

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E AQUICULTURA

**MÉTODOS INOVADORES NA CRIAÇÃO E NO APROVEITAMENTO DE
SUBPRODUTOS DE TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*).**

RILDO JOSÉ VASCONCELOS DE ANDRADE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura da Universidade Federal Rural de Pernambuco como exigência para obtenção do título de Doutor

Prof. Dr(a). Roberta Borda Soares

Orientadora

Prof. Dr. Alfredo Olivera Galvez

Prof. Dr. Paulo Roberto Campagnoli de Oliveira Filho

Coorientadores

RECIFE, 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Centra, Recife-PE, Brasil

A553m Andrade, Rildo José Vasconcelos de.

Métodos inovadores na criação e no aproveitamento de subprodutos de Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) / Rildo José Vasconcelos de Andrade. – Recife, 2025.

62 f. : il.

Orientador: Roberta Borda Soares.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aqüicultura, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Peixes - Criação 2. Tecnologia de alimentos 3. Pescados
4. Aquicultura 5. Água – Qualidade I. Soares, Roberta Borda, orient.

II. Título

CDD 639

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E AQUICULTURA

MÉTODOS INOVADORES NA CRIAÇÃO E NO APROVEITAMENTO DE
SUBPRODUTOS DE TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*).

RILDO JOSÉ VASCONCELOS DE ANDRADE

Prof. Dr(a). Prof. Roberta Borda Soares

Orientadora

Departamento de Pesca e Aquicultura/UFRPE

Prof. Dr. Ronaldo Olivera Cavalli

Membro externo

Instituto de Oceanografia/FURG

Prof. Dr(a). Neide Kazue Sakugawa Shinohara

Membro externo

Departamento de Tecnologia Rural/UFRPE

Prof. Dr(a). Elizabeth Sampaio de Medeiros

Membro externo

Departamento de Medicina Veterinária/UFRPE

Prof. Dr(a). Gelcirene de Albuquerque Costa

Membro externo

Departamento de Pesca e Aquicultura/UFRPE

Dedicatória

Dedico este trabalho a Deus, minha família e todas as pessoas que me apoiaram.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por estar sempre presente;

Agradeço ao meu pai Rildo José, minha mãe Ana Maria e ao meu irmão Francisco Andrade, por terem sempre me apoiado;

Agradeço também a Mirela Rodrigues, minha futura esposa, pelos conselhos, apoio e por estar sempre comigo;

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura, e aos professores que contribuíram durante a minha formação;

A minha orientadora Professora Dr(a) Roberta Borda Soares, pela orientação e grande apoio;

Aos Professores Dr(s) Alfredo Olivera Galvez e Paulo Roberto Campagnoli de Oliveira Filho, pela coorientação e grande apoio;

A Professora Dr (a) Neide Kazue Sakugawa Shinohara pela grande ajuda e apoio;

Ao meu amigo Rodrigo Crasto, por toda ajuda e aprendizado durante minha trajetória;

Aos meus amigos José Carlos, Elizabeth Santos, Eloá Dandara, Gabriel Moura, Gil Brás, Lucas Rafael, Salomão Ribeiro, Ezechiel Houvessou, Laenne Moraes, Deyvid Oliveira, Bruna Silva, Indira Macedo, Islaine Lemos, Fábio Alves e todos que me deram apoio;

Aos meus amigos da academia golfinhos;

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado e pelo financiamento do projeto de pesquisa;

E a todos familiares, amigos e colegas.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo propor inovações tecnológicas aplicadas à cadeia produtiva da tilapicultura em Pernambuco, contemplando tanto o aproveitamento de subprodutos do processamento do pescado quanto o uso de ferramentas digitais de monitoramento da qualidade da água. Foram desenvolvidos dois estudos principais. O primeiro estudo teve como objetivo desenvolver e realizar análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais do petisco de peixe *keropok lekor*, utilizando CMS de subprodutos de tilápia do Nilo (0, 10 e 20%) e suplementado com fibra de trigo (0, 1 e 2%). Foram conduzidas análises físico-químicas (cor, textura instrumental, pH, oxidação lipídica (TBARS), atividade de água, bases nitrogenadas voláteis (BNV), composição centesimal), microbiológicas e sensoriais. Os resultados demonstraram que a inclusão de CMS reduziu a intensidade de vermelho e amarelo, cinzas, carboidratos e BNV, enquanto aumentou o pH, atividade de água, proteína e umidade. A fibra de trigo contribuiu para maior intensidade de vermelho e redução da BNV, embora tenha tornado o produto menos luminoso. As análises microbiológicas estiveram em conformidade com a legislação brasileira RDC 331 e IN60, e os testes sensoriais, realizados com 120 avaliadores não treinados, apontaram boa aceitação em todos os atributos. A formulação mais promissora reuniu 20% de CMS e 2% de fibra de trigo, por apresentar melhor composição nutricional e aceitação sensorial, indicando viabilidade para produção comercial. O segundo estudo consistiu no desenvolvimento e validação de um sistema de monitoramento inteligente, de baixo custo, baseado na Internet das Coisas (IoT), voltado para a aquicultura de precisão. O protótipo foi composto por sensores subaquáticos para medição em tempo real de temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD), este último estimado por rede neural artificial a partir dos demais parâmetros. Testes de campo foram realizados em pisciculturas de tilápia do Nilo localizadas em São José do Egito, Serra Talhada e Recife (PE), durante quatro meses. Para a avaliação de desempenho da acurácia dos sensores, foi utilizado o coeficiente de variação da equação do desvio quadrático médio (CV-RMSE). Os sensores apresentaram alta precisão para temperatura (CV-RMSE $\leq 2,93\%$) e pH (CV-RMSE $\leq 16,01\%$), enquanto as estimativas de OD apresentaram maior variabilidade (CV-RMSE de 58,01% a 81,73%), demandando melhorias no modelo preditivo. Apesar disso, o sistema demonstrou potencial para a aquicultura 4.0 ao possibilitar coleta de dados contínua, armazenamento em nuvem, acesso remoto e alertas automatizados, favorecendo decisões rápidas e eficazes no manejo. Conclui-se que a integração entre inovações em processamento de subprodutos e tecnologias digitais de monitoramento pode contribuir significativamente para a sustentabilidade e competitividade da tilapicultura. Recomenda-se que pesquisas futuras avancem na otimização dos modelos preditivos e na avaliação econômica das soluções propostas.

Palavras Chave: Piscicultura; Tecnologia de alimentos; Subprodutos de pescado; Aquicultura 4.0; Qualidade de água.

Abstract

This study aimed to propose technological innovations for the tilapia farming production chain in Pernambuco, encompassing both the use of fish processing byproducts and the use of digital water quality monitoring tools. Two main studies were developed. The first study aimed to develop and perform physicochemical, microbiological, and sensory analyses of the *keropok lekor* fish snack, using MSM from Nile tilapia byproducts (0, 10, and 20%) and supplemented with wheat fiber (0, 1, and 2%). Physicochemical analyses (color, instrumental texture, pH, lipid oxidation (TBARS), water activity, total volatile nitrogenous bases (TVB-N), proximate composition), microbiological, and sensory analyses were conducted. The results demonstrated that the inclusion of MSM reduced the intensity of red and yellow, ash, carbohydrates, and TVB-N, while increasing the pH, water activity, protein, and moisture. Wheat fiber contributed to greater red intensity and reduced TVB-N, although it made the product less luminous. Microbiological analyses confirmed compliance with Brazilian legislation RDC 331 and IN60, and sensory testing, conducted with 120 untrained evaluators, indicated good acceptance across all attributes. The most promising formulation, which combined 20% MSM and 2% wheat fiber, presented the best nutritional composition and acceptance, indicating viability for commercial production. The second study involved the development and validation of a low-cost, intelligent monitoring system based on the Internet of Things (IoT) for precision aquaculture. The prototype consisted of underwater sensors for real-time measurement of temperature, pH, and dissolved oxygen (DO), the latter estimated using an artificial neural network (AI). Field tests were conducted in Nile tilapia farms located in São José do Egito, Serra Talhada, and Recife, Pernambuco, for four months. The coefficient of variation of the root mean square deviation (CV-RMSE) was used to evaluate the sensors' accuracy. The sensors demonstrated high accuracy for temperature (CV-RMSE \leq 2.93%) and pH (CV-RMSE \leq 16.01%), while DO estimates showed greater variability (CV-RMSE from 58.01% to 81.73%), requiring improvements to the predictive model. Despite this, the system demonstrated potential for aquaculture 4.0 by enabling continuous data collection, cloud storage, remote access and automated alerts, favoring quick and effective management decisions. The conclusion is that the integration of innovations in byproduct processing and digital monitoring technologies can significantly contribute to the sustainability and competitiveness of tilapia farming. Future research is recommended to advance the optimization of predictive models and the economic evaluation of proposed solutions.

Key words: Fish farming; Food technology; Fish by-products; Aquaculture 4.0; Water quality.

Lista de figuras

| | Artigo 1 | Pág. |
|------------------|--|------|
| Figure 1. | Values of color L* (a), a* (b), and b* (c) of <i>keropoks</i> made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber | 28 |
| Figure 2. | pH values of <i>keropoks</i> made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber | 29 |
| Figure 3. | Variation values of total volatile basic nitrogen (TVB-N mg/100g) content of <i>keropoks</i> made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber | 30 |
| Figure 4. | Water activity (<i>A_w</i>) values of <i>keropoks</i> made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber | 31 |
| Figure 5. | Variations in moisture (a), protein (b), ash (c), and carbohydrates (d) content of <i>keropoks</i> made with meat mechanically separated from tilapia by-products and supplemented with wheat fiber. | 33 |

Lista de tabelas

| Artigo 1 | | Pág. |
|------------------|---|-------------|
| Table 1. | Formulations (in percentage) to obtain <i>keropoks</i> mass using mechanically separated meat (MSM) from Nile tilapia by-products and supplemented with dietary fiber from wheat | 20 |
| Table 2. | Planning for the study of <i>keropoks</i> with the addition of different percentages of inclusion of mechanically separated meat (MSM) from tilapia filleting residues and wheat fiber | 21 |
| Table 3. | Results of physicochemical analysis of <i>keropoks</i> prepared with mechanically separated tilapia by-products and supplemented with wheat fiber ¹ | 25 |
| Table 4. | Parameter estimates for the relationships between the proportions of fiber and mechanically separated meat (MSM) and the different response variables. The rightmost columns contain the adjusted coefficient of determination (R^2) and the probabilities (p) calculated using Fisher's tests. | 26 |
| Table 5. | Proximate composition (mean \pm standard deviation) in <i>keropoks</i> made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber ¹ | 32 |
| Table 6. | Microbial count (Aerobic psychrotrophic, <i>Escherichia coli</i> , coagulase-positive <i>Staphylococcus</i> , and <i>Salmonella</i> sp.) of <i>keropoks</i> made with by-products from the industrialization of tilapia. Average counts (log CFU/g) | 34 |
| Table 7. | Averages in sensory analyses of <i>keropoks lekor</i> made with mechanically separated meat (MSM) from tilapia by-products and supplemented with wheat fiber ¹ | 35 |
| Artigo 2 | | |
| Tabela 1. | Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na piscicultura de <i>Oreochromis niloticus</i> localizada em São José do Egito – PE | 52 |
| Tabela 2. | Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na piscicultura de <i>Oreochromis niloticus</i> localizada em Serra Talhada – PE | 52 |

Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na
Tabela 3. piscicultura de *Oreochromis niloticus* localizada em Recife – PE, 53
na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 12 |
| 1.2 Objetivos..... | 14 |
| 2. Artigo 1: Development of <i>keropok lekor-type</i> snack using by-products from Nile tilapia <i>Oreochromis niloticus</i>..... | 15 |
| 3. Artigo 2: Aplicação da Internet das Coisas (IoT) no Monitoramento Automatizado de Tanques de Piscicultura no estado de Pernambuco | 43 |
| 4. Considerações finais | 58 |
| 5. Referências gerais | 60 |

1. Introdução

No ano de 2022, a produção global da aquicultura atingiu 130,9 milhões de toneladas, avaliadas em US\$ 312,8 bilhões, representando 59% da produção global da pesca e da aquicultura (FAO, 2024). Em 2024, a produção brasileira de peixes de cultivo alcançou 968.745 toneladas, um crescimento de 9,21% em relação a 2023 (887.029 t), demonstrando a força da piscicultura nacional mesmo em períodos de instabilidade, como o da pandemia da COVID 19. Este foi o maior avanço registrado nos dez anos de levantamento da Associação Brasileira da Piscicultura, iniciado em 2015, quando a produção era de 638.000 toneladas. A tilápia (*Oreochromis* spp.) liderou esse crescimento, com 662.230 toneladas, um aumento expressivo de 14,36% sobre o ano anterior (579.080 t) (Peixe BR, 2025).

A tilápia é o peixe mais cultivado no Brasil devido à sua alta resistência ao manejo, capacidade de adaptação a diferentes sistemas de cultivo e tolerância a amplas variações na qualidade da água (como oxigênio, temperatura, salinidade, pH e amônia). Além disso, destaca-se pelo rápido crescimento e facilidade de reprodução (El-Sayed, 2020; Dagne et al., 2013).

