UNIOESTE – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PR
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL
MESTRADO E DOUTORADO

LEONARDO BALCEWICZ JUNIOR

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE LIOFILIZADOR VERTICAL PARA DESIDRATAÇÃO DE FILÉS DE TILÁPIA DO NILO (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)

MARECHAL CÂNDIDO RONDON
2024

LEONARDO BALCEWICZ JUNIOR

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE LIOFILIZADOR VERTICAL PARA DESIDRATAÇÃO DE FILÉS DE TILÁPIA DO NILO (*OREOCHROMIS NILOTICUS*)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável – Mestrado e Doutorado do Centro de Ciências Agrárias da UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento Rural Sustentável.

Linha de pesquisa: Inovações Sociotecnológicas e Ação Extensionista

Orientador: Prof. Dr. Altevir Signor

MARECHAL CÂNDIDO RONDON

2024

unioeste
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Reitoria
CNPJ 78.680.337/0001-84
Rua Universitária, 1619, Jardim Universitário
Tel.: (45) 3220-3000 - Fax: (45) 3225-4590 - www.unioeste.br
CEP: 85819-110 - Cx. P.: 701
Cascavel - PARANÁ

PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

LEONARDO BALCEWICZ JUNIOR

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE LIOFILIZADOR VERTICAL PARA DESIDRATAÇÃO DE FILÉS DE TILÁPIA DO NILO (OREOCHROMIS NILOTICUS)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Desenvolvimento Rural Sustentável, área de concentração Desenvolvimento Rural Sustentável, linha de pesquisa Inovações Sociotecnológicas e Ação Extensionista, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ALTEVIR SIGNOR
Data: 21/03/2024 17:29:26-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador(a) - Altevir Signor

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

gov.br Documento assinado digitalmente
ANDRE FERNANDO HEIN
Data: 22/03/2024 11:16:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

André Fernando Hein

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

gov.br Documento assinado digitalmente
MARTIN AIRTON WISSMANN
Data: 22/03/2024 11:53:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Martin Airton Wissmann

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

gov.br Documento assinado digitalmente
ALDI FEIDEN
Data: 28/03/2024 11:09:23-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Aldi Feiden

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)

gov.br Documento assinado digitalmente
LUIZ FERNANDE CASAGRANDE
Data: 27/03/2024 08:54:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Luiz Fernando Casagrande

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR)

Marechal Cândido Rondon, 21 de março de 2024

RESUMO

BALCEWICZ JUNIOR, Leonardo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – 2024. **Desempenho energético de liofilizador vertical para desidratação de Filés de Tilápia do Nilo (*Oreochromis Niloticus*)**. Orientador: Dr. Altevir Signor.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de um congelador vertical em termos de consumo energético para desidratação de filés de tilápia do Nilo em um protótipo de liofilizador vertical. Os filés de tilápia foram utilizados nos testes dos dois estudos, não havendo classificação precisa em termos de massa e dimensão nos lotes analisados. No primeiro estudo, foi utilizado um congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L, que utiliza em seu sistema de refrigeração o fluído refrigerante Freon R404A. Com base nos dados obtidos, foi avaliado o ciclo de congelamento, desempenho energético e testes experimentais em três lotes de filés de tilápia com as massas de 18,29 kg, 19,94 kg e 21,38 kg, totalizando a massa em 59,61 kg. Foram medidas as variações de potência consumida em relação aos tempos do ciclo de congelamento de cada lote, assim como as variações de calor latente e sensível durante todo o processo. Avaliou-se também, o comportamento do ciclo de congelamento dos lotes em duas diferentes posições do congelador vertical. No segundo estudo, o liofilizador vertical, ainda no estágio de protótipo, foi submetido a ensaios controlados dentro de câmara de ensaios durante o período de 432 horas. Para realização da avaliação do consumo energético no processo de desidratação dos lotes, foram testadas amostras de filés de tilápia de massas iniciais de 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg, totalizando 48 k submetidos à desidratação. O processo de liofilização foi realizado com durações de 18, 24, 30 e 36 horas para todas as amostras e, ao final do processo, mediu-se as massas finais, comparando a perda de peso percentual em relação às iniciais e ao consumo médio em W/h. Avaliou-se o consumo energético e o tempo estimado necessário para atingir o nível de 30,00% de matéria seca, considerado como ideal para desidratação dos filés de tilápia segundo Fellows (2006). Em seguida, realizou-se um comparativo entre o consumo energético de um congelador vertical de uso doméstico e o consumo energético estimado para liofilizar massa equivalente de filés de tilápia que podem ser armazenadas e conservadas no congelador vertical. Como resultado principal dessa comparação, verificou-se que o consumo energético estimado para o processo de liolifização somente teria vantagens a partir de 0,96 anos (350 dias) de armazenamento do produto para a massa do lote de filés de tilápia de 2,5 kg submetidos à liofilização. O pior resultado no processo de liofilização, quando comparado ao congelador vertical, é de 1,67 anos (611 dias) para o lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5 kg. Esta comparação é baseada somente no consumo energético, não levando em consideração outros fatores, como por exemplo, menor massa e volume dos filés liofilizados, área de armazenamento e manutenção do congelador vertical.

Palavras-chave: Congelamento de filés de tilápia do Nilo. Liofilizador. Desidratação filés de tilápia.

ABSTRACT

BALCEWICZ JUNIOR, Leonardo. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – 2024. **Energy Performance of Vertical Freeze Dryer for Dehydration of Nile Tilapia Fillets (*Oreochromis Niloticus*)**. Advisor: Dr. Altevir Signor.

This study aims to evaluate the energy consumption performance of a vertical freezer for dehydrating Nile Tilapia fillets in a prototype vertical freeze dryer. Tilapia fillets were used for the tests of both studies if they did not have a precise classification in terms of mass and size. In study 1, a vertical freezer with a Blast Chiller 230L freezing tunnel was used with Freon R404A refrigerant. Based on the data obtained, the freezing cycle, performance and experimental tests were evaluated. Three batches of tilapia fillets were used, containing masses of 18.29 kg, 19.94 kg, and 21.38 kg, totaling the mass of the batch at 59.61 kg. The variations in power consumed in relation to the freezing cycle times were measured, as well as the variations in latent and sensible heat throughout the process. The behavior of the freezing cycle was evaluated at 2 different points in the vertical freezer. In study 2, the vertical freeze dryer, still in the prototype stage, was subjected to controlled tests inside a test chamber for a period of 432 hours. To evaluate energy consumption, different samples of tilapia fillets with initial masses of 1.5 kg, 2.5 kg, 3.5 kg, and 4.5 kg, totaling 48 kg, were subjected to dehydration. The freeze-drying process lasts 18, 24, 30 and 36 hours and measures the final masses, comparing their percentage weight loss in relation to the initial masses and the average consumption in W/h. Energy consumption and the estimated time needed to reach the level of 30.00% dry matter, considered ideal for dehydrating tilapia fillets according to Fellows (2006), were evaluated. A comparison was made between the energy consumption of an upright freezer for domestic use and the estimated energy consumption to freeze-dry the equivalent mass of tilapia fillets that can be stored and preserved in the upright freezer. As the main result of the comparative study, it was found that the estimated energy consumption for the freeze-drying process would only have advantages after 0.96 years (350 days) of product storage, for the mass of the batch of tilapia fillets of 2 .5 kg subjected to freeze-drying. The worst result in the freeze-drying process is 1.67 years (611 days) for the batch of tilapia fillets with an initial mass of 1.5 kg, when compared to the vertical freezer. This comparison is only based on energy consumption, not considering other factors, such as lower mass and volume of freeze-dried fillets, storage area and maintenance of the upright freezer.

