números por ano, nas seguintes datas:

- Primeira edição: 1 de janeiro.
- Segunda edição: 1 de julho.

6.1. Tempos de envio

Para garantir que os manuscritos sejam 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 de Artigos

- Uma vez publicados, os artigos estarão disponíveis na plataforma eletrónica da revista, acessível através de: <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/iqd>.
- Cada artigo publicado incluirá um DOI (Identificador Digital de Objeto), que garante a sua identificação e acesso permanente.

6.3. Política de Acesso Aberto

A 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. Informação sobre o uso da Inteligência Artificial

A INQUIDE reconhece a importância de manter elevados padrões éticos na investigação científica, especialmente no uso da Inteligência Artificial (IA). Por isso, são estabelecidas as seguintes diretrizes:

7.1. Utilização da IA na investigação

- Se a Inteligência Artificial tiver sido utilizada em qualquer fase da investigação apresentada no manuscrito, os autores devem indicar explicitamente isso na Carta de Apresentação.
- Especifique as secções do manuscrito onde a IA foi utilizada, descrevendo a sua função e âmbito.

7.2. Transparência e responsabilidade

- Os autores são responsáveis por garantir que o uso da IA não compromete a originalidade, integridade e rigor científico do trabalho.
- A equipa editorial irá avaliar a declaração de utilização da IA e poderá solicitar informações adicionais, se necessário.

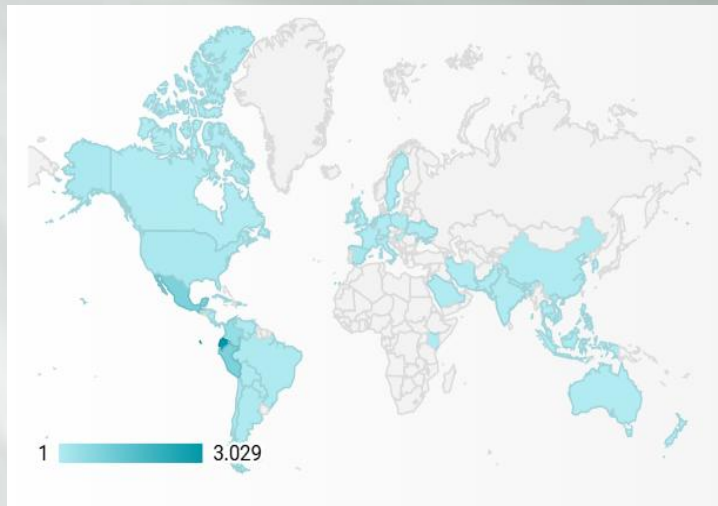
7.3. Aceitação de Manuscritos com IA

- A decisão final sobre a aceitação de manuscritos que tenham utilizado IA cabe ao Conselho Editorial, com

base na transparência e no cumprimento das normas éticas da revista.

INQUIDE

Exploramos o desconhecido e enfrentamos o aparentemente impossível. Bem-vindo à fronteira do conhecimento, onde a ciência, a engenharia e a tecnologia convergem para promover o desenvolvimento transformador.



Artigos Mais Visualizados

Título. Pesquisa por título, autor e ID.	Total
Duque-Aldaz et al. Previsão do teor de umidade no processo de secagem do cacau por meio de regressão linear simples.	1375
Jiménez Sánchez et al. Obtenção de celulose bacteriana a partir de kombucha mediante a substituição do chá preto por chá de casca de café.	1003
Alulema Cuesta et al. Estudo comparativo da extração e caracterização do óleo de abacate por meio dos processos de: termobatimento, enzimático, prensagem hidráulica e expeller.	851
Catarí et al. Fotodegradação de microplásticos.	757
Fu-López et al. Avaliação de riscos e medidas de controle para máquinas em uma empresa de produção de alimentos.	740
Bonilla Bermeo et al. Estudo da bioadsorção de metais pesados (Pb e Cu) nas águas do rio Puyango, utilizando casca de laranja e banana maçã.	711
Tigrero Zapata et al. Impacto das embalagens plásticas de pesticidas nos solos agrícolas: um problema cultural na agricultura equatoriana.	691
Delgado Gómez et al. Implementação da gastrodiploacia como eixo estratégico do desenvolvimento turístico e sua contribuição para a difusão cultural do Equador.	274
España Francis et al. Ocorrência de cianotoxinas na água e em alimentos frescos: implicações para a saúde humana.	392
Carrera Coloma et al. Estudo teórico de alternativas para o controle de <i>Rupella albinella</i> em cultivares de arroz (<i>Oryza sativa</i>).	361

Contato principal
Francisco Javier Duque-Aldaz
Universidade de Guayaquil
Telefone: +593 98 564 1201 (WhatsApp)
Telefone: +593 99 576 0762 (Telegram)
francisco.duquea@ug.edu.ec
inquide@ug.edu.ec