A produção de tilápia no semiárido brasileiro, especialmente no Nordeste, tem se mostrado uma alternativa promissora para geração de renda e segurança alimentar, apesar dos desafios impostos pela escassez hídrica. O estado de Pernambuco teve uma produção total de 35.100 toneladas de tilápia no ano de 2024 (Peixe Br, 2025). Entretanto, essa produção ainda não atingiu seu pleno potencial, podendo crescer com o aproveitamento de diversas fontes de águas interiores provenientes de poços. Embora essas águas sejam impróprias para o consumo humano, por serem salobras, podem ser utilizadas no cultivo de tilápia (De Azevedo et al., 2015).

Contudo, um dos principais gargalos enfrentados pela tilapicultura nas regiões de semiárido é a falta de acompanhamento técnico especializado. Nesse contexto, o uso de tecnologias inovadoras e remotas surge como uma alternativa promissora para suprir essa demanda. A Internet das Coisas (IoT - Internet of Things) possibilita a conexão em tempo real de objetos à internet, com o objetivo de oferecer serviços tanto para objetos quanto para pessoas (Routh e Pal, 2018). Essa tecnologia opera por meio de redes de sensores e atuadores sem fio, permitindo o monitoramento e a coleta de dados, que podem ser disponibilizados em nuvem, promovendo a interação entre pessoas, objetos e informações, independentemente de sua localização geográfica (Routh e Pal, 2018).

Na aquicultura de precisão, o uso da IoT e de sensores representa uma inovação tecnológica que favorece a automação dos processos e aprimora a tomada de decisões, resultando no que se denomina aquicultura 4.0 (European Union, 2017; De Clercq et al., 2018). A aquicultura 4.0 baseia-se na integração de diversas ferramentas de informação e comunicação, sustentadas por tecnologias avançadas (Lyra, 2019). Esses conceitos referem-se a um conjunto de tecnologias digitais integradas e conectadas por softwares, sistemas e equipamentos de automação, capazes de otimizar a produção (Nuter, 2020). Tal tecnologia vem transformando a produção de organismos aquáticos, tornando os processos mais ágeis e possibilitando o acesso a dados que, anteriormente, eram de difícil obtenção, auxiliando os produtores a tomarem decisões mais assertivas (Sansuy, 2020).

O uso dessa inovação pode ser aplicado no monitoramento da qualidade da água, aumentando a eficiência e reduzindo os riscos associados ao cultivo, além de contribuir para a gestão do empreendimento por meio da transformação digital e da melhoria dos processos internos. Uma estratégia complementar importante para o monitoramento da qualidade da água é a análise de indicadores ambientais (Magalhães Júnior, 2007). A aplicação da IoT com sensores na aquicultura pode oferecer diversas vantagens. No estudo de Dupont et al. (2018), observou-se que o uso de sensores facilita a tomada de decisões em situações de deterioração da qualidade da água, tornando a gestão do cultivo significativamente mais eficiente.

Além das inovações tecnológicas no manejo, que trazem uma modernização e segurança para uma produção, também é possível aprimorar tecnologias para o aproveitamento integral do pescado, que além de agregar valor promove uma melhor sustentabilidade do setor. A inovação precisa melhorar a vida das pessoas em diversos âmbitos, gerando conhecimento acerca de um problema a ser resolvido ou simplesmente utilizando “know-how” para expansão destes conhecimentos, como o aproveitamento dos resíduos do processamento de pescado, que muitas vezes são descartados indevidamente ou subutilizados.

O processamento do pescado pode gerar diversos produtos, no entanto, sua expansão tem ocasionado o crescimento da produção de resíduos, tais como cabeças, nadadeiras, vísceras, carcaças, peles e carnes aderidas aos ossos (Arvanitoyannis e Tserkezou, 2014). Um produto que é bastante utilizado neste segmento é a carne mecanicamente separada (CMS), material obtido a partir da separação da carne aderida aos espinhaços de peixes (Borgogno et al., 2017).

A CMS serve de matéria prima para vários produtos, como por exemplo, salsichas (Lago et al., 2017), *fishburgers* (Secci et al., 2017), *snacks* de pescado e *surimi*. Um produto que pode ser feito através do uso da CMS é o *Keropok lekor*, um petisco ou snack frito a base de aparas de peixe, e bastante inovador para os consumidores locais, porque é um produto muito popular e apreciado na Malásia e diferente do que já é produzido no Brasil (Nor-Khaizura et al., 2009).

Apesar destas inovações tecnológicas para a criação de tilápia apresentarem benefícios econômicos e sociais, a de implementação da avaliação de qualidade de água com sensores usando a tecnologia IoT e o aproveitamento sustentável do pescado ainda é um desafio a ser enfrentado, e aplicá-los em maior escala irá favorecer o desenvolvimento do setor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Elaborar produtos, processos inovadores e tecnológicos para cadeia produtiva da tilápia no estado de Pernambuco.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as variáveis físicas e químicas presentes em cultivos de *Oreochromis niloticus* com sensores com a plataforma IoT.
- Analisar e comparar os parâmetros da água em cultivos de *O. niloticus*.
- Elaborar petiscos do tipo *Keropok* com carne mecanicamente separada obtida do espinhaço de tilápias do Nilo (*O. niloticus*) e adição de fibras dietéticas.
- Realizar análises físico-químicas, microbiológicas e sensorial dos petiscos do tipo *Keropok*.

2. Artigo 1: Development of *keropok lekor*-type snack using by-products from Nile tilapia *Oreochromis niloticus*

Artigo científico submetido à Revista:

DESAFIOS - Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do
Tocantins

<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/desafios>

ISSN - 2359-3652 (Qualis Capes -A4)

**Development of *keropok lekor*-type snack using by-products from Nile tilapia
*Oreochromis niloticus***

Desenvolvimento de um snack do tipo *keropok lekor* utilizando subprodutos da tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus*

Andrade et al., 2024

Abstract

The *Keropok lekor* snack is a food product originating and consumed in Asian countries and may contain MSM in its composition. The objective of this study was to develop and perform physicochemical, microbiological, and sensory analyses of *keropok lekor*, using MSM from Nile tilapia byproducts (0, 10, and 20%) and supplemented with wheat fiber (0, 1, and 2%). Instrumental analyses of color and texture, pH, lipid oxidation, water activity, total volatile basic nitrogen, centesimal composition, microbiological tests, and sensory evaluation were conducted. The inclusion of CMS in the *keropok* formulation reduced redness and yellowness, TVB-N, ash, and carbohydrates; and increased pH, Aw, protein, and moisture. The addition of wheat fiber increased redness, making the product less bright and with lower TVB-N. Microbiological analyses indicated that *keropok* complied with Brazilian health regulations RDC 331 and IN60. Sensory analysis conducted by 120 evaluators indicated that the product presented good sensory acceptance, with scores ranging from "slightly liked" to "moderately liked," with no difference between the formulations. Therefore, *keropok lekor* made with Nile tilapia MSM and wheat fiber is safe for human consumption and presents good sensory acceptance. It is a potential food product for commercial-scale production. The inclusion of 2% wheat bran and 20% tilapia MSM is recommended, as these presented the best results in nutritional composition, microbiological stability, fiber percentage, and improved sensory acceptance.

Key words: Food technology. Fish by-products. Waste utilization. Food sustainability.

Resumo

O petisco *Keropok lekor* é um produto alimentício originário e consumido em países asiáticos e pode conter CMS em sua composição. Objetivou-se com esse estudo desenvolver e realizar análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais do *keropok lekor*, utilizando CMS de subprodutos de tilápia do Nilo (0, 10 e 20%) e suplementado com fibra de trigo (0, 1 e 2%). Foram conduzidas análises de cor e textura instrumental, pH, oxidação lipídica, atividade de água, nitrogênio básico volátil total, composição centesimal, testes microbiológicos e avaliação sensorial. A inclusão de CMS na formulação do *keropok* diminuiu a vermelhidão e o amarelo, TVB-N, cinzas e carboidratos; aumentou o pH, Aw, proteína e umidade. A adição de fibra de trigo aumentou a vermelhidão, tornando o produto menos luminoso e com menor TVB-N. As análises microbiológicas indicaram que o *keropok* estava de acordo com a legislação sanitária brasileira RDC 331 e IN60. A análise sensorial realizada por 120 avaliadores indicou que o produto apresentou boa aceitação sensorial com valores variando de “gostei levemente” a “gostei moderadamente”, não havendo diferença entre as formulações. Portanto, o *keropok lekor* elaborado com CMS de tilápia do Nilo e fibra de trigo é seguro para consumo humano e apresenta boa aceitação sensorial, sendo um potencial produto alimentício para ser produzido em escala comercial, recomendando-se a inclusão de 2% de farelo de trigo e a adição de 20% de CMS de tilápia, pois apresentaram os melhores resultados na composição nutricional, estabilidade microbiológica, %fibras e melhor aceitação sensorial.

Palavras-chave: Tecnologia de alimentos. Subprodutos de pescado. Utilização de resíduos. Sustentabilidade alimentar.

Introduction

The global production of aquatic animals in 2022 reached 185 million tons, contributing to the increase in healthier eating. The expansion of fish consumption is also linked to the development of fish processing technology, resulting in a greater supply of prepared products, a larger distribution network, and an increase in per capita income worldwide (FAO, 2024).

Global fish consumption had an annual growth rate of 3% from 1961 to 2019, and annual per capita consumption reached 20.5 kg/year/hab in 2019. This is a positive aspect, as fish is a product with high-quality proteins, with the presence of essential amino acids, polyunsaturated fatty acids, and minerals (iron, calcium, zinc), which are valuable nutrients for a healthy diet (FAO, 2022). The increase in fish consumption also brings an increase in by-products generated by industrialization that precede the arrival of the product to the final consumer. As a result, there is a growing need for procedures to utilize these by-products, which can be used to develop innovative food products.

Obtaining mechanically separated meat (MSM) is an alternative to using fish by-products. MSM is obtained from headless and gutted fish or the bones or trimmings resulting from filleting. This raw material can be obtained from a species or a group of similar species and added to the production of sausages, snacks, and breaded products, resulting in high nutritional value (Guimarães et al., 2017).

Keropok lekor is a snack that originates in Asian countries, such as Malaysia, Thailand, and Indonesia, and depending on the location, it can be called *kerupuk*, *kaew krab*, or fish cracker. For the formulation of this type of product, starch (corn, cassava, or tapioca), water, fish meat, salt, and condiments are included (Nurul Huda et al., 2010). In Asian countries, it is a product widely produced and consumed as street food; however, in Brazil, there are no reports of the commercial production of fish snacks such as *keropok lekor*.

Wheat fiber is a type of cellulose compound that aids chewing and has physiological properties, such as stimulating intestinal function. In the area of food technology, dietary fibers also have other advantageous characteristics, such as high binding capacity with water and fat, which increases yield and reduces production costs (Sánchez-Alonso et al., 2007).

Considering the commercial potential of *keropoks* made with fish MSM and wheat fiber, the objective of this study was to develop and evaluate the physicochemical, nutritional, microbiological, and sensory aspects of *keropok lekor* snacks using mechanically separated meat (MSM) from Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) by-products and supplemented with dietary fiber from wheat.

Materials and methods

Raw material

For the experiment, approximately 26 kg of tilapia processing by-products (backbones without fins and heads) were used, acquired from Noronha Pescados located in the metropolitan region of Recife/PE. The by-products were packed in thermal boxes with flaked ice and transported to the Fish Technology Laboratory, Department of Fishery and Aquaculture at the Federal Rural University of Pernambuco, Recife/PE.

Obtaining mechanically separated meat (MSM)

The by-products were thawed, washed with chlorinated water, and kept cold at 6 °C. To obtain the MSM, the tilapia spines were passed through a mechanical deboning machine (PV 150 Máquinas, Chapecó, Santa Catarina, Brazil), where approximately 7 kg of MSM were obtained, representing a yield of approximately 27%. Subsequently, this raw material was divided into polyethylene bags and stored at a temperature of -20°C until the preparation of *keropoks lekor*.

Formulations and elaboration of *keropoks lekor*

To prepare *keropoks lekor*, formulations with different proportions of mechanically separated meat (0, 10, and 20%) and wheat dietary fiber (0, 1, and 2%) were used. The other ingredients were added in the same proportion to all formulations: 10% wheat flour; 2.5% salt; 0.2% dehydrated onion and garlic, and 0.2% black pepper (*Piper nigrum*), except corn starch, which was added to complete 100% of the formulation. The ingredients were weighed on a precision scale and mixed using a planetary mixer. Subsequently, ice water (4°C) was added to the formulation of the wheat flour and starch percentage. In formulations 1 and 2, 70.6 ml were added, in formulations 3 and 4, 56.7 ml were added, and in formulation 5, 61.6 ml were added (Table 1). This was necessary so that the *keropok* dough had a satisfactory consistency for production.