Keywords: Freezing Nile tilapia fillets. Dehydrating tilapia fillets.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL....8
2 OBJETIVO....11
3 ESTUDO 1....12
4 INTRODUÇÃO....15
5 MATERIAL E MÉTODOS....18
5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E MATÉRIA-PRIMA....18
5.2 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DOS FILÉS DE TILÁPIA....20
5.3 REGISTRO DO CONSUMO ENERGÉTICO....22
5.4 REGISTRO DAS TEMPERATURAS....22
6 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO 23
6.1 CONTROLADOR ELETRÔNICO *ENERGY LOG PLUS*....23
6.2 CONTROLADOR E INDICADOR DIGITAL MT-512E LOG....24
6.3 CONGELADOR VERTICAL COM TÚNEL CONGELAMENTO *BLAST CHILLER* 230L....24
6.4 SONDA ESPETO....25
6.5 SENSOR SB19 (*ROLLER BAG*)....25
6.6 MANIFOLD....26
7 ETAPAS DO CONGELAMENTO....27
8 ANÁLISE TEÓRICA DOS DADOS....28
9 RESULTADOS....31
10 DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS....34
11 CONCLUSÃO....39
12 REFERÊNCIAS....41
13 ESTUDO 2....42
14 INTRODUÇÃO....45
15 MATERIAL E MÉTODOS....47
15.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E MATÉRIA-PRIMA....47
15.2 PROTÓTIPO DE LIOFILIZADOR....50
15.3 PROCESSO DE LIOFILIZAÇÃO DOS FILÉS....52
15.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROTÓTIPO DE LIOFILIZADOR VERTICAL....59

15.5 MÉTODO PARA ANÁLISE DOS DADOS 61
16 RESULTADOS.....62
17 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO 70
18 CONCLUSÃO 71
19 REFERÊNCIAS.....74
20 CONCLUSÕES FINAIS 75
21 REFERÊNCIAS.....77

1 INTRODUÇÃO GERAL

Em virtude das melhorias em maquinários, fertilizantes e tecnologias, agricultura nacional impulsionou o aumento na produção, o qual, aliado ao desenvolvimento, tem instigado perspectivas e desafios que evidenciam a necessidade de aprofundar pesquisas que gerem novas oportunidades. Dentre os processos inovadores, pode-se destacar, em primeiro plano, os de produção e, em segundo plano, o desenvolvimento de novos produtos e equipamentos inovadores que possam chegar ao consumidor final em condições de consumo e em valor agregado desejado. Ambas as preocupações estão estreitamente ligadas à eficiência e às possibilidades da atividade agrícola e dependem de uma interação entre fatores e agentes que compõem um sistema integrado e coeso para potencializar ações que mitiguem as perdas. Esse sistema deve evoluir paralelamente ao avanço tecnológico e às questões de sustentabilidade (Batalha; Souza Filho, 2005).

À medida que ao acesso à educação é universalizado e, em paralelo, a renda e a qualidade de vida dos brasileiros melhoram, os agricultores passam a encontrar, recorrentemente, dificuldades com mão de obra no campo. Concomitantemente, o aumento dos insumos e a necessidade de redução de desperdícios ampliam a sustentabilidade do processo produtivo, levando os agricultores a dependerem, cada vez mais, da mecanização e da automação dos processos agrícolas (Lopes; Contini, 2012).

Dentro de uma lógica de mercado, que nem sempre atende às preocupações ecológicas – que se amplificam nos debates contemporâneos – os processos produtivos, no tocante à conservação e à distribuição de alimentos, vêm passando por problemas estratégicos para atender o crescimento populacional mundial e equilibrar a produção. De um lado, há a preocupação e uma busca por encontrar e manter meios de ampliar os cuidados com a composição nutricional do alimento, por outro lado, é notório que o consumidor desconhece o processo de fabricação e conservação, questões ligadas à segurança alimentar (Lindon; Silvestre 2008), a qual, combinada à logística, busca, dentre outros fatores, a conservação dos alimentos.

A conservação está associada às condições das embalagens, às formas de acomodação, à temperatura mantida durante o transporte, ao tempo/distância e ao período em que pode manter o alimento antes do consumo. Há, desse modo, uma rede de fatores interligados que acabam demandando muito empenho para manter a

qualidade e baratear os custos, o que incide diretamente no problema do desperdício de alimentos que, quando combinado às perdas durante o processo produtivo, impacta nos preços (Marins, 2014). Atenta a isso, a Agenda 2030, ao propor os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável, ODS, propôs o objetivo 7.3, que aponta para a necessidade de “até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética” (AGENDA 2030, 2015).

Assim, reduzir o desperdício é uma necessidade ligada à busca por melhores resultados, o que envolve, por exemplo, a refrigeração, uma prática bastante comum, que procura manter as características físicas e químicas dos mais diversos tipos de alimentos. As aplicações do frio se destinam, em mais de 90%, ao setor alimentar, nomeadamente para arrefecimento e conservação de alimentos (Monteiro, 2016).

A conservação alimentar mais explorada no presente, principalmente por causa da praticidade dos processos da “cadeia do frio”, é aquela em que se mantem a temperatura dos alimentos em valores superiores aos de seu ponto de congelamento, prática conhecida como resfriamento a 0º e outras a -18ºC. Esse resfriamento retarda o crescimento e a proliferação de micro-organismos, mas, por outro lado, pode prejudicar a atividade metabólica dos tecidos animais e vegetais (Ordóñez Pereda, 2005).

O congelamento é uma prática cultural de alimentação já consolidada, no entanto, é válido recordar que há também outra prática de conservação largamente difundida: a desidratação, ou seja, a retirada de água dos alimentos. Dentre alguns exemplos de modos de desidratação dos alimentos, pode-se citar a exposição ao sol, a defumação, a salga, o aquecimento direto por calor, a radiação, realizada por lâmpadas infravermelhas ou radiadores de calor, a osmótica, que consiste na imersão dos alimentos em uma solução desidratante, a convecção, que é a passagem de ar quente sobre o alimento) e a liofilização, isto é, a desidratação por sublimação de um produto congelado, a qual é foco deste estudo (Vasconcelos, 2010).