Table 1 - Formulations (in percentage) to obtain *keropoks* mass using mechanically separated meat (MSM) from Nile tilapia by-products and supplemented with dietary fiber from wheat

| Ingredients | Formulations (%) | | | | |
|-----------------------------|------------------|------|------|------|------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| MSM | 0.0 | 0.0 | 20.0 | 20.0 | 10.0 |
| Wheat fiber | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 1.0 |
| Sodium Chloride | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Black pepper | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Dehydrated onion and garlic | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Wheat flour | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| Corn starch | 87.1 | 85.1 | 67.1 | 65.1 | 76.1 |
| Water (mL)* | 70.6 | 70.6 | 56.7 | 56.7 | 61.6 |

* Addition in milliliters of ice water to the percentage of wheat fiber and starch in the formulations.

After mixing, portions of approximately 50 g were removed, and small cylindrical rolls approximately 10 cm long were manufactured and sprinkled with wheat flour so that the dough did not stick to the containers. Then, the *keropoks* rolls were cooked in boiling water (100° C) for 30 minutes until the starch gelatinized, which was observed through the floating of the *keropoks* during this process. Then, the rolls were cooled in ice water, dried at room temperature, packed in polyethylene bags, and stored in a freezer (-18° C).

Experimental design

The study presented two explanatory variables: the percentage of MSM inclusion (0, 10, and 20%), and the percentage of wheat fiber inclusion (0, 1, or 2%). The response variables were: color and instrumental texture, pH, lipid oxidation, water activity, total volatile basic nitrogen, proximate composition, and sensory evaluation. The experimental design used was the composite design with a central point (Table 2). Each test consisted

of a package with three *keropoks*, and three tests were carried out at the central point of the study.

Table 2 - Planning for the study of *keropoks* with the addition of different percentages of inclusion of mechanically separated meat (MSM) from tilapia filleting residues and wheat fiber

| Number of Tests | MSM (%) | Wheat fiber (%) |
|-----------------|---------|-----------------|
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 2 |
| 1 | 20 | 0 |
| 1 | 20 | 2 |
| 3* | 10 | 1 |

*Central point.

Physicochemical analysis

Instrumental color

To measure the instrumental color of the *keropoks*, a portable colorimeter (Konica Minolta®, model CR – 400) operated with a xenon lamp, illuminant C (Y=92.78; x=0.3139; y=0.3200), observation angle of 2° and measuring area of 8 mm in diameter was used at one point on each of the three snacks included in each of the packages. The colorimeter was calibrated with a white standard before each analysis. The color was expressed using the color standards of the CIELAB system: L* [lightness (+) brighter to (-) darker], a* [color intensity red (+) to green (-)], and b* [color intensity yellow (+) to blue (-)].

Hardness

Hardness analysis was performed with a texturometer (CT3 Texture Analyser Brookfield®). A measurement was taken on each *keropok*. In each case, compression was performed up to 50% of the *keropok* thickness using a TA25/1000 probe at pre-test speed, test, and post-test of 2 mm/s at 25 °C.

pH determination

The pH was estimated with the assistance of a pH meter using an immersion electrode. A 10g sample of *keropok* was taken, which was previously homogenized with 40 ml of distilled water.

Total volatile basic nitrogen (TVB-N)

For total volatile basic nitrogen (TVB-N), a sample of approximately 10g of each *keropok* was previously homogenized with a mixture of 60 ml of 10% trichloroacetic acid (TCA) solution for 1 minute and kept at rest for two hours. Then, the sample was filtered through medium filtration quantitative filter paper (Unifil ø150 mm), pipetted (25 mL of filtrate + 1 g of magnesium oxide) into a flask of the nitrogen distiller apparatus, distilled with 15 mL of mixed indicator (compound of methyl red and bromocresol green), and titrated with 0.02N HCL. It was then calculated with the following:

$$\text{TVB} - \text{N} \left(\frac{\text{mgN}}{100\text{g}} \right) = \frac{\text{vol HCL (mL)} \times \text{normality of HCL} \times 14 \times \text{vol ext. TCA} \times 100}{25 \times \text{sample weight}}$$

Lipid oxidation (TBARS)

Lipid oxidation analysis was performed using the thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) method. To calculate TBARS values it was calculated with tetramethoxypropane, and the results were expressed in mg malonaldehyde/kg sample.

Water activity (a_W)

Water activity was estimated for pre-homogenized *keropoks* in a food processor at a temperature of 25°C in an Aqualab CX-2 equipment (Decagon Devices).

Proximate composition

The proximate composition of raw materials, MSM, wheat fiber, and *keropoks* was calculated according to the AOAC method. Firstly, moisture analysis was carried out by gravimetry in an oven with air circulation at 105°C until constant weight. After the moisture analysis, the dry matter was subjected to other proximate composition analyses. Crude protein was calculated using the Kjeldahl method (N x 6.25), lipid was extracted with petroleum ether in a Soxhlet extractor, ash content was evaluated by incineration in a muffle furnace at 550°C for 5 hours, the percentage of carbohydrate was calculated by subtracting the sum of the percentages of moisture, protein, lipid, and ash, from a total of 100%. The Energy Value was calculated by multiplying the percentage of protein and carbohydrate by 4 and lipid by 9 AOAC (2012).

Microbiological Analysis

For microbiological tests, Compact Dry kits were used: psychrotrophic aerobes - Dry TC[®]; total coliforms and thermotolerant coliforms (*Escherichia coli*) - Compact Dry EC[®]; Coagulase-positive *Staphylococcus* - Compact Dry XSA[®], and *Salmonella* sp. - Compact Dry SL[®]. The execution of the assays and the incubation time followed the manufacturer's instructions, and all samples were carried out in triplicate, and the results were expressed in Colony Forming Units per gram of sample (CFU/g).

Sensory analysis

The sensory evaluation was carried out in the Sensory Analysis Laboratory, located in the Department of Consumer Sciences at UFRPE, Recife – Pernambuco, equipped with individual cabins with white fluorescent light, using affective acceptance tests, in incomplete balanced blocks (Meilgaard *et al.*, 2016). The *keropoks* were fried in soybean oil, cut into small pieces, and served along with water and crackers to cleanse the palate. Each rater evaluated 3 samples coded with three-digit numbers, served monadically in incomplete balanced blocks. Each formulation was evaluated 69 times by 120 untrained evaluators, who were recruited among students, staff, and professors at the Rural Federal University of Pernambuco, Recife, PE. The sensory attributes evaluated were color, odor, texture, flavor, and overall acceptance using a 9-point hedonic scale (1 = disliked very much and 9 = liked very much). The study was previously approved by the Human Research Ethics Committee of the University of Pernambuco/ PROPEGE (CAAE: 40677315.0.0000.5207, n. 971.598), and all evaluators signed consent forms.

Statistical analysis

To check whether there were significant differences between the means of the response variables in the different formulations, Shapiro-Wilk tests were initially performed for normality, and Bartlett tests were performed to evaluate the homogeneity of variance. After verifying these prerequisites, analyses of variance (ANOVAs) were conducted. In cases of evidence of a significant difference between means, a Tukey post-test was performed.

Linear models $E(Y)=\beta X$ were used in which $E(Y)$ is the expectation (average) of the response variable, X is the design matrix with the explanatory variables, and β is the vector of parameters to be estimated. It was assumed that the response variables follow

approximately normal distributions $Y \sim N(\mu, \sigma^2)$. The explanatory variables were considered in the original scale and squared. The inclusion of squared transforms was adopted to contemplate non-linearities in the associations between response and explanatory variables.

To select the relevant explanatory variables, the Akaike Information Criterion was used. (Akaike Information Criterion – AIC) (Akaike, 1974) in backward procedure. Using the AIC, the principle of parsimony is favored, and models with a compromise between bias and variance of estimates are selected. At the end of the process, all, part of, or none of the explanatory variables can be maintained in the models. In the latter case, it would mean that the explanatory variables are not relevant to understanding the response variations. At the end, only the equations of the selected models are shown.

Adjusted coefficients of determination (R^2) were calculated, as the models selected using the AIC could contain different numbers of parameter estimates. Hypothesis tests were carried out to check whether there was evidence that the estimates were significantly different from zero. Residual analyses were performed to verify that the assumption of normality was not violated (Shapiro-Wilk test) and whether the selected models presented bias. In the end, the selected models were used to make predictions and project surfaces of response averages in the plane of explanatory variables. The results were presented in the form of equations with the respective parameter estimates and significance tests for the estimated adjusted coefficients of determination values, and in graphical expressions of the surface analyses.

Results and discussion

Table 3 shows the results of direct comparisons between the means of the different formulations. In the analysis with a linear model, it is possible to identify the effects of the factors (fiber and MSM proportions) as explanatory variables for the different responses. Parameter estimates, adjusted coefficients of determination, and p-values in F tests are shown in Table 4. In cases where the relationships between explanatory variables and responses are significant, p-values are less than 0.05. In cases where both fiber and MSM proportions did not affect the response variables, only the intercepts are shown.

Table 3 - Results of physicochemical analysis of *keropoks* prepared with mechanically separated tilapia by-products and supplemented with wheat fiber¹

| Physicochemical analysis | F1* | F2 | F3 | F4 | F5 |
|---|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| L* (<i>lightness</i>) | 84.23 ^a ± 0.59 | 78.97 ^b ± 1.07 | 80.43 ^{ab} ± 2.05 | 80.75 ^{ab} ± 0.68 | 82.25 ^{ab} ± 2.28 |
| a* (<i>redness</i>) | 0.21 ^b ± 0.02 | 1.28 ^a ± 0.54 | 0.08 ^b ± 0.04 | 0.39 ^b ± 0.21 | 0.27 ^b ± 0.14 |
| b* (<i>yellowness</i>) | 7.21 ^b ± 0.08 | 9.60 ^a ± 0.42 | 10.31 ^a ± 0.22 | 10.86 ^a ± 0.56 | 10.32 ^a ± 0.64 |
| Hardness (N) | 4.36 ^a ± 1.11 | 5.99 ^a ± 1.31 | 5.28 ^a ± 0.71 | 5.04 ^a ± 0.65 | 6.40 ^a ± 0.49 |
| pH | 6.03 ^d ± 0.03 | 6.15 ^c ± 0.05 | 6.62 ^a ± 0.03 | 6.69 ^a ± 0.01 | 6.39 ^b ± 0.03 |
| Total volatile basic nitrogen (TVB-N mg/100g) | 0.009 ^a ± 0.00 | 0.006 ^b ± 0.00 | 0.002 ^c ± 0.00 | 0.002 ^c ± 0.00 | 0.002 ^c ± 0.00 |
| Lipid Oxidation (TBARS mg/kg) | 0.03 ^a ± 0.00 | 0.03 ^a ± 0.00 | 0.03 ^a ± 0.00 | 0.03 ^a ± 0.00 | 0.03 ^a ± 0.00 |
| Water activity (Aw) | 0.98 ^a ± 0.00 | 0.98 ^a ± 0.00 | 0.99 ^a ± 0.00 | 0.99 ^a ± 0.00 | 0.98 ^a ± 0.00 |

*F1 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F2 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F3 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F4 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F5 = 10% mechanically separated meat (MSM) and 1% wheat fiber.

¹ Different letters on the same row indicate a significant difference according to the Tukey test (p<0.05).

Table 4 - Parameter estimates for the relationships between the proportions of fiber and mechanically separated meat (MSM) and the different response variables. The rightmost columns contain the adjusted coefficient of determination (R^2) and the probabilities (p) calculated using Fisher's tests.

| Equation | R^2 - adjusted | p |
|---|---------------------|-------------------------|
| $L^*=82.9442-1.2342\text{fiber}$ | 0.1234 | 0.06569 |
| $a^*=0.403333-0.069889\text{MSM}+0.343333\text{fiber}+0.002211\text{MSM}^2$ | 0.5993 | 0.0003027 |
| $b^*=-7.671667+0.274278\text{MSM}+0.735000\text{fiber}-0.008272\text{MSM}^2$ | 0.7391 | 8.456×10^{-06} |
| Hardness=5.1162 | --- | --- |
| $\text{pH}=6.0466667+0.0332778\text{MSM}+0.0450000\text{fiber}-0.0002556\text{MSM}^2$ | 0.9734 | 3.437×10^{-14} |
| $\text{TVB-N} = 8.417 \times 10^{-03} - 7.850 \times 10^{-04} \text{MSM} - 8.167 \times 10^{-04} \text{fiber} + 2.517 \times 10^{-05} \text{MSM}^2$ | 0.8543 | 6.297×10^{-08} |
| $\text{TBARS} = 3.067 \times 10^{-02} - 5.556 \times 10^{-04} \text{MSM} + 3.444 \times 10^{-05} \text{MSM}^2$ | 0.1216 | 0.1207 |
| $A_w = 9.827 \times 10^{-01} - 9.144 \times 10^{-04} \text{MSM} + 5.739 \times 10^{-05} \text{MSM}^2$ | 0.8086 | 1.338×10^{-07} |
| $\text{Moisture} = 21.054167 - 0.173028 \text{MSM} - 0.270833 \text{fiber} + 0.010381 \text{MSM}^2$ | 0.4663 | 0.003196 |
| $\text{Protein} = 9.058118 + 0.023973 \text{MSM}^2$ | 0.8179 | 1.137×10^{-08} |
| $\text{Lipid} = 1.1820 - 0.4225 \text{fiber}$ | 0.1116 | 0.07638 |
| $\text{Ash} = 1.555 \times 10^{-02} + 1.798 \times 10^{-03} \text{MSM} - 1.131 \times 10^{-04} \text{MSM}^2$ | 0.5261 | 0.0004673 |
| $\text{Carbohydrates} = 69.979543 - 0.027140 \text{MSM}^2$ | 0.8181 | 1.122×10^{-08} |
| Energy = 320.9986 | --- | --- |
| Color=7.14256 | --- | --- |
| Odor=6.7463 | --- | --- |
| Texture =6.43396 | --- | --- |
| Flavor=6.61635 | --- | --- |
| Overall acceptance =6.73795 | --- | --- |