A desidratação por meio do processo de liofilização surge como uma alternativa ao processo de congelamento, pois vem ao encontro das necessidades de manter a qualidade do produto sem a utilização de refrigeração após o processamento. Isso se deve, dentre outros fatores, ao fato de que a desidratação do produto, após o congelamento e a aplicação de vácuo, gera a sublimação, ou seja, a passagem da água do estado sólido para o gasoso, o que colabora para que se mantenham as características nutricionais dos alimentos, como as proteínas e as vitaminas. De

acordo com Costa (2007), após o processo de liofilização e a correta embalagem, o alimento permanece seguro e não é mais necessário deixá-lo sob refrigeração.

Essas características contribuem para tornar a liofilização um processo competitivo quando comparado ao de conservação sob refrigeração, visto que ambos necessitam de congelamento. Segundo estudos de Fellows (2006), após a desidratação e a correta embalagem, há uma diminuição do compromisso de manter o produto com equipamentos com acionamento elétrico e mecânicos para conservação na cadeia do frio. Partindo desse contexto e observando a condição de armazenamento dos produtos nos pequenos e médios produtores rurais, vislumbra-se um cenário de vantagens.

No caso dos produtores que processam sua produção em micro cooperativas ou ainda de forma particular, com certificação municipal, observa-se a vantagem de conseguir dar um destino diferenciado ao que produzem, ao invés de se limitarem aos “circuitos curtos de produção”, ou seja, as feiras, os programas de governo, as cestas de produtores rurais e a venda direta (Darolt, 2012).

Considerando esse panorama de vantagens e de necessidade de mudanças, este estudo parte da premissa comum de que a complexidade inerente aos problemas ambientais exige uma integração analítica de várias perspectivas. E é justamente nesse ponto que a tecnologia da liofilização se mostra como uma alternativa para sustentabilidade (Andrade, 2010).

Diante do contexto, esta pesquisa adotou como objeto de estudo o filé de tilápia, mais especificamente, a tilápia do Nilo, *Oreochromis niloticus*, a qual, segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO (2019), é a segunda espécie de pescado mais produzida em escala mundial, o que a torna uma importante atividade na disponibilidade de proteína de origem animal para consumo humano. Trata-se de uma espécie propícia à produção devido a características como as fases de desenvolvimento, fácil manejo e adaptação a sistemas intensivos e reprodução facilitada (Furuya, 2010). Após melhoramento genético e beneficiamento em escala industrial, a tilápia do Nilo passou a ter ótima aceitabilidade por parte consumidor quando comparada a outras espécies cultiváveis (Boscolo *et al*., 2001; Souza, 2002; Simões et al., 2007).

2 OBJETIVO

Realizar um experimento comparativo, envolvendo, no primeiro momento, o congelamento e, no segundo, a liofilização de filés de tilápia, sem couro e sem espinhas, para identificar qual método de conservação é mais sustentável em termos de consumo de energia elétrica.

Os objetivos do primeiro estudo foram os de avaliar o consumo energético no processo de congelamento de filés de tilápia do Nilo em um congelador vertical, usando fluído refrigerante Freon R404A e analisar o ciclo de congelamento em um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 203L, realizando a medição do consumo energético em diferentes pontos do congelador vertical.

O objetivo do segundo estudo é o de analisar o consumo energético durante o processo de liofilização de filés de tilápia em um liofilizador vertical. O intuito é comparar o consumo energético de um congelador vertical utilizado para armazenamento e conservação de alimentos, que necessita constantemente de energia elétrica, com a estimativa de consumo energético equivalente para liofilizar a mesma massa filés de tilápia, que após a liofilização, não necessitará de refrigeração.

Ao avaliar os custos de congelar e liofilizar o filé de tilápia, abre-se a possiblidade de sair dos circuitos curtos de produção, ou seja, pesca e venda do pescado, alavancando uma nova alternativa para o produtor rural.

3 ESTUDO 1

ENERGIA CONSUMIDA PELO FREEZER VERTICAL NO CONGELAMENTO DE FILÉS DE TILÁPIA DO NILO COM FLUÍDO REFRIGERANTE FREON R404A

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de um congelador vertical de aplicação comercial no congelamento de filés de tilápia do Nilo. Para tanto, foi utilizado um congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L e fluído refrigerante Freon R404A. O experimento foi realizado em uma câmara de testes, controlando e monitorando a temperatura e o consumo energético no processo de congelamento. Com base nos dados obtidos, foi avaliado o ciclo de congelamento dos filés de tilápia no que tange ao desempenho e aos testes experimentais, para os quais foram utilizados três lotes de filés de tilápia, cada qual com massas de 18,29 kg, 19,94 kg e 21,38 kg, totalizando um lote de 59,61 kg de filés sem espinhas e sem couro. Não houve uma classificação precisa em termos de massa e dimensão de cada filé de tilápia, mas foram medidas as variações de potência consumida em relação aos tempos do ciclo de congelamento, assim como as variações de calor latente e sensível durante todo o processo. Na execução do experimento com os lotes de filés de tilápia, obtiveram-se três valores de potência média consumida: 291,87 (W/h)/kg para a massa de 18,29kg, 350,22 (W/h)/kg para a massa de 19,94kg e 327,50 (W/h)/kg para a massa de 21,38kg. O consumo energético, em termos absolutos, está relacionado à quantidade de massa, isto é, maior massa, maior consumo energético, e ao tempo de permanência nas regiões de calor sensível e calor latente. O tempo de permanência na região de calor latente foi o maior responsável pelo consumo energético durante o ciclo de congelamento e o posicionamento da sonda espeto em diferentes pontos do congelador vertical, impactou na medição da temperatura interna dos filés de tilápia. Tal fato merece atenção e um estudo futuro sobre a distribuição do ar refrigerado no congelador vertical ou outras variáveis que possam ter afetado o desempenho, mas que não foram identificadas neste estudo.

Palavras-chave: Congelador vertical. Consumo energético. Congelamento de filés de tilápia do Nilo. Fluído refrigerante Freon R404A.