Physicochemical analysis

Instrumental color

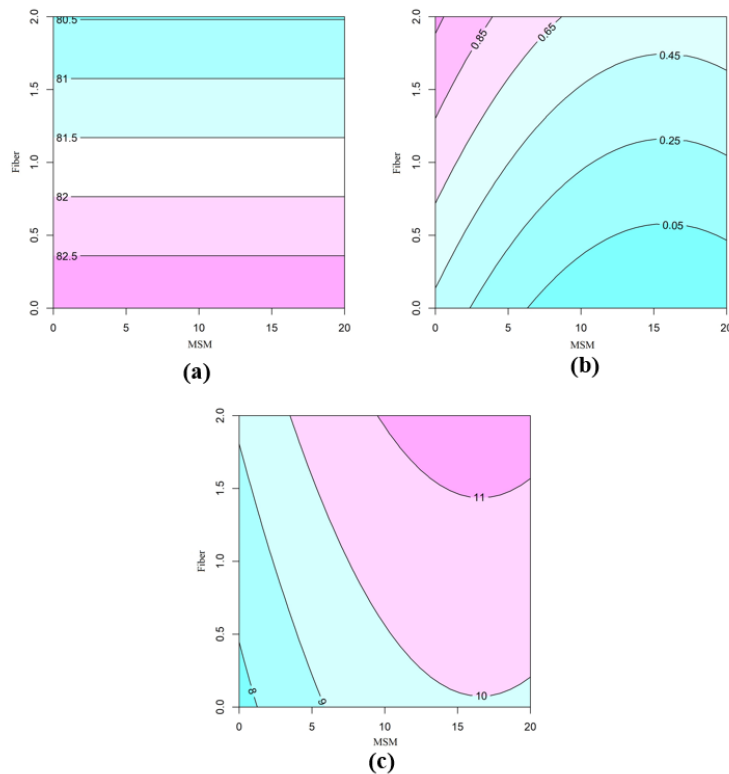
The color characteristics of *keropoks* produced with tilapia MSM and wheat fiber can be seen in Table 3. There was a change in lightness (L^* value) ($p < 0.05$) between the formulations, ranging from 78.97 to 84.23. A significant effect ($p < 0.05$) was observed for the wheat fiber factor, where increasing the amount of this ingredient made the *keropoks*

less luminous (lower L* value) (Figure 1a). This was probably caused by the darker color of the wheat fiber. Rekola et al. (2023) and Ahn et al. (2019) observed that the inclusion of bran in meat products changes the lightness of the food, with foods with the addition of vegetable bran having lower L* values than products without the addition of bran, that is, similar to what was observed in the present study.

For redness (a* value), it can be seen in Table 3 that there was a difference ($p < 0.05$) in the *keropoks*, varying between 0.08 and 1.28. Increasing the percentage of MSM inclusion decreased the redness (a*), while the addition of wheat fiber made the products redder (higher a* value) (Figure 1b). This may have occurred because the MSM used in the study was obtained from tilapia spines without dorsal fins and, therefore, presented a whitish color. The increase in redness with the addition of wheat fiber may have occurred because the product is naturally redder. Another point to be noted is that products with dry pasta, such as the one in the present study, may have a decrease in lightness and an increase in redness, which may be associated with the Maillard reaction, which is an enzymatic reaction that causes browning of food (Lu *et al.*, 2018).

The yellowness (b* value) showed significant variation between formulations ($p < 0.05$), with values between 7.21 and 10.86 (Table 3). Formulations with a higher percentage of MSM showed higher b* values (Figure 1c). The possible cause of the increase in yellowness is the decrease in the amount of starch in the formulation with more MSM (F3 and F4, Table 1). A different result from that observed by Silva et al. (2016), where the use of different types of flour (wheat, banana, and eggplant) did not cause variation in the yellowness in saramunete fishburgers (*Pseudupeneus maculatus*).

Figure 1 - Values of color L* (a), a* (b), and b* (c) of *keropoks* made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber



Instrumental texture

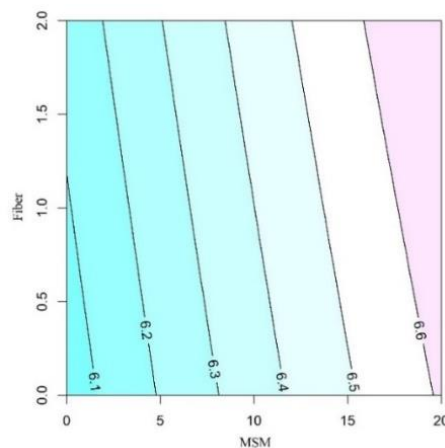
The hardness of the *keropoks* did not show a significant difference between formulations ($p > 0.05$) (Table 4), with values varying between 4.05 – 6.32 N. Muthia et al. (2010) observed that sausages made with different types of flour can change the texture, mainly due to the different sizes of the granules. Therefore, the use of flours of the same type should not result in a significant change in texture. As corn starch and wheat flour were used in the present study for all formulations, it is believed that this was the reason for the lack of significant difference between the hardness of the *keropoks*.

pH determination

The pH of *keropoks* showed significant variation ($p < 0.05$) between formulations (Table 3). The addition of MSM caused a greater effect on pH than wheat bran (Figure 2). Tilapia MSM caused greater variation due to meat characteristics. The pH values were close to those observed by Signor et al. (2019) and Alexandre et al. (2022) in studies with tilapia MSM, with values of 6.5 to 6.9, respectively. The addition of wheat bran may have

caused a change in the pH of the *keropoks* due to its slightly alkaline characteristics. Differently, Presenza et al. (2022) observed that the addition of wheat bran to tambaqui fishburger (*Colossoma macropomum*) did not cause a significant difference in the pH of the product.

Figure 2 - pH values of *keropoks* made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber

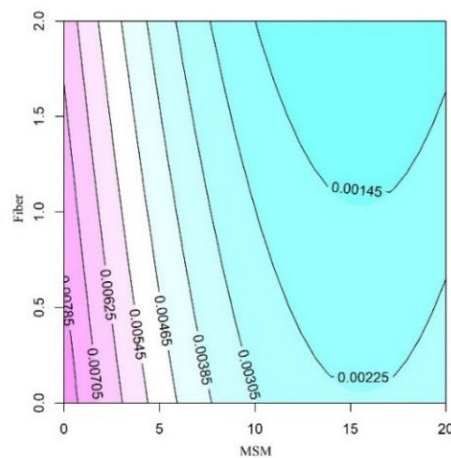


Total volatile basic nitrogen

The values of total volatile basic nitrogen (TVB-N) of *keropoks* were low but with significant variations between formulations ($p < 0.05$) (Table 3). The addition of MSM and wheat fiber caused a decrease in TVB-N (Figure 3). TVB-N corresponds to ammonia, dimethylamine, and trimethylamine, which are formed by the breakdown of nucleotides and the release of the amine group from that of the amino acid (deamination), through the action of bacterial enzymes (Veloso *et al.*, 2019). In the present study, this result was not expected because, with the increase in meat composition, the tendency is for protein deterioration to increase, which generates higher levels of TVB-N. This phenomenon of low TVB-N values may be linked to the process of cooking the *keropok* for 30 minutes in boiling water, which may have leached the TVB-N compounds.

Even with the detection of TVB-N, the levels are well below the recommended acceptability limit for fish in Brazil, which is 30 mg 100 g⁻¹ (BRASIL, 1997). When TVB-N is within the permitted limits, it indicates that biogenic amines are in a concentration suitable for safe commercialization.

Figure 3 - Variation values of total volatile basic nitrogen (TVB-N mg/100g) content of *keropoks* made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber



Lipid oxidation (TBARS)

The TBARS values of the *keropoks* were very low and without significant difference ($p>0.05$) between formulations, indicating that the product had lipid oxidation stability during its manufacture. The TBARS test quantifies malonaldehyde, which is one of the main degradation products of fatty acids formed during oxidation, and is one of the main quality parameters to be analyzed in products with high fat content. According to Pankyamma et al. (2014), TBARS values can be significantly influenced by the lipid content of foods, where they observed that cereal snacks fortified with fish oil presented higher values as the lipid content increased. Different from what was observed in the present study, where *keropoks* obtained low lipid values.

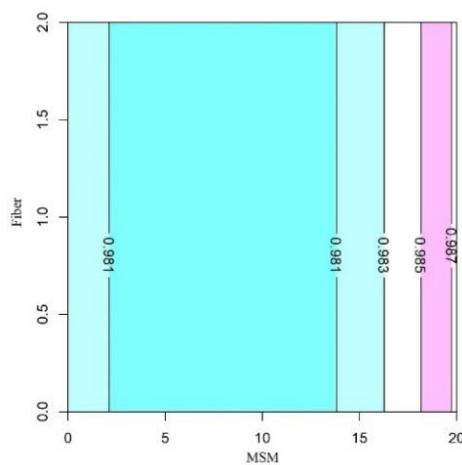
Water activity (A_w)

The water activity (A_w) of *keropoks* showed significant variation ($p<0.05$) between formulations (Table 3), with an increase in values as the percentage of MSM increased (Figure 4). The highest A_w value in *keropoks* with the presence of MSM occurred due to the high amount of water in their composition, and also due to the starch gelatinization process, which causes the solubilization of amylose and water retention. The same was observed by Pulgarín et al. (2023) when they performed water activity analysis in hydrogels based on cornstarch, where they observed concentrations in the range 0.97 to

0.98, and that the values were influenced by amylose, similar to that found in the present study.

Justen et al. (2017) observed a similar effect, where snacks made with tilapia flour presented A_w values between 0.50 and 0.53, and snacks without flour presented a value of 0.57, concluding that the inclusion of flour caused a reduction in the water activity of the snacks.

Figure 4 - Water activity (A_w) values of *keropoks* made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber



Proximate composition

According to the results in Table 5, moisture values showed a significant difference between formulations ($p < 0.05$), with the formulation with 20% MSM showing the highest value (Figure 5a). The variation in moisture content of *keropoks* was more significant when MSM was added to wheat fiber. In comparing the amount of moisture between different studies with *keropoks*, Nur Liyana et al. (2019) observed moisture results for *keropoks* between 55.99 and 62.42%, that is higher values than those found in the present study. This may have occurred due to the *keropok* developed by Nur Liyana et al. (2019) which presents more fish meat in their formulation (50 to 70%).

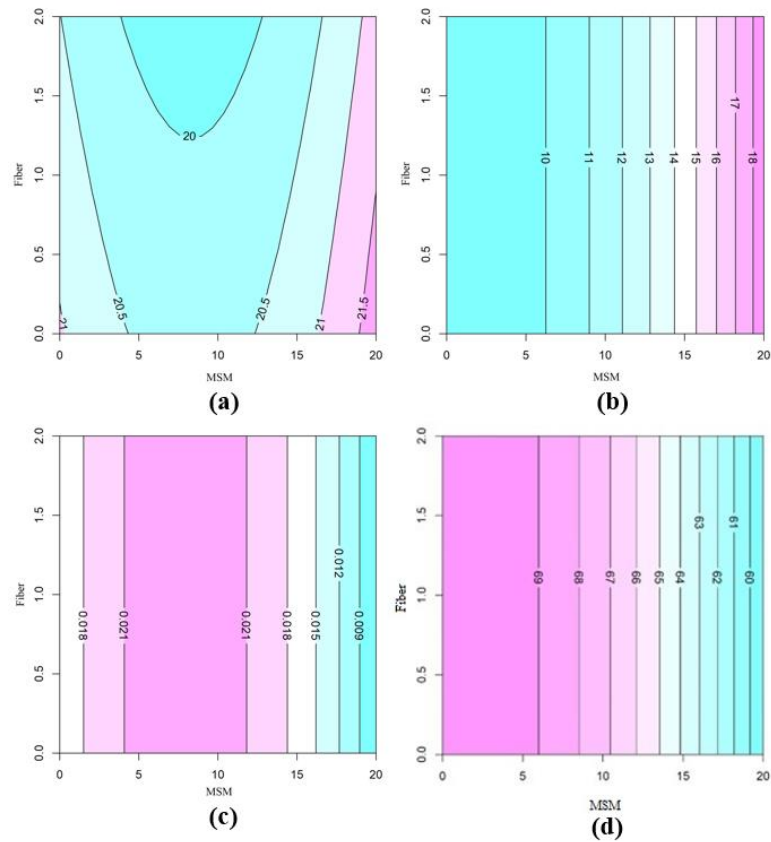
Table 5 - Proximate composition (mean \pm standard deviation) in *keropoks* made with tilapia by-products and supplemented with wheat fiber¹.

| Proximate composition | F1* | F2 | F3 | F4 | F5 |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Moisture (%) | 21.07 ^{ab} \pm 0.42 | 20.50 ^{ab} \pm 0.52 | 21.73 ^a \pm 0.20 | 21.22 ^{ab} \pm 1.01 | 20.09 ^b \pm 0.65 |
| Protein (%) | 8.23 ^c \pm 1.36 | 8.83 ^c \pm 0.64 | 17.38 ^a \pm 0.36 | 19.56 ^a \pm 0.31 | 11.92 ^b \pm 2.43 |
| Lipid (%) | 1.72 ^a \pm 1.96 | 0.11 ^a \pm 0.15 | 1.03 ^a \pm 0.39 | 0.96 ^a \pm 0.22 | 0.50 ^a \pm 0.24 |
| Ash (%) | 0.01 ^b \pm 0.00 | 0.02 ^a \pm 0.00 | 0.01 ^b \pm 0.00 | 0.01 ^b \pm 0.00 | 0.02 ^a \pm 0.00 |
| Carbohydrates (%) | 68.96 ^a \pm 3.07 | 70.54 ^a \pm 1.12 | 59.84 ^b \pm 0.56 | 58.25 ^b \pm 1.48 | 67.47 ^a \pm 2.43 |
| Energetic value (Kcal) | 324.29 ^a \pm 9.32 | 318.47 ^a \pm 2.27 | 318.21 ^a \pm 1.18 | 319.91 ^a \pm 3.48 | 322.04 ^a \pm 2.66 |

*F1 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F2 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F3 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F4 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F5 = 10% mechanically separated meat (MSM) and 1% wheat fiber.

¹Different letters on the same row indicate a significant difference according to the Tukey test ($p < 0.05$).

Figure 5 - Variations in moisture (a), protein (b), ash (c), and carbohydrates (d) content of *keropoks* made with meat mechanically separated from tilapia by-products and supplemented with wheat fiber.



The protein percentage of *keropoks* increased with increasing MSM inclusion (Figure 5b). This result was also observed by Zim et al. (2019) in *keropoks* with MSM from mackerel (*Decapterus russelli*).

The percentage of lipids from *keropoks* was very low, less than 2%, and with no significant difference ($p>0.05$) between formulations (Table 5). This may have happened because tilapia meat has a low amount of lipids in its composition. This result was also observed by Zim et al. (2019), where *keropoks* made with the addition of MSM from *Decapterus russelli* presented values between 1.22% and 1.38%.

The percentage of ash in the *keropoks* showed significant variation ($p<0.05$) between formulations (Table 5 and Figure 5c), with an increase in the percentage of MSM increasing the percentage of ash. This result is similar to that found by Afifi et al. (2023), who observed higher ash values in *keropoks* formulated with 32% fish DMI (average of 1.72%). The same was observed by Nur Liyana et al. (2019), where there was a greater

amount of ash in *keropoks* with a 50% MSM formulation, with values between 1.56 and 2.22%.

There was no evidence of significant differences in the average energy values between the different formulations (Table 5). The addition of wheat fiber and tilapia MSM did not affect the values because these products have low energy Value. Chambó et al. (2017) also did not observe a significant variation in energy Value with the inclusion of tilapia meat in rolls enriched with tilapia flour.

For carbohydrate analysis, there was significant variation. The carbohydrate averages in formulations with 20% MSM (T3 and T4) were lower than the averages observed in formulations in which there was no addition of MSM or in which its concentration was 10% (Table 5). The addition of wheat fiber had no effect; however, with the addition of MSM, a change in values was observed (Figure 5d). This was due to the 20% formulation having a lower amount of corn starch in its composition. Differently, in the study by Kingwascharapong et al. (2024), evaluating *keropok lekor* with sardine meat (*Sardinella gibbosa*), the authors obtained carbohydrate values of approximately 29%, which is well below that found in the present study, probably due to the amount of flour added by the authors being much smaller.

Microbiological analyzes

The results of the microbiological analyses of *keropoks* made with tilapia by-products can be seen in Table 6.

Table 6 - Microbial count (Aerobic psychrotrophic, *Escherichia coli*, coagulase-positive *Staphylococcus*, and *Salmonella* sp.) of *keropoks* made with by-products from the industrialization of tilapia. Average counts (log CFU/g).

| Parameters | Formulations | | | | |
|--|--------------|--------|--------|--------|--------|
| | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 |
| Aerobic psychrotrophic | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| <i>Escherichia coli</i> | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| <i>Coagulase-positive Staphylococcus</i> | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| <i>Salmonella</i> sp. | Absent | Absent | Absent | Absent | Absent |

Limit of detection < 2 log CFU/g for the Compact Dry® kit.

There was an absence of *Salmonella* sp. in all formulations. The counts of *E. coli*, coagulase-positive *Staphylococcus*, and Aerobic psychrotrophic bacteria were below 2 log CFU/g. These results are by Brazilian legislation that determines the absence of *Salmonella* sp., and 10^3 CFU/g of positive coagulase and *Staphylococcus* below 10^4 CFU/g. These results indicate that *keropok* made with tilapia by-products has satisfactory hygienic conditions and is a safe product for human consumption, according to RDC 331 and IN60 (BRASIL, 2019a, 2019b).

Sensory analysis

There was no significant difference in the sensory aspects of color, odor, texture, flavor, and overall acceptance of *keropoks* (Table 7).

Table 7 - Averages in sensory analyses of *keropoks* *lekor* made with mechanically separated meat (MSM) from tilapia by-products and supplemented with wheat fiber¹

| Sensory evaluation | F1* | F2 | F3 | F4 | F5 |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Color | 7.22a ± 1.69 | 7.19a ± 1.48 | 7.00a ± 1.69 | 7.16a ± 1.51 | 7.14a ± 1.56 |
| Odor | 6.71a ± 1.55 | 6.63a ± 1.70 | 6.74a ± 1.72 | 6.66a ± 1.57 | 6.83a ± 1.61 |
| Texture | 6.43a ± 2.22 | 6.32a ± 2.04 | 6.71a ± 2.02 | 6.50a ± 2.06 | 6.36a ± 2.03 |
| Flavor | 6.46a ± 2.11 | 6.48a ± 1.79 | 6.65a ± 1.80 | 6.64a ± 1.90 | 6.69a ± 1.65 |
| Overall acceptance | 6.66a ± 1.82 | 6.73a ± 1.50 | 6.68a ± 1.56 | 6.77a ± 1.65 | 6.77a ± 1.44 |

*F1 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F2 = 0% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F3 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 0% wheat fiber; F4 = 20% mechanically separated meat (MSM) and 2% wheat fiber; F5 = 10% mechanically separated meat (MSM) and 1% wheat fiber.

¹Different letters on the same row indicate a significant difference according to the Tukey test (p<0.05).

Acceptance of the color of the *keropoks* received an average rating of 7.14, which is equivalent to “I liked it moderately”. Results obtained in the color parameter for *keropoks* prepared with MSM from fish of the species *Rastrelliger kanagurta* (Indian

mackerel) and *Trachurus trachurus* (chicharro) did not show significant color changes and received average scores of 6.03 (“I liked it slightly”) (Murad *et al.*, 2017). The greater acceptance of the color in the present study may have occurred due to the color of the tilapia meat being lighter than the fish used in the other study, and the frying process that makes the *keropoks* more similar to snacks found in Brazilian commerce.

The odor of *keropoks* received an average rating of 6.71 (“I liked it slightly”) in all formulations. A similar result was obtained in a fishburger made with mechanically separated meat (MSM) from tilapia filleting waste, which received an average score of 7.3 (Costa *et al.*, 2019). This probably happened because MSM was obtained from filleting waste, presenting a more pronounced fish odor.

The *keropoks* received an average score of 6.7 for the sensorial aspect of texture. This result is lower than that observed by Bacelar *et al.* (2021), who developed MSM nuggets from tilapia filleting waste and cassava dough, where acceptance was 7.2. This variation in texture acceptance may have occurred because they are different products, in addition to variations in formulation.

The flavor of the *keropoks* received an average rating of 6.58 (“I liked it slightly”) in all formulations, showing that, regardless of the formulation, the flavor was well accepted. When compared with the study by Raúl *et al.* (2018), where a *Haemulon plumierii* fishburger was prepared with the addition of wheat fiber, which received an average score of 6.45, it was observed that the product in the present study had a better flavor acceptance.

The overall acceptance of *keropoks* received an average score of 6.72 points for all formulations (“I liked it slightly”), indicating good acceptance of the products prepared in the study. This shows the potential of *keropoks* as a fish snack to be used for snacks and quick meals, being a healthier option to meet people's limited time when preparing fish-based meals.

Conclusion

The addition of Nile tilapia mechanically separated meat (MSM) and wheat fiber caused variations in the physicochemical parameters of *keropok lekor*. However, the results of microbiological and sensory analyses indicate that the final product is safe for

human consumption and well accepted by the consumer. These findings highlight the importance of a detailed understanding of the interactions between ingredients and their effects on the properties of technological products made with fish meat. Therefore, *Keropok lekor* made with Nile tilapia MSM and wheat fiber is a potential food product to be produced on a commercial scale, where it is recommended to include 2% wheat bran and add 20% tilapia MSM.

Acknowledgments

This study was financially supported by the Foundation of Science and Technology of the State of Pernambuco (FACEPE) with the project entitled Technological Innovations for fish farming in the State of Pernambuco (FACEPE 12/2020).

References

AFIFI, L. I.; ARIFIN, N.; FAUJAN, N. H.; RAMLY, N. Physicochemical properties and sensory preference of *Keropok Lekor* with partial replacement of fish flesh with oyster Mushroom. **Malaysian Journal of Science Health & Technology**, v. 9, n. 2, p. 128-135, 2023.

<https://doi.org/10.33102/mjosht.v9i2.357>

AHN, B. S.; KIM, B. G.; JEON, E. B.; LEE, I. S.; OH, K. S. Quality characteristics by grade of commercial frozen surimi. **Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 52, n. 6, p. 555-561, 2019.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0555>

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on automatic control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.

<https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>

ALEXANDRE, A. C. S.; ALBERGARIA, F. C.; FERNANDES, L. A. C.; DE SOUSA GOMES, M. E.; PIMENTA, C. J. Effect of natural and synthetic antioxidants on

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

oxidation and storage stability of mechanically separated tilapia meat. **LWT**, v. 154, p. 112679, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112679>

AOAC. **Official Method of Analysis: Association of Analytical Chemists**. 19th Edition, Washington DC. 2012, 121-130 p.

BACELAR, R. G. A.; SOUSA, M. D. S.; SANTOS FILHO, J. H.; DE OLIVEIRA MOURA, N.; MURATORI, M. C. S. Nuggets prepared using mechanically separated meat (MSM) obtained from tilapia carcasses and cassava dough. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 47, 2021.

<https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2021.47.e614>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria nº 185, de 13 de maio de 1997**. Aprova o Regulamento Técnico de identidade e qualidade de peixe fresco. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 19 maio 1997.

BRASIL (2019a). **Resolução Diretoria Colegiada Nº 331 de 23 de dezembro de 2019 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre padrões microbiológicos de alimentos e sua aplicação. Diário Oficial, Brasília, 26 de dezembro de 2019, Sessão 1, 96.

BRASIL (2019b). **Instrução Normativa Nº 60 de 23 de dezembro de 2019 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde**. Estabelece as listas de padrões microbiológicos de alimentos. Diário Oficial, Brasília, 26 de dezembro de 2019, Sessão 1, 133.

CHAMBÓ, A. P. S.; SOUZA, M. L. R. D.; OLIVEIRA, E. R. N. D.; MIKCHA, J. M. G.; MARQUES, D. R.; MAISTROVICZ, F. C.; GOES, E. S. D. R. Roll enriched with Nile

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

tilapia meal: sensory, nutritional, technological and microbiological characteristics. **Food Science and Technology**, v. 38, n. 4, p. 726-732, 2017.

<https://doi.org/10.1590/1678-457X.15317>

COSTA, D. P. S.; GONÇALVES, T. M. V.; CONTI-SILVA, A. C. Potentiality of using mechanically separated meats of Nile tilapia in fishburgers: chemical, physical and sensory characterization. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, p. e19180436, 2019.

<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180436>

FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2022**. Sustainability in action. Rome, 2022.

FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 - Meeting the sustainable development goals**. Roma. 2024.

GUIMARÃES, J. L. B.; CALIXTO, F. A. A.; MESQUITA, E. F. M. Produção e utilização da carne mecanicamente separada de pescado: uma revisão. **Higiene Alimentar**, v. 31, n. 268/269, p. 31-35, 2017.

JUSTEN, A. P.; SOUZA, M. L. R. D.; MONTEIRO, A. R.; MIKCHA, J. M.; GASPARINO, E.; DELBEM, Á. B.; DEL VESCO, A. P. Preparation of extruded snacks with flavored flour obtained from the carcasses of Nile tilapia: physicochemical, sensory, and microbiological analysis. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 26, n. 3, p. 258-266, 2017.

<https://doi.org/10.1080/10498850.2015.1136718>

KINGWASCHARAPONG, P.; PAEWPISAKUL, P.; SRIPOOVIENG, W.; SANPRASERT, S.; PONGSETKUL, J.; MEETHONG, R.; RAWDKUEN, S. Development of fish snack (*Keropok*) with sodium reduction using alternative salts (KCl and CaCl₂). **Future Foods**, v. 9, p. 100285, 2024.