ABSTRACT

The purpose of the study was to evaluate the performance of a commercial vertical freezer for freezing Nile tilapia fillets. For to this, a vertical freezer with a Blast Chiller 230L freezing tunnel was used with Freon R404A refrigerant. The experiment was carried out in a test chamber under control and monitoring of temperature and energy consumption in the freezing process. Based on the data obtained, the freezing cycle of tilapia fillets was evaluated. To evaluate performance and experimental tests, three batches of tilapia fillets were used. The batches of tilapia fillets contained masses of 18.29 kg, 19.94 kg and 21.38 kg, totaling the mass of the batch at 59.61 kg, of fillets without bones and skin. There was no precise classification in terms of mass and size of each tilapia fillet. The variations in power consumed in relation to the freezing cycle times were measured, as well as the variations in latent and sensible heat throughout the process. When carrying out the experiment with batches of tilapia fillets, three values of average power consumed were obtained: 291.87 (W/h)/kg for the mass of 18.29 kg, 350.22 (W/h)/kg for the mass of 19.94kg and 327.50 (W/h)/kg for the mass of 21.38kg. Energy consumption, in absolute terms, is related to the amount of mass (greater mass, greater energy consumption) and the time spent in the regions of sensible heat and latent heat. The residence time in the latent heat region was largely responsible for energy consumption during the freezing cycle. The positioning of the skewer probe at different points in the vertical freezer impacted the measurement of the internal temperature of the tilapia fillets. This is a fact that deserves attention and a future study on the distribution of refrigerated air in the vertical freezer or other variables that may have affected performance but were not identified in this study.

Keywords: Upright freezer. Energy consumption. Freezing of Nile Tilapia fillets. Freon refrigerant R404A.

4 INTRODUÇÃO

A associação entre segurança alimentar e logística, busca, em essência, a conservação dos alimentos, a qual, dentre outros modos, é mais comumente operada pela refrigeração, que procura manter as características físicas e químicas dos mais diversos tipos de alimentos. Essa prática está atrelada às condições de embalagens, forma de acomodação, temperatura mantida durante o transporte, tempo/distância e tempo de conservação antes do consumo e isso implica uma rede de fatores interligados que acabam demandando muito empenho para baratear os custos e manter a qualidade. Não obstante, essa cadeia de fatores incide diretamente em problemas de desperdício de alimentos que, quando associados aos elementos anteriores, terminam por aumentar os preços (Vasconcelos, 2010).

No que tange especificamente ao desperdício, preocupação constante na contemporaneidade, a Agenda 2030, ao apresentar os Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável, ODS, propôs, em seu objetivo 12.3: “até 2030, reduzir pela metade o desperdício de alimentos *per capita* mundial, em nível de varejo e do consumidor, e reduzir as perdas de alimentos ao longo das cadeias de produção e abastecimento, incluindo as perdas pós-colheita”.

Essa meta é significativa se analisada à luz dos problemas sociais e econômicos, haja vista que, segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* - FAO, cerca de 30% de tudo que é produzido no mundo anualmente é perdido ou desperdiçado, o que totaliza, aproximadamente, 1,3 bilhão de toneladas de alimentos não aproveitados, situação é diametralmente oposta aos objetivos da Agenda 2030 e às preocupações em torno da sustentabilidade. Tal fato é agravado quando se considera que essas perdas acontecem nas fases de produção, armazenamento e transporte, correspondendo a 54% do total (AGENDA 2030, 2015; FAO, 2017).

Embasando seu argumento nessa problemática, Monteiro (2016) ressalta que a condição de redução do desperdício está ligada à busca por melhores resultados e que “as aplicações do frio destinam-se, em mais de 90%, ao setor alimentar, nomeadamente para arrefecimento e conservação de alimentos”. Em face desse dado, também se evidencia o fato de dar maior importância para outro objetivo da ODS, a saber, o objetivo 7.3, que aponta para a necessidade de “até 2030, dobrar a

taxa global de melhoria da eficiência energética” (Monteiro, 2016; Agenda 2030, 2015).

Nesse contexto, a refrigeração desponta como alternativa, contudo, a aplicação do frio deve ser feita o mais breve possível após a colheita ou abate, pois o frio não restitui a qualidade perdida, somente mantem o alimento sadio. Considerando que a cadeia do frio não deve ser interrompida durante todo o tempo de conservação, necessitam-se equipamentos que possam garantir esse funcionamento ininterrupto, os quais requerem um fluído refrigerante de boas qualidades termodinâmicas (Vasconcelos, 2010), o qual absorve o calor de uma substância do ambiente a ser resfriado.

Apesar da diversidade de fluídos refrigerantes existentes no mercado, normalmente não há um que possua todas as propriedades desejadas, pois um fluído refrigerante considerado bom para uma determinada aplicação pode não ser recomendado para outra. Para que seja considerado bom, um fluído refrigerante deve reunir o máximo possível de qualidades aplicáveis a um determinado fim, dentre as quais, não ser tóxico, não ser corrosivo, não ser inflamável, não deteriorar ou atacar os alimentos caso haja vazamentos, não atacar a camada de ozônio, condensar a pressões moderadas, ter pequeno volume específico, evaporar a pressões acima da atmosférica, condensar a pressões moderadas, ter elevado calor latente de vaporização e ser quimicamente estável (Miller, 2008).

O fluído refrigerante Freon R404A, marca registrada da *Chemours Company TT*, é uma mistura de três componentes principais, R125, R134A e R143A, e é, basicamente, à base de hidrofluorcarboneto (HFC). Conhecido por sua capacidade refrigerante eficiente é amplamente utilizado em sistemas de ar-condicionado e de refrigeração comercial, como câmaras frigoríficas, sistemas de refrigeração industrial e congeladores. Possui uma capacidade de refrigeração significativa e bom desempenho em ampla faixa de temperatura e, além do fácil manuseio, não degrada a camada de ozônio (Monteiro, 2016).

Alguns fluídos naturais podem ser utilizados como fluídos refrigerantes, dentre eles, o CO_2 (fluído natural R744) e a amônia (fluído natural R717). Essa última, em comparação com o fluído refrigerante Freon R404A, pode apresentar diferenças em relação à toxicidade, empregabilidade e características construtivas dos equipamentos, gerando restrições de uso e fazendo com que seja recomendada para locais afastados de escolas, hospitais, edifícios públicos e áreas com grande

aglomeração de pessoas. Para utilizá-la, é necessário obter documentação enviada por órgãos fiscalizadores e sua operação deve ser supervisionada por uma equipe técnica especializada. Sua vantagem de uso reside, principalmente, no custo do fluído, especialmente em grandes instalações, e na eficiência em termos de volume quando comparado a fluídos sintéticos (Stoecker; Saiz Jabardo, 2002).

A condição de conservação de alimentos mais explorada na atualidade, principalmente devido à praticidade dos processos da “cadeia do frio”, é aquela em que se mantêm a temperatura dos alimentos em valores superiores aos de seu ponto de congelamento, prática conhecida como resfriamento a 0ºC e outras a -18ºC (Lindon, 2008).

O resfriamento retarda o crescimento e proliferação de micro-organismos, por outro lado, pode prejudicar a qualidade das células, afetando a textura, sabor e a qualidade dos tecidos animais e vegetais. Já o processo que aplica temperaturas abaixo de 0ºC em geral é denominado congelamento (Ordóñez Pereda, 2005) e é importante para preservar a qualidade de alimentos derivados de carne, além de prolongar o prazo de validade e garantir a segurança alimentar. No entanto, é essencial seguir boas práticas de congelamento e descongelamento para obter os melhores resultados no uso do alimento (Fellows, 2006).

O objetivo deste estudo é avaliar a eficiência energética do congelamento de filés de tilápia do Nilo em um congelador vertical usando fluído refrigerante Freon R404A. O estudo foi desenvolvido através de parceria do Grupo de Estudos de Manejo na Aquicultura (GEMAq) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) Campus Toledo, com a empresa Microempreendedor Individual (MEI) Leonardo Balcewicz Júnior e a empresa Zero Grau.

Como objetivos específicos apresentam-se:

a) Analisar o ciclo de congelamento em um congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L com fluído refrigerante Freon R404A;
b) Realizar medição de consumo energético do congelador vertical para o congelamento de três lotes de filés de tilápia;
c) Avaliar o comportamento do ciclo de congelamento das amostras acondicionadas em diferentes posições do congelador vertical.

A realização deste experimento pode colaborar com estudos que necessitem avaliar o consumo energético para o congelamento de filés de tilápia, como também a possibilidade de realizar o comparativo com outros equipamentos e outros fluídos refrigerantes, tendo como base um ambiente controlado e o fluído refrigerante Freon R404A.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E MATÉRIA-PRIMA

O estudo foi desenvolvido pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, através do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável, PPGDRS, no mês de agosto de 2021, em parceria com a empresa Zero Grau, de Nova Santa Rosa, Estado do Paraná, a qual concedeu o espaço e a câmara de testes (Figura 1) que permitiu o controle e o monitoramento de temperatura e o consumo energético no processo de congelamento, além de disponibilizar toda a estrutura física e equipamentos para manutenção dos procedimentos testes.

Figura 1. Local do experimento (câmara de testes) com congelador vertical com túnel de congelamento vertical *Blast Chiller 230L*.
Fonte: O autor.

Para efetivação deste estudo, os lotes com as amostras de filés foram obtidas por doação das empresas Frigorifico Sardella, da cidade de Toledo, Frigorífico Sereia também da cidade de Toledo, Cooperativa Copacol, da cidade de Nova Aurora e Cooperativa C.Vale, da cidade de Palotina. A massa nominal total fornecida de filés de tilápia foi de 59,61kg e foi determinada por conveniência de utilização do congelador vertical *Blast Chiller 230L*. Os filés foram fornecidos sem espinhas e sem couro. Posteriormente, as amostras foram novamente pesadas antes da realização dos testes experimentais.

A quantidade necessária de massa de filés de tilápia para os testes, fornecida pelas três empresas citadas, estavam resfriadas *in natura* e foram coletadas no mesmo dia do abate. Todos os filés foram transportados em caixas térmicas até o local do experimento (Figura 2) e saíram dos frigoríficos com temperatura variando entre +10ºC e +15ºC.

Foram formados três lotes, sendo que os filés de tilápia dos quatro frigoríficos foram misturados aleatoriamente. É importante ressaltar que os tamanhos, formatos e espessuras dos filés de tilápia variaram nos lotes, mesmo nas condições em que apresentavam a mesma massa inicial. Essa variação de tamanho do “corte”, no frigorífico se deve ao fato de que as tilápias tinham tamanhos diferentes. As amostras individuais dos filés de tilápia nos lotes tinham massa de 100 g a 300 g e as massas aproximadas de cada lote de diferentes tilápias tinham tamanhos diferentes (Figura 2).

Figura 2. Caixas térmicas para transporte e amostras de filés de tilápia.
Fonte: O autor.

Ao misturar aleatoriamente os filés de tilápia dos diferentes frigoríficos, tem-se a real situação do fornecimento ao mercado consumidor, pois pode ocorrer variação de massa ou dimensão em cada filé de tilápia. Posteriormente foi realizada uma seleção em termos de dimensão dos filés, que foram separados de modo a preencher cada uma das bandejas do congelador, com o total de massa, por lote, de aproximadamente 20 kg. Devido à variação das dimensões e massas dos filés de tilápia (Figura 3), para o preenchimento das bandejas, não se conseguiu manter a massa padrão dos lotes em 20 kg para cada um dos testes.

Figura 3. Filés de tilápia acomodados no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L.
Fonte: O autor.

Após a seleção dos filés de tilápia para preenchimento das bandejas, foram formados lotes com as massas de filés com 18,29 kg, 19,94 kg e 21,38 kg totalizando 59,61 kg. Houve uma variação de massa de 390 g entre a massa total nominal fornecida pelos frigoríficos e a massa total medida para os testes. Esta diferença se deve ao fato de que não houve precisão na pesagem por parte de alguns frigoríficos.

5.2 PROCEDIMENTO DE PREPARAÇÃO DOS FILÉS DE TILÁPIA

Os filés de tilápia foram acomodados separadamente, fora das embalagens, sobre um filme plástico nas bandejas de alumínio com Teflon, que, posteriormente,

foram inseridas no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 4).

Figura 4. Bandejas de acomodação dos filés de tilápia no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L. Sonda espeto na bandeja.
Fonte: O autor.

Antes de iniciar os testes, as amostras tiveram um pré-resfriamento no congelador vertical para nivelamento da temperatura inicial (+10ºC) do processo de congelamento. O pré-resfriamento padronizou a temperatura inicial de todas as amostras a serem submetidas a testes. O consumo energético do experimento foi mensurado sem levar em consideração o consumo energético do processo de pré-resfriamento.

Os filés de tilápia foram submetidos a testes no congelador vertical com a temperatura inicial de +10ºC após o nivelamento, finalizando em -30ºC. As temperaturas iniciais e finais dos 3 lotes foram medidas através da sonda espeto (Figura 8) nas amostras dos filés de tilápia já no congelador vertical (Figura 4).

5.3 REGISTRO DO CONSUMO ENERGÉTICO

O registro do consumo de energia no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 7) foi realizado através de um controlador eletrônico *Energy LOG Plus* da fabricante Full Gauge Controls (Figura 5), o qual possui um *data-logger* para registro das informações coletadas. O controlador eletrônico possui um *software* que possibilita o monitoramento e indica a qualidade e consumo de energia elétrica.

Além disso, conta com um relógio de tempo real e possui memória interna capaz de armazenar os valores medidos da rede elétrica em períodos de tempo determinados. No presente estudo, os registros do consumo energético do equipamento foram realizados em intervalos de um minuto e os dados do *data-logger* foram copiados para o computador para formar os gráficos de consumo energético e calcular as médias de consumo energético.

Foram avaliadas as variações de potência consumida em relação aos tempos de congelamento, assim como as variações de calor latente e sensível durante todo o processo de congelamento. Durante as fases de execução do experimento, o equipamento não registrou interrupções de fornecimento de energia elétrica na câmara de testes.

5.4 REGISTRO DAS TEMPERATURAS

O congelamento dos filés de tilápia foi realizado no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller 230L* (Figura 7), utilizando fluído refrigerante Freon R404A, com prateleiras e temperatura interna com possibilidade de chegar aos -40ºC. O registro da temperatura interna nos filés de tilápia durante o experimento foi realizado pelo controlador e indicador digital MT-512E LOG (Figura 6) e pelo sensor de temperatura na sonda espeto (Figura 8).