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

<https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100285>

NUR LIYANA, N.; NOR-KHAIZURA, M. A. R.; ISMAIL-FITRY, M. R. Effect of substituting tapioca starch with various high protein legume flours on the physicochemical and sensory properties of *keropok lekor* (Malaysian fish sausage). **Food Research**, v. 3, n. 1, p. 40 – 48, 2019.

[https://doi.org/10.26656/fr.2017.3\(1\).217](https://doi.org/10.26656/fr.2017.3(1).217)

LU, X.; BRENNAN, M. A.; SERVENTI, L.; LIU, J.; GUAN, W.; BRENNAN, C. S. Addition of mushroom powder to pasta enhances the antioxidant content and modulates the predictive glycaemic response of pasta. **Food Chemistry**, v. 264, p. 199-209, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.130>

MEILGAARD, M.; CIVILLE, G. V.; CARR, T. B. Sensory evaluation techniques (5th ed.). CRC Press. 2016.

<https://doi.org/10.1201/9781003040729>

MURAD, N. S.; ISMAIL, M. A.; NOR-KHAIZURA, M. A. R.; ISMAIL-FITRY, M. R. The effect of mixing time and mixing sequence during processing on the physicochemical and sensory properties of *keropok lekor*. **Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 4, 2017.

MUTHIA, D.; NURUL, H.; NORYATI, I. The effects of tapioca, wheat, sago and potato flours on the physicochemical and sensory properties of duck sausage. **International Food Research Journal**, v. 17, n. 4, 2010.

NURUL HUDA, N. H.; LENG ANGLI, L. A.; YEE CHUNGXIAN, Y. C.; HERPANDI, H. Chemical composition, color and linear expansion properties of Malaysian commercial fish cracker (*keropok*). **Asian Journal of Food and Agro-Industry**, v. 3, n. 05, p. 473-482, 2010.

PANKYAMMA, V.; BASU, S.; BHADRAN, S. S.; CHOUKSEY, M. K.; GUDIPATI, V. Fish oil-fortified extruded snacks: Evaluation of physical properties and oxidative stability by response surface methodology. **Journal of Food Process Engineering**, v. 37, n. 4, p. 349-361, 2014.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.1209>

PRESENZA, L.; DE FREITAS FABRÍCIO, L. F.; GALVÃO, J. A.; DE SOUZA VIEIRA, T. M. F. Simplex-centroid mixture design as a tool to evaluate the effect of added flours for optimizing the formulation of native Brazilian freshwater fish burgers. **LWT**, v. 156, p. 113008, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.113008>

PULGARÍN, O.; LARREA-WACHTENDORFF, D.; FERRARI, G. Effects of the amylose/amylopectin content and storage conditions on corn starch hydrogels produced by high-pressure processing (HPP). **Gels**, v. 9, n. 2, p. 87, 2023.
<https://doi.org/10.3390/gels9020087>

RAÚL, L. J.; ARAÚJO, I. B. D.; BARBOSA, R. C.; MACIEL, M. I. S.; SHINOHARA, N. K. S.; CAMPAGNOLI DE OLIVEIRA FILHO, P. R. Manufacture of biquara (*Haemulon Plumierii-Lacepède*, 1801) fishburger with addition of wheat bran. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 27, n. 5, p. 544-556, 2018.
<https://doi.org/10.1080/10498850.2018.1461159>

REKOLA, S. M.; KÅRLUND, A.; MIKKONEN, S.; KOLEHMAINEN, M.; POMPONIO, L.; SOZER, N. Structure, texture and protein digestibility of high moisture extruded meat alternatives enriched with cereal brands. **Applied Food Research**, v. 3, n. 1, p. 100262, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100262>

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

SÁNCHEZ-ALONSO, I.; HAJI-MALEKI, R.; BORDERIAS, A. J. Wheat fiber as a functional ingredient in restructured fish products. **Food Chemistry**, v. 100, n. 3, p. 1037-1043, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.090>

SIGNOR, F. R. P.; SIMÕES, G. S.; COLDEBELLA, P. F.; SIGNOR, A. A.; BOSCOLO, W. R. Effect of the addition of pregelatinized starch and dextrin in the formulation of tilapia mechanically separated meat patties. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 45, n. 4, 2019.

<https://doi.org/10.20950/1678-2305.2019.45.4.512>

SILVA, M. A. P.; VIEIRA, P. H. S.; OLIVEIRA FILHO, P. R. C. Elaboração de fishburger de saramunete (*Pseudupeneus maculatos*) utilizando diferentes tipos de farinhas vegetais. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 9, n. 2, p. 36-51, 2016.

<https://doi.org/10.18817/repesca.v9i2.1043>

VELOSO, R. R.; DOS ANJOS, B. W.; MACIEL, M. I. S.; SHINOHARA, N. K. S.; ANDRADE, H. A. Development and evaluation of fresh sausage type of marine catfish [*Sciades herzbergii* (Bloch. 1794)] stored under low temperatures. **International Food Research Journal**, v. 26, n. 2, 2019.

ZIM, A. F. M. I. U.; AKTER, A.; ALI, M. S.; ANIK, W. A.; AHMED, S.; ZAMRI, A. I. B. Proximate composition, texture analysis and sensory evaluation of *keropok lekor* formulated with herbs and spices. **Food Research**, v. 3, p. 635-639, 2019.

[https://doi.org/10.26656/fr.2017.3\(6\).050](https://doi.org/10.26656/fr.2017.3(6).050)

3. Artigo 2: Aplicação da Internet das Coisas (IoT) no Monitoramento Automatizado de Tanques de Piscicultura no estado de Pernambuco

Artigo científico publicado na Revista:
Observatorio de la Economía Latinoamericana
ISSN – 1696-8352 (Qualis Capes – A4)
DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv23n5-051>

Aplicação da Internet das Coisas (IoT) no Monitoramento Automatizado de Tanques de Piscicultura no estado de Pernambuco

Application of the Internet of Things (IoT) in the Automated Monitoring of Fish Farming Tanks in the state of Pernambuco

Andrade et al., 2025

Resumo

O estudo apresenta o desenvolvimento e a validação de um sistema inteligente de monitoramento, de baixo custo, voltado à aquicultura de precisão, com base na arquitetura da Internet das Coisas (IoT). O sistema é composto por sensores subaquáticos capazes de medir, em tempo real, parâmetros críticos da qualidade da água, como temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD), sendo este último estimado indiretamente por meio de uma rede neural artificial baseada nas leituras de temperatura e pH. O protótipo foi testado em pisciculturas localizadas em São José do Egito (PE), Serra Talhada (PE) e Recife (PE) (UFRPE), durante o ciclo completo de cultivo da tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*), ao longo de quatro meses. Os resultados demonstraram alta precisão para os sensores de temperatura (CV-RMSE $\leq 2,93\%$) e pH (CV-RMSE $\leq 16,01\%$), evidenciando sua confiabilidade para uso em campo. As estimativas de OD apresentaram maior variação (CV-RMSE entre 58,01% e 81,73%), indicando a necessidade de aprimoramento do modelo preditivo. Ainda assim, o sistema mostrou potencial para contribuir com a aquicultura 4.0, ao fornecer dados em tempo real, armazenamento em nuvem, visualização remota e alertas automatizados, otimizando o processo de tomada de decisão e a gestão da produção aquícola.

Palavras-chave: Aquicultura 4.0, Tilápia do Nilo, Automação na aquicultura, Qualidade de água.

Abstract

The study presents the development and validation of a low-cost, intelligent monitoring system for precision aquaculture, based on the Internet of Things (IoT) architecture. The system consists of underwater sensors capable of measuring, in real time, critical water quality parameters, such as temperature, pH, and dissolved oxygen (DO), the latter being estimated indirectly through an artificial neural network based on temperature and pH readings. The prototype was tested in fish farms located in São José do Egito (PE), Serra Talhada (PE), and Recife (PE) (UFRPE), during the complete Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultivation cycle, over four months. The results demonstrated high accuracy for the temperature (CV-RMSE $\leq 2.93\%$) and pH (CV-RMSE $\leq 16.01\%$) sensors, evidencing their reliability for field use. The OD estimates showed greater variation (CV-RMSE between 58.01% and 81.73%), indicating the need to improve the predictive model. Nevertheless, the system showed potential to contribute to aquaculture 4.0 by providing real-time data, cloud storage, remote visualization, and automated alerts, optimizing the decision-making process and the management of aquaculture production.

Keywords: Aquaculture 4.0, Nile Tilapia, Automation in aquaculture, Water quality.

Introdução

O estado de Pernambuco é um dos maiores produtores de peixes da região Nordeste, ocupando a 5º maior produção do país. A região do estado que mais produz pescado é o sertão de Itaparica onde se pratica o cultivo em tanque-rede (Peixe Br, 2020). Entretanto, a produção de pescado ainda não alcançou o patamar mais elevado, podendo aumentar devido às diversas fontes de águas interiores de origem de poços que, embora sejam impróprias ao consumo humano, por ser uma água salobra, podem ser destinadas ao cultivo de tilápias, visto que a espécie pode tolerar águas com salinidade (De Azevedo et al., 2015). Segundo a Lima et al. (2011), a tilápia do Nilo em águas salobras, podem apresentar um crescimento aceitável.

Apesar da possibilidade de expansão da tilapicultura no estado de Pernambuco, um gargalo para esta atividade tem sido a baixa frequência de acompanhamento da produção por meio da assistência técnica. Neste sentido, a utilização de tecnologias inovadoras e remotas surge como uma alternativa para suprir essa necessidade. Diante disto, a internet das coisas (IoT - Internet of Things), possibilita que ocorra uma conexão em tempo real de objetos com a internet, com a função de promover serviços para coisas e pessoas (Routh e Pal, 2018). A tecnologia utilizada na IoT ocorre através de redes de sensores e atuadores sem fios, no qual o acompanhamento é realizado por meio de redes para diversas finalidades, como a obtenção de informações e disponibilidade em nuvem, provendo a conexão entre pessoas e objetos/informação, independente das suas posições geográficas (Routh e Pal, 2018).

Na aquicultura de precisão, o uso da IoT em sensores é uma inovação tecnológica que pode ser utilizada para favorecer a automação dos processos e as tomadas de decisões, resultando em uma aquicultura chamada de “aquicultura 4.0” (European Union, 2017; De Clercq et al., 2018). A aquicultura 4.0 já é uma realidade no cenário mundial, que tem como objetivo a aplicação de tecnologia e da inovação, com o propósito de aumentar a produtividade (Nuter, 2021). Este setor tem se fundamentado na conexão entre variadas ferramentas de informação e comunicação embasada pela tecnologia. Estes conceitos se referem a um conjunto de tecnologias digitais integradas e conectadas por meio de softwares, sistemas e equipamentos de automação capazes de otimizar a produção (Nuter, 2021). Esta tecnologia vem transformando a produção de organismos aquáticos, sendo possível agilizar os processos e também ter acesso a dados que antes não eram tão facilmente obtidos, ajudando assim, os produtores a tomarem melhores decisões. Dupont et al. 2018, enfatizam a facilidade nas tomadas de decisão através das tecnologias, caso a

qualidade da água não esteja adequada, com isso a gestão de um cultivo se torna bem mais eficiente.

Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema de baixo custo com arquitetura de Internet das coisas (IoT) com sensores subaquáticos para medição e monitoramento em tempo real de oxigênio dissolvido, temperatura e pH; desenvolvimento de uma plataforma de IoT de transmissão sem fio heterogênea, baseada no contexto e necessidade de largura de banda, ubiquidade e eficiência energética para o provisionamento de dados em nuvens para sistemas inteligentes de piscicultura 4.0.

Metodologia

Transformação digital para sensores de monitoramento da qualidade da água Construção e aperfeiçoamento do dispositivo iot inteligente

Para a construção e aperfeiçoamento do dispositivo IOT inteligente foi realizado um levantamento dos itens necessários para a implementação dos protótipos físicos do sistema, que compõe os seguintes itens: sensores subaquáticos para sistemas embarcados, painéis solares, microcontroladores IoT, módulos comunicação sem fio, módulos displays, módulos MicroSD, multímetro digital, kit soldagem (ferro, sugador, lupa, suporte, solda), kit de prototipação (protoboard 830 pontos, alimentação P4 9V), kit de componentes eletrônicos básicos (diodos, capacitores, resistores, botões, etc) e caixas de montagem IP66/IP67.

O desenvolvimento do sistema integrado com a Internet das coisas para sistemas de piscicultura inteligente foi construído a partir da modelagem computacional de alto nível do sistema. Em seguida, foi desenvolvida a integração do sensor de temperatura com o controlador IoT, sendo a informação obtida apresentada em tempo real em um display LCD acoplado ao próprio controlador. Em um segundo momento, os sensores de pH (PH4502C) e de temperatura (DS18B20) e o módulo gateway Wi-Fi (ESP8266 NodeMCU) foram inseridos e programados neste controlador, possibilitando uma visualização dos dados lidos pelos sensores no display e sua transmissão em tempo real para servidores na internet.