Para os experimentos, adotou-se como temperatura final de processo de congelamento -30ºC, medida no interior do filé de tilápia com sonda espeto, com a qual foram realizadas todas as temperaturas internas dos filés de tilápia no congelador vertical. O registro da temperatura interna da câmara de testes foi realizado por meio do controlador e indicador digital MT-512E LOG e sensor de temperatura SB19 (Figura 6).

No total, foram utilizados dois controladores MT-512E LOG para monitoramento das temperaturas: um para monitoramento da temperatura interna dos filés de tilápia e outro para registro da temperatura interna da câmara de testes.

A temperatura interna da câmara de testes, mesmo durante o congelamento, foi mantida na média de +20ºC para não ocorrerem interferências ambientais no processo. Esse isolamento de interferências externas do ambiente foi obtido com o ciclo termodinâmico no qual se realiza o experimento, pois o impacto da temperatura externa influencia na condensação do ciclo de refrigeração. O objetivo foi manter sob controle o ambiente de teste no qual se realizou o processo para permitir repetibilidade e a temperatura padrão para testes no experimento.

6 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO

6.1 CONTROLADOR ELETRÔNICO *Energy LOG Plus*

O Controlador eletrônico *Energy LOG Plus* (Figura 5) é fabricado pela *Full Gauge Controls* e é utilizado para monitoramento e indicação da qualidade e consumo de energia elétrica. Possui relógio de tempo real e memória interna capaz de armazenar os valores medidos da rede elétrica em períodos de tempo determinados pelo usuário.

Através do método de medição de tensão e corrente *True-RMS*, indica a potência ativa, reativa e aparente, bem como o fator de potência e frequência da rede elétrica.

Figura 5. Energy LOG Plus.
Fonte: https://www.fullgauge.com.br/produto-energylog-plus

6.2 CONTROLADOR E INDICADOR DIGITAL MT-512E LOG

O Controlador e indicador digital MT-512E LOG (Figura 6) é fabricado pela *Full Gauge Controls* e é utilizado para monitoramento e indicação da temperatura. Possui memória interna para armazenamento de dados (*data-logger*), permitindo a gravação da temperatura medida em intervalos determinados pelo usuário.

Figura 6. MT-512E LOG
Fonte: https://www.fullgauge.com.br/produto-mt-512e-log

6.3 CONGELADOR VERTICAL COM TÚNEL CONGELAMENTO *Blast Chiller* 230L

Congeladores com túnel de congelamento do tipo *Blast Chiller* são equipamentos desenvolvidos para rapidamente baixar a temperatura dos alimentos. Normalmente, têm grande capacidade frigorífica em relação à estrutura física do equipamento e alta circulação de ar para favorecer a troca de calor entre o produto e o fluído refrigerante que faz a troca térmica (Monteiro, 2016).

O equipamento foi cedido gentilmente para os testes pela empresa Zero Grau LTDA. e possui 11 bandejas removíveis em uma câmara refrigerada através de ar forçado, cuja temperatura interna chega a -40ºC em cerca de 30 minutos, transferindo essa temperatura mais rapidamente aos produtos e os resfriando até o seu congelamento.

O gabinete é fabricado em aço inoxidável AISI 304, tem capacidade para 230 litros e pesa 184 kg. Suas dimensões são as seguintes: altura 179 cm, largura 80 cm e profundidade de 80 cm. Trabalha na tensão de 220 V/60 Hz e a potência é 2400 W e utiliza o isolamento térmico PIR 70 mm, fluído refrigerante Freon R404A 2000g e a refrigeração é através de ar forçado. O controle de funcionamento e temperatura é feito pelo *Digital Controller for medium-low temperature* fabricado pela Dixell Emerson, modelo XB570L.

Figura 7. Congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L.
Fonte: https://zerograu.com/produto/blast-chiller-230/

6.4 SONDA ESPETO

A sonda espeto (Figura 8) é um acessório fornecido juntamente com o congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 7) que permite medições de temperatura de -50ºC a +150ºC (sonda PTC – *Positive Temperature Coeficient*). Foi utilizada para medição da temperatura interna dos filés de tilápia.

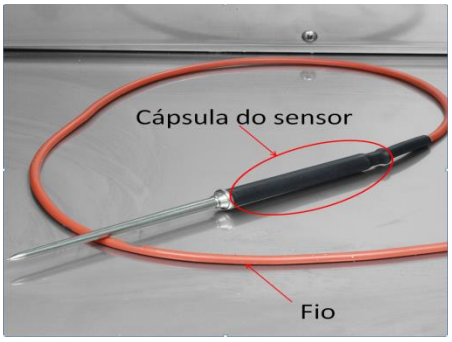


Figura 8. Sonda espeto.
Fonte: https://zerograu.com/produto/blast-chiller-230/

6.5 SENSOR SB19 (*Roller Bag*)

O sensor de temperatura SB19 (Figura 9) é revestido por uma cápsula de aço inoxidável AISI 316L, com conformação a frio sobre luva de silicone, proporcionando total vedação, oferecendo robustez e proteção contra radiações. É também resistente à água (https://www.fullgauge.com.br/produto-roller-bag-sensor-sb19).

O sensor permite medições de temperatura de -50ºC até 105ºC. Foi utilizado para medição da temperatura da câmara de testes.

Figura 9. Sensor SB19
Fonte: https://www.fullgauge.com.br/produto-roller-bag-sensor-sb19

6.6 MANIFOLD

O Manifold é um aparelho utilizado para medir a pressão do gás de equipamentos que trabalhem com níveis de pressão de fluídos refrigerantes e possui dois manômetros e para medir a pressão dos principais fluídos refrigerantes, tais como os fluídos refrigerantes Freon R404A e R410A (Figura 10).