Foram realizadas algumas melhorias nesta versão do protótipo, resultando em sua segunda versão, com a substituição dos sensores de pH e de temperatura, visto que os

equipamentos mais velhos apresentaram defeitos durante o primeiro experimento. Nesta outra versão ainda foram substituídos os microcontroladores Arduino UNO e o gateway ESP8266 NodeMCU por outro microcontrolador mais avançado, o Heltec ESP32 LoRa, capaz de integrar tanto os requisitos elétricos dos sensores quanto a conectividade Wi-Fi numa única placa, além de já possuir um display OLED nativo.

O projeto do circuito elétrico foi então modificado para este novo controlador, com o sensor de pH agora conectado num módulo conversor analógico digital, para aumentar sua precisão, e o sensor de temperatura conectado diretamente à placa. Em seguida, a lógica da comunicação Wi-Fi foi remodelada e o sensor de pH calibrado, com o auxílio de soluções de calibração de pH 4, 7 e 10.

O foco do desenvolvimento da nova versão do equipamento foi a adição do sistema de alimentação por energia solar do tipo *Off Grid*, na qual são utilizadas baterias para armazenar a energia gerada e para alimentar o circuito elétrico de sensoriamento. O circuito de gerenciamento de carga e descarga das baterias foi soldado e integrado ao circuito de sensoriamento utilizado na segunda versão do equipamento. Em seguida, foi realizado o dimensionamento da quantidade de baterias e de placas solares, para que todo o circuito elétrico pudesse ser acionado sem o auxílio de fontes externas de energia, onde foram utilizadas duas baterias de lítio (Li-ion) e duas placas solares com tensão 2,5W.

Esta versão foi projetada para ser utilizada nos sistemas de cultivo de aquicultura, de modo a flutuar nestes ambientes. Para isto, foi montada uma boia flutuadora de PVC, para servir de estrutura de suporte à caixa onde o circuito elétrico foi montado. Isto facilitou o posicionamento do equipamento nos tanques trazendo maior confiabilidade aos dados coletados.

Desenvolvimento da plataforma iot, aplicação web e mobile

Para o desenvolvimento da plataforma IoT foram inicialmente mapeadas as plataformas em nuvem disponíveis para hospedar os serviços computacionais sob demanda do sistema, sendo decidido utilizar a *Google Cloud Platform* (GCP), devido a seu nível gratuito de utilização, o que reduz os custos do projeto, e a facilidade de desenvolvimento na mesma. Em seguida, foram comparadas diferentes plataformas IoT, quanto às funcionalidades disponíveis no nível gratuito de utilização, sendo decidido utilizar a *Thingsboard*, devido a ampla documentação disponível e a presença de todas as

ferramentas de Big Data (ingestão, processamento, armazenamento e exploração de dados) e integração necessárias para o desenvolvimento da camada de rede. Com os requisitos definidos, foi alocado um servidor na GCP, no qual foi instalada uma instância plataforma IoT *Thingsboard*, representando a implementação do servidor em nuvem do projeto.

Numa segunda máquina virtual foi instalada a ferramenta de predição de oxigênio dissolvido, desenvolvida utilizando técnicas de inteligência artificial, como as redes neurais artificiais. Esta ferramenta foi projetada como um serviço, que ao receber os dados de pH e temperatura, calcula uma estimativa do oxigênio dissolvido e a retorna ao emissor dos dados. Esta ferramenta foi integrada ao processo de tratamento de dados da *Thingsboard*, para ocorrer automaticamente, à medida que os novos dados dos sensores fossem mensurados.

Em seguida, a segunda versão do dispositivo IoT físico foi integrada ao servidor em nuvem, onde são tratadas pelos procedimentos de Big Data da plataforma. Essas novas leituras também são encaminhadas à ferramenta de predição do oxigênio dissolvido, que retorna estimações do OD de volta ao *Thingsboard*, para serem armazenadas junto aos dados de pH e temperatura que as originaram.

A própria plataforma *Thingsboard* já disponibiliza mecanismos práticos para criação de telas para visualização de dados (*Dashboards*). Desta forma, foi montado um dashboard para facilitar a visualização dos dados dos sensores, sendo possível verificar em tempo real as últimas leituras de pH, temperatura e as predições do Oxigênio dissolvido, por parte da Inteligência Artificial. Estes dados também estão disponíveis em gráficos de linhas, na forma de séries temporais, de modo que o usuário acessando a página possa escolher visualizar as leituras em tempo real ou visualizar o histórico de dados lidos anteriormente, configurando a granularidade e intervalos de tempo que desejar. O *dashboard* pode ser acessado tanto pelo computador (Web) quanto pelo celular (Mobile), configurando uma interface responsiva.

Avaliação de desempenho do dispositivo iot inteligente

A fim de avaliar a precisão dos dados coletados referentes à temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD), empregou-se o coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV-RMSE). Esta métrica, cuja formulação encontra-se descrita na Equação (1), constitui um indicador de regressão que expressa, em termos percentuais, a média das

discrepâncias entre séries temporais, permitindo uma análise comparativa da variabilidade dos dados em relação ao valor médio observado.

Equação 1. Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio (CV(RMSE))

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$$

Fonte: Autores

Onde:

Y = Média dos valores observados

Y_i = Valor observado i.

Ŷ_i = Valor previsto i.

N = Número total de observações.

As séries temporais analisadas foram categorizadas em duas classes: controle, constituída por amostras obtidas por métodos convencionais (consideradas como referência), e teste, composta por dados provenientes dos sensores subaquáticos e do estimador de oxigênio dissolvido (DO). Valores do coeficiente de variação do erro quadrático médio (CV-RMSE) próximos de zero indicam elevada similaridade entre as séries temporais, refletindo menor erro entre elas. De acordo com Kolassa (2020), valores de CV-RMSE inferiores ou iguais a 20% são indicativos de uma precisão considerada aceitável para a série temporal de teste.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a funcionalidade do sistema IoT desenvolvido em um ambiente de produção real. Para esse fim, o protótipo foi instalado em tanques de aquicultura destinado ao cultivo de tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*). Os locais utilizados foram pisciculturas localizadas na cidade de São José do Egito - Pernambuco, Serra Talhada - Pernambuco e em Recife na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). O período experimental teve duração de quatro meses, abrangendo todas as fases do ciclo de desenvolvimento da espécie em questão.

Durante os primeiros trinta dias do experimento, foram realizadas medições manuais dos parâmetros físico-químicos da água — temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD) — utilizando-se um medidor de pH modelo AKSO AK-90 e um oxímetro modelo Alfakit AT-160, este último equipado com sensor de temperatura integrado. Os

referidos instrumentos são os mesmos empregados rotineiramente nos procedimentos de monitoramento dos tanques de cultivo. Os dados obtidos por meio dessas medições manuais compuseram a série de controle do experimento. As leituras foram realizadas duas vezes ao dia, às 9h e às 16h.

Delineamento experimental e análise estatística

Análise dos sensores

Para a avaliação de desempenho da acurácia dos sensores, foi utilizado o coeficiente de variação (CV) da equação do desvio quadrático médio (root mean square error – RMSE) (Da Silva, 2021), caracterizada pela Equação 1. Esta é uma métrica de regressão que permite a comparação entre o erro médio entre amostras de diferentes granularidades, pois representa sua saída como representada por uma porcentagem, facilitando sua análise.

Resultados e discussão

A qualidade de água na aquicultura é uma preocupação constante. Segundo Baoquan et al. (2019), uma mudança na qualidade da água pode afetar diretamente no crescimento e tempo de cultivo dos animais. Com isso é extremamente necessário que os responsáveis monitorem e corrijam a qualidade de água, devido ser um fator decisivo na aquicultura. Com isso, a análise dos parâmetros da água é uma importante ferramenta para monitorar a qualidade hídrica do sistema (Matsuzaki et al., 2004).

As Tabelas 1 a 3 apresentam os valores médios (\pm desvio padrão) obtidos para temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD) medidos por sensores e pelos métodos de controle em três diferentes locais: São José do Egito, Serra Talhada e UFRPE. Também é apresentado o coeficiente de variação do erro quadrático médio da raiz (CV(RMSE)), utilizado como métrica para avaliar a precisão dos sensores em relação ao controle.

Tabela 1. Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na piscicultura de *Oreochromis niloticus* localizada em São José do Egito – PE.

| São José do Egito | | | |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|
| | Temperatura | PH | OD |
| Sensor | 29,59 ± 0,12 | 8,92 ± 0,19 | 18,49 ± 3,09 |
| controle | 29,47 ± 0,12 | 9,35 ± 0,05 | 12,09 ± 2,34 |
| CV(RMSE) | 0,56% | 4,89% | 58,01% |

Valores médios (\pm desvio padrão) e CV(RMSE) dos parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH e OD - Oxigênio dissolvido)

Fonte: autores

Na piscicultura de São José do Egito, os valores de temperatura registrados pelo sensor ($29,59 \pm 0,12$ °C) foram bastante próximos aos obtidos pelo controle ($29,47 \pm 0,12$ °C), refletindo um baixo CV(RMSE) de 0,56%. Isso indica alta precisão do sensor para essa variável. O pH medido pelo sensor ($8,92 \pm 0,19$) apresentou uma pequena diferença em relação ao controle ($9,35 \pm 0,05$), com um CV(RMSE) de 4,89%, ainda dentro de um intervalo considerado aceitável.

No entanto, para o OD, houve uma discrepância significativa: o sensor registrou $18,49 \pm 3,09$ mg/L, enquanto o controle indicou $12,09 \pm 2,34$ mg/L, resultando em um CV(RMSE) de 58,01%, o que aponta para baixa confiabilidade na medição dessa variável.

Tabela 2. Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na piscicultura de *Oreochromis niloticus* localizada em Serra Talhada – PE.

| Serra Talhada | | | |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| | Temperatura | PH | OD |
| Sensor | 31,01 ± 0,22 | 9,82 ± 0,09 | 28,17 ± 1,20 |
| controle | 30,73 ± 0,32 | 10,27 ± 0,08 | 15,74 ± 2,83 |
| CV(RMSE) | 0,97% | 4,38% | 81,73% |

Valores médios (\pm desvio padrão) e CV(RMSE) dos parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH e OD - Oxigênio dissolvido)

Fonte: Autores

Em Serra Talhada, a temperatura também foi medida com boa precisão, com valores de $31,01 \pm 0,22$ °C pelo sensor e $30,73 \pm 0,32$ °C pelo controle, resultando em um CV(RMSE) de 0,97%. O pH apresentou um leve desvio entre sensor ($9,82 \pm 0,09$) e

controle ($10,27 \pm 0,08$), com CV(RMSE) de 4,38%. Entretanto, a maior diferença foi observada no OD, onde o sensor indicou $28,17 \pm 1,20$ mg/L e o controle $15,74 \pm 2,83$ mg/L, gerando um elevado CV(RMSE) de 81,73%, novamente sugerindo imprecisão considerável na medição de OD pelos sensores.

Tabela 3. Resultados da temperatura, pH e oxigênio dissolvido na piscicultura de *Oreochromis niloticus* localizada em Recife – PE, na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

| Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) | | | |
|--|------------------|-----------------|-----------------|
| | Temperatura | PH | OD |
| Sensor | $28,00 \pm 1,26$ | $7,19 \pm 0,77$ | $7,02 \pm 3,10$ |
| controle | $27,87 \pm 1,14$ | $8,45 \pm 0,78$ | $5,42 \pm 2,47$ |
| CV(RMSE) | 2,93% | 16,01% | 59,12% |

Valores médios (\pm desvio padrão) e CV(RMSE) dos parâmetros físico-químicos da água (temperatura, pH e OD - Oxigênio dissolvido)

Fonte: Autores

Na piscicultura localizada na UFRPE, observou-se uma tendência similar. A temperatura medida pelo sensor ($28,00 \pm 1,26$ °C) apresentou boa concordância com o controle ($27,87 \pm 1,14$ °C), com CV(RMSE) de 2,93%. O pH foi a variável com maior divergência, com valores de $7,19 \pm 0,77$ (sensor) e $8,45 \pm 0,78$ (controle), resultando em um CV(RMSE) elevado de 16,01%. Para o OD, a diferença foi menor do que nas demais localidades ($7,02 \pm 3,10$ mg/L no sensor e $5,42 \pm 2,47$ mg/L no controle), mas o CV(RMSE) ainda foi relativamente alto (59,12%).

De acordo com Nunes *et al.* (2019), o pH revela se a água é ácida ou básica, e variações nesse parâmetro na água de cultivo podem impactar o funcionamento das brânquias, comprometendo o equilíbrio osmótico e a respiração dos peixes. Valores extremos de pH podem prejudicar o crescimento e a reprodução dos peixes, podendo até levar à mortalidade em sistemas de aquicultura.

No caso do oxigênio dissolvido (OD), os níveis deste parâmetro foram obtidos através do regressor de rede neural treinada, através da inserção e interação das leituras de temperatura e pH dos sensores. Desta forma, os valores deste parâmetro estão diretamente ligados a precisão dos sensores de temperatura e pH. Podendo-se afirmar que a rede neural sofre uma maior influência das leituras de pH do que da temperatura.

Segundo Santos *et al.* (2018), a validação de sensores na aquicultura é crucial no contexto do desenvolvimento de um sistema automatizado de análise de água para a aquicultura, sua validação contribui para a confiabilidade geral do sistema automatizado.