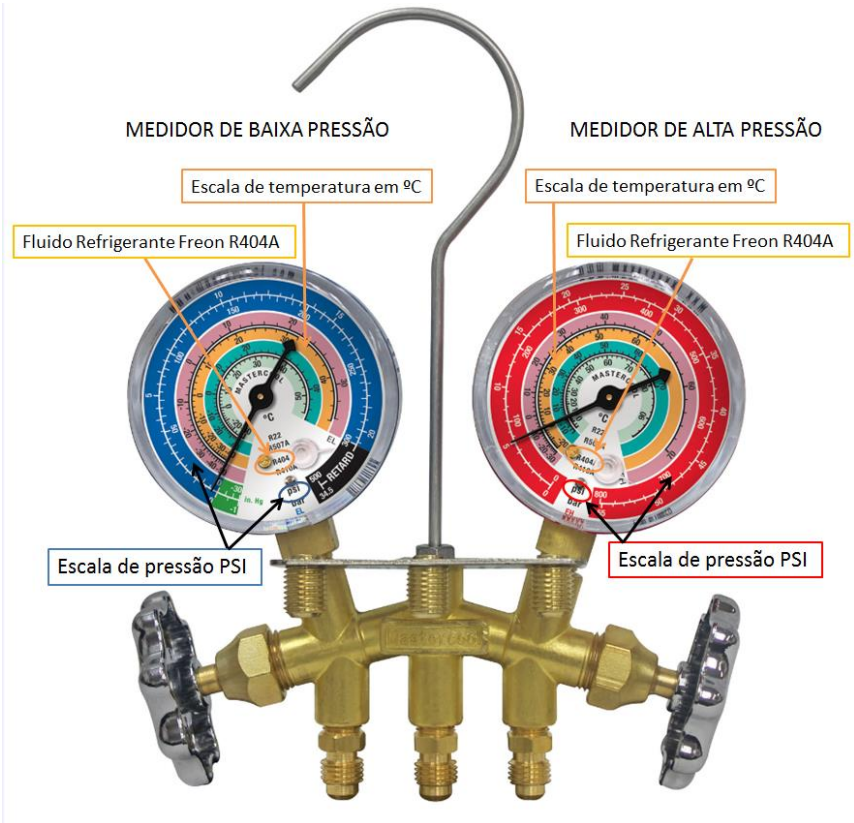


Figura 10. Manifold 33636-E: R410A, R507, R404A, R22 (gauge p/n EH-EL) com mangueiras de 3-90 cm.

Fonte:https://www.mastercool.com/product/manifold-de-latao-de-2-vias-valvulas-pistao-diametro-63-mm/?lang=pt-pt

O Manifold é, normalmente, conectado às válvulas de serviço Schrader para medição das pressões nos circuitos de alta e baixa pressão dos equipamentos (Figura 11).

Figura 11. Válvulas de serviço Schrader
Fonte: https://www.distriar.com.br/acessorios/valvula-de-servico-para-condensadora-14-suryha

7 ETAPAS DO CONGELAMENTO

O congelamento de filés de peixe é o processo físico que envolve a transformação da água presente nos tecidos do peixe em gelo. Trata-se de uma etapa crítica no armazenamento, pois ajuda a preservar a qualidade e a segurança alimentar através da redução de atividade da água ou da disponibilidade de água para ocorrência de oxidação e desenvolvimento de micro-organismos, além de reduzir a temperatura a condições em que as reações químicas e físicas são inibidas (Fellows, 2006).

O tempo de congelamento dos alimentos tem três etapas bem características (Silva, 2013):

- Pré-congelamento: inclui o resfriamento do produto até o início do congelamento;
- Estágio de congelamento: nesta etapa, a temperatura altera em função da mudança de estado da água: à medida que a água congela, menor será a temperatura para continuar o congelamento;

- Equilíbrio: Convertida a água em gelo, a temperatura final, em qualquer parte do produto, será a mesma, inclusive o centro térmico do produto. Normalmente esta será a temperatura na qual o produto será estocado.

O calor sensível e o calor latente são duas formas distintas de transferência de calor que desempenham papéis essenciais em um processo de congelamento (Silva, 2003). O primeiro é a forma mais comum de transferência de calor e ocorre quando há uma mudança de temperatura de uma substância sem mudança de fase. É o calor trocado quando se aquece ou resfria uma substância e ela permanece no mesmo estado físico. A quantidade de calor sensível é diretamente proporcional à massa e à composição química da substância, à capacidade calorífica da substância e à mudança de temperatura (SILVA, 2003).

Já o calor latente é uma quantidade de calor trocada durante uma mudança de fase de uma substância, como a fusão ou vaporização, sem alteração na temperatura e ocorre durante a mudança de fase, quando a energia é usada para alterar a organização molecular da substância em vez de aumentar a temperatura (Silva, 2003). Portanto, o calor sensível está relacionado às mudanças de temperatura, enquanto o calor latente está relacionado às mudanças de fase, sem alteração de temperatura.

A capacidade calorífica ou capacidade térmica (C) é uma grandeza que corresponde à quantidade de calor sensível presente em um corpo em relação à variação de temperatura sofrida por ele. Sua unidade usual é cal/ºC, na qual cal corresponde à caloria, significando que ao receber ou ceder calorias, sua temperatura variará em 1ºC (Silva, 2003).

8 ANÁLISE TEÓRICA DOS DADOS

As propriedades termodinâmicas dos fluídos refrigerantes, além de tabelas, podem ser representadas por diagramas., dentre os quais, o diagrama Pressão-Entalpia é o mais utilizado para relacionar as propriedades termodinâmicas dos fluídos refrigerantes.

O diagrama de Mollier é representado pela pressão (p) e a entalpia (h), e mostra as fases do fluído refrigerante e as respectivas temperaturas durante o ciclo teórico na situação de equilíbrio líquido-vapor (Stoecker, 2002).

O software CoolPack, utilizado para geração do diagrama de Mollier neste estudo é uma coleção de modelos de simulação para sistemas de refrigeração. Cada modelo tem um objetivo específico, tal como: análise de ciclo térmico, dimensionamento de componentes principais, análise de energia e aperfeiçoamento de sistemas de refrigeração. Foi desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Mecânica, Setor de Energia Térmica (TES) na Universidade da Dinamarca (DTU) e a versão utilizada neste estudo foi a v1.4.6 (https://www.ipu.dk/products/coolpack/).

A Figura 12 mostra o diagrama de Mollier para fluído refrigerante Freon R404A. Analisando o diagrama de Mollier, percebe-se a existência de três regiões distintas (Stoecker, 2002):

a) região à esquerda da linha de líquido saturado (X=0), denominada de região de líquido subresfriado;

b) região entre as linhas de líquido saturado (X=0) e vapor saturado (X=1), denominada de região de vapor úmido ou região de líquido mais vapor, na qual está grande parte do ciclo de refrigeração;

c) região à direita da linha de vapor saturado (X=1), denominada de região de vapor superaquecido.

Entre os possíveis ciclos de refrigeração, o Ciclo de Carnot se destaca por ser um ciclo ideal, reversível, operando entre dois níveis de temperatura, que apresenta a maior eficiência. Apesar de ser um ciclo ideal, ou seja, não pode ser realizado na prática, há algumas justificativas para seu uso:

- É um meio relativamente simples de avaliação da influência das temperaturas de operação;
- Representa o limite máximo de eficiência de operação de um ciclo entre dois níveis de temperatura. Deste modo, qualquer ciclo real operando entre os mesmos níveis de temperatura, apresentará uma eficiência inferior ao Ciclo de Carnot (Stoecker, 2002).

Na Figura 12, o ciclo de refrigeração para o fluído refrigerante Freon R404A, para a situação proposta, manter o regime de temperatura de +32ºC/-45ºC, compreende a área interna da figura geométrica formada pelos seguintes segmentos de reta: evaporação, t constante; compressão, s constante; condensação, t constante e expansão, s constante.