O CV RMSE (erro quadrático médio da validação cruzada) é crucial para avaliar a precisão do modelo, especialmente em pequenos conjuntos de dados, além de fornecer informações sobre a complexidade do modelo e a estabilidade do desempenho em diferentes tamanhos de conjuntos de treinamento (Dyar e ytsma, 2021). Li *et al.* (2018), também montou um modelo híbrido para predição de oxigênio dissolvido, onde foi incluído erro médio absoluto (MAE), erro percentual médio absoluto (MAPE), erro quadrático médio (MSE) e erro quadrático médio raiz (RMSE), e obteve um modelo de predição considerado confiável. Com isso, o uso de mais componentes pode ter influenciado nesta maior eficiência, diferente do presente estudo.

Já Eze *et al.* (2020) utilizou o modelo híbrido combina a técnica de Decomposição do Modo Empírico em Conjunto (EEMD) com uma rede neural (NN) de memória de longo prazo (LSTM), o autor obteve um aumento acentuado na precisão das previsões de curto prazo em comparação com as previsões de longo prazo, destacando sua eficácia para previsões imediatas de concentração de OD.

De maneira geral, os sensores demonstraram boa precisão na medição da temperatura e pH, com CV(RMSE) baixo nas três localidades. Além de ser um sistema de baixo custo, ele pode gerar bastantes benefícios para um setor produtivo, pois ele permite o monitoramento e tempo real dos parâmetros, gera um histórico de como essas variáveis estão se comportando, ele também pode gerar alertas e tem uma certa precisão de informações. Por outro lado, os resultados de Oxigênio dissolvido estimados pela rede neural, necessitam de ajustes para ter uma maior precisão.

Conclusão

O estudo demonstrou a viabilidade de um sistema IoT de baixo custo para monitoramento em tempo real da qualidade da água na aquicultura, com sensores capazes de medir com precisão temperatura e pH, mas com limitações na estimativa indireta de oxigênio dissolvido (OD) via redes neurais. A integração entre hardware, energia solar e plataformas em nuvem mostrou-se eficaz para a coleta, armazenamento e visualização de dados, contribuindo para a automação e tomada de decisão em sistemas aquícolas. Embora o modelo preditivo de OD necessite de ajustes, a solução proposta representa um

avanço tecnológico acessível para a aquicultura 4.0, especialmente em regiões com infraestrutura limitada. Futuros trabalhos devem focar no refinamento do algoritmo de OD e na expansão do sistema para outras variáveis ambientais, visando maior robustez e aplicabilidade em diferentes contextos produtivos.

Agradecimentos

A equipe colaboradora, pelo apoio financeiro recebido da FACEPE e da CAPES.

Referências

BAOQUAN, Y. I. N.; SHANSHAN, C. A. O.; ZETIAN, F. U.; XUEBING, B. A. I. Review and Trend Analysis of Water Quality Monitoring and Control Technology in Aquaculture, **J. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, n. 50, p. 1-13, 2019.

DA SILVA, P. P. F.; NETO, A. H.; SAUER, I. L. Evaluation of Model Calibration Method for Simulation Performance of a Public Hospital in Brazil. **Energies**, v. 14, n. 13, p. 3791, 2021.
<https://doi.org/10.3390/en14133791>

DE AZEVEDO, R. V.; DE OLIVEIRA, K. F.; FLORES-LOPES, F.; TEIXEIRA-LANNA, E. A.; TAKISHITA, S. S.; TAVARES-BRAGA, L. G. Responses of Nile tilapia to different levels of water salinity. **Latin American journal of aquatic research**, v.43, p. 828-835, 2015.
<https://DOI: 10.3856/vol43-issue5-fulltext-3>

DE CLERCQ, M.; VATS, A.; BIEL, A. **Agriculture 4.0: The future of farming technology**. Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE, p.11-13, 2018.

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

DYAR, M. D.; YTSMA, C. R. Effect of data set size on geochemical quantification accuracy with laser-induced breakdown spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 177, p. 106073, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106073>

DUPONT, C.; COUSIN, P.; DUPONT, S. IoT for aquaculture 4.0 smart and easy-to-deploy real-time water monitoring with IoT. In: 2018 Global Internet of Things Summit (GloTS). **IEEE**, p. 1-5. 2018.

EUROPEAN UNION. **Digital Transformation Monitor – Industry 4.0 in Agriculture: Focus on IoT aspects**. European Commission: 2017.

EZE, E.; AJMAL, T. Dissolved oxygen forecasting in aquaculture: A hybrid model approach. **Applied Sciences**, v. 10, n. 20, p. 7079, 2020.

<https://doi.org/10.3390/app10207079>

KOLASSA, S. Why the “best” point forecast depends on the error or accuracy measure. **International Journal of Forecasting**, v. 36, n. 1, p. 208-211, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.02.017>

LI CHEN, L. C.; LI ZHENBO, L. Z.; WU JING, W. J.; ZHU LING, Z. L.; YUE JUN, Y. J. A hybrid model for dissolved oxygen prediction in aquaculture based on multi-scale features. **Information processing in agriculture**, v. 5, n. 1, p. 11-20, 2018.

<https://DOI: 10.1016/j.inpa.2017.11.002>

LIMA, V. T. A.; CAMPECHE, D. F. B.; PAULINO, R. V.; DOS SANTOS JÚNIOR, D. D.; VASCONCELOS, E. D. C. Análise da condutividade elétrica e do pH em água salobra no cultivo de tilápias. In: **Embrapa semiárido**, 2011, p. 423-428.

MATSUZAKI, M.; MUCCI, J. L. N.; ROCHA, A. A. Comunidade fitoplanctônica de um pesqueiro na cidade de São Paulo. **Revista de Saúde Pública**, v. 38, n. 5, p. 679-686, 2004.

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

NUNES, M. S. *et al.* **Piscicultura: manejo da qualidade da água. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural**. Senar, Brasília-DF, P. 52, 2019.

NUTER. *Aquicultura 4.0: benefícios da automação na produção aquícola*. 2021.

Disponível em: <https://nuter.com.br/aquicultura-4-0-beneficios-da-automacao-na-producao-aquicola/>. Acesso em: 6 abr. 2025.

PEIXE BR. **Anuário Peixe BR da Piscicultura**. Associação brasileira da piscicultura, 2020.

ROUTH, K; PAL, T. A survey on technological, business and societal aspects of Internet of Things by Q3, 2017. In: **2018 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)**. IEEE, 2018. p. 1-4.

[https://DOI: 10.1109/IoT-SIU.2018.8519898](https://doi.org/10.1109/IoT-SIU.2018.8519898)

SANTOS, M. V. B.; DOMICIANO, C. A. R.; DA GUIA ROCHA, F.; DE LIMA, C. J. B.; DE JESUS, L. A.; MOURA, J. R. F. Desenvolvimento de sistema automático de análise de pH e temperatura da água para aquicultura. **Anais do Computer on the Beach**, v. 9, p. 325-333, 2018.

[https://DOI: 10.14210/cotb.v0n0.p325-333](https://doi.org/10.14210/cotb.v0n0.p325-333)

4. Considerações finais

Os resultados desta tese apresentaram contribuições relevantes para o desenvolvimento da cadeia produtiva da tilapicultura no estado de Pernambuco, falando sobre o aproveitamento integral de subprodutos do pescado na elaboração de novos produtos alimentícios, e a aplicação de tecnologias inovadoras no monitoramento da qualidade da água na aquicultura.

No primeiro estudo foi elaborado e avaliado um produto alimentício inovador: o *keropok lekor* produzido com carne mecanicamente separada (CMS) de tilápia e suplementado com fibra de trigo. As análises físico-químicas, microbiológicas e sensoriais indicaram que o produto é seguro para o consumo humano, possui boa aceitação sensorial e apresenta potencial para comercialização em escala industrial. Recomenda-se, com base nos resultados obtidos, a formulação com 20% de CMS e 2% de fibra de trigo, promovendo, assim, a agregação de valor aos resíduos do processamento do pescado e contribuindo para a sustentabilidade ambiental e econômica da cadeia produtiva.

O segundo estudo foi realizado para a criação e validação de um sistema inteligente de monitoramento da qualidade da água com base na arquitetura da Internet das Coisas (IoT). O sistema demonstrou ser uma ferramenta promissora para a aquicultura de precisão, apresentando alta precisão na medição de temperatura e pH, além de fornecer dados em tempo real, armazenamento em nuvem e alertas automatizados. Apesar da necessidade de aprimoramento do modelo preditivo para oxigênio dissolvido, o sistema desenvolvido representa um avanço significativo para a gestão da produção aquícola e modernização da atividade, alinhando-se aos princípios da aquicultura 4.0.

De modo geral, os resultados obtidos nesta pesquisa destacam-se pelo caráter aplicado e pela possibilidade de replicação em outras regiões com potencial aquícola, especialmente aquelas que enfrentam desafios semelhantes quanto à escassez de assistência técnica e à necessidade de aproveitamento de subprodutos. As inovações apresentadas fortalecem o papel da pesquisa científica como instrumento fundamental para o desenvolvimento sustentável do setor pesqueiro e aquícola.

Por fim, recomenda-se que futuros estudos explorem o aprimoramento dos modelos preditivos de qualidade da água, a diversificação de produtos alimentícios elaborados a partir de subprodutos do pescado, bem como a avaliação de viabilidade econômica e

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

social dessas inovações, visando consolidar ainda mais a tilapicultura como uma atividade estratégica para o desenvolvimento regional.

5. Referências gerais

ARVANITOYANNIS, I. S.; TSERKEZOU, P. **Fish waste management**. In: Boziaris, I. S. *Seafood processing: technology, quality and safety*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2014. p. 263-309.

BORGOGNO, M. et al. Technological and nutritional advantages of mechanical separation process applied to three European aquacultured species. *LWT - Food Science and Technology*, v. 84, p. 298-305, 2017.

DAGNE, A.; DEGEFU, F.; LAKEW, A. Comparative growth performance of mono-sex and mixed-sex Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in pond culture system at Sebeta, Ethiopia. *International Journal of Aquaculture*, v.3, p.30-34, 2013.

DE AZEVEDO, R. V.; OLIVEIRA, K. F.; FLORES-LOPES, F.; TEIXEIRA-LANNA, E. A.; TAKISHITA, S. S.; TAVARES-BRAGA, L. G. Responses of Nile tilapia to different levels of water salinity. *Latin American journal of aquatic research*, v.43, p.828-835, 2015.

DE CLERCQ, M.; VATS, A.; BIEL, A. **Agriculture 4.0: The future of farming technology**. Proceedings of the World Government Summit, Dubai, UAE, 2018, p.11-13.

DUPONT, C.; COUSIN, P.; DUPONT, S. **IoT for aquaculture 4.0 smart and easy-to-deploy real-time water monitoring with IoT**. In: 2018 Global Internet of Things Summit (GIoTS). IEEE, p. 1-5. 2018.

EL-SAYED, A. F. M. **Tilapia culture**. 2. ed. London: Academic Press, 2020.

EUROPEAN UNION. **Digital Transformation Monitor – Industry 4.0 in Agriculture: Focus on IoT aspects**. European Commission: 2017.

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 - Meeting the sustainable development goals**. Roma. 2024.

LAGO, A. M. T. et al. Influence of the addition of minced fish on the preparation of fish sausage: effects on sensory properties. **Journal of Food Science**, v. 82, p. 492-499, 2017.

LYRA, A. **Aquicultura 4.0: Tecnologia pode ajudar no aumento de consumo**. Seafood Brasil, 2019. Disponível em: <<https://www.seafoodbrasil.com.br/aquicultura-40-tecnologia-pode-ajudar-no-aumento-de-consumo>>. Acesso em: 24 abril 2025.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. **Indicadores ambientais e recursos hídricos: realidade e perspectivas para o Brasil a partir da experiência francesa**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

NOR-KHAIZURA, M. A. R.; ZAITON, H.; JAMILAH, B.; RA, G. R. Microbiological quality of keropok lekor during processing. **International Food Research Journal**. 2009.

NUTER. **Aquicultura 4.0: Benefícios da automação na produção agrícola**. Bom Retiro: Nuter, 2020. Disponível em: <<https://nuter.com.br/aquicultura-4-0-beneficios-da-automacao-na-producao-aquicola/>>. Acesso em: 14 abril 2025.

PEIXE BR. **Anuário Peixe BR da Piscicultura**. 2025.

ROUTH, K. e PAL, T. **A Survey on Technological, Business and Societal Aspects of Internet of Things**. 3rd International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU). Fevereiro, 2018.

SANSUY. **Aquicultura 4.0: O que é e como se adapta às transformações**. Embu: Sansuy, 2020. Disponível em: <<https://blog.sansuy.com.br/aquicultura-4-0/>>. Acesso em: 18 abril de 2025.

ANDRADE, RJV Avaliação de métodos inovadores no cultivo e na elaboração de subprodutos de *Oreochromis* spp. no estado de Pernambuco

SECCI, G. et al. Mechanical separation process for the value enhancement of Atlantic horse mackerel (*Trachurus trachurus*), a discard fish. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 39, p. 13-18, 2017.