A simulação do comportamento do fluído refrigerante demonstra a possibilidade de sua execução no ciclo de refrigeração, pois se trata de um circuito de refrigeração fechado e de recirculação constante (Stoecker, 2002).

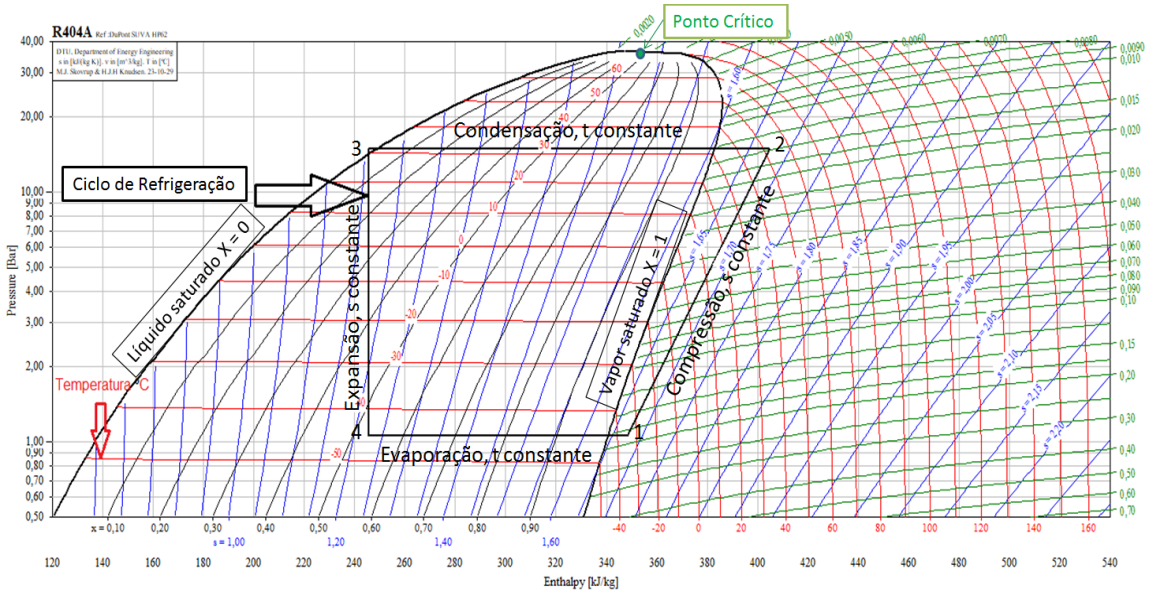


Figura 12 – Diagrama de Mollier do fluído refrigerante Freon R404A.
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *Software* Coolpak e informações complementares adicionadas.

O congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L foi projetado para trabalhar com o fluído refrigerante Freon 404A e nas condições de temperatura propostas: evaporando a -45ºC e condensando a +32ºC. Já a temperatura interna do ar, que faz a transferência de calor na câmara de congelamento, está programada para chegar até -40ºC no experimento. Esta condição garante que os alimentos cheguem o mais breve possível à mudança de fase: temperatura ambiente/congelado.

A eficácia de um ciclo de refrigeração é dada pelo Coeficiente de *Performance* (COP) ou Coeficiente de Eficácia. Normalmente é definida como a relação entre a energia útil e a energia que é gasta para o efeito de refrigeração desejado e, por se tratar de uma relação entre duas grandezas de energia, é um valor adimensional, que serve como valor de referência ou de comparação entre medidas correlacionadas que tenham sido realizadas (Stoecker, 2002).

Segundo Silva (2013), o Coeficiente de *Performance* (COP), na condição teórica, demonstra o rendimento do equipamento sob um regime de trabalho. Na condição do experimento, o fluído Freon R404A evaporando a -45ºC e condensando a +32ºC.

No equipamento utilizado no experimento, o rendimento teórico, COP é de 1,81 (Figura 13, item COP), ou seja, 1,81 é a relação entre a energia útil produzida no evaporador e a energia utilizada para funcionamento do sistema.

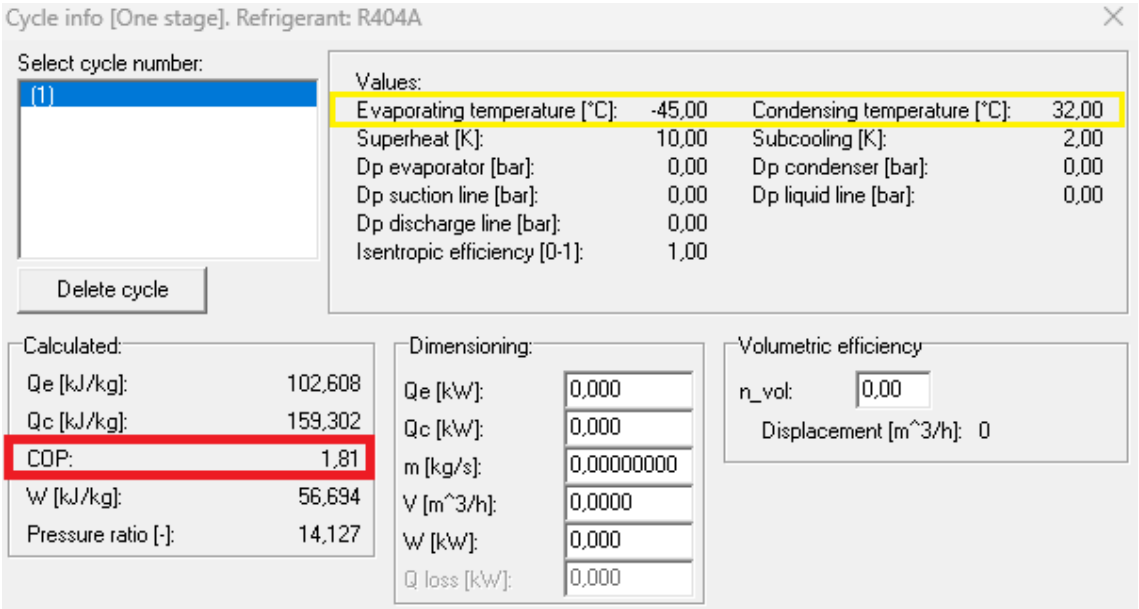


Figura 13 – Tabela de aplicação da Unidade de Refrigeração.
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do *Software* Coolpak.

9 RESULTADOS

A execução deste estudo permitiu avaliar o comportamento do processo de congelamento utilizando o congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller (Figura 7). Foram mensuradas as oscilações de temperatura ambiente e temperatura interna dos filés de tilápia e potências consumidas em tempo real, em função do tempo e das massas utilizadas no processo de congelamento, conforme a Figura 14, experimento de lotes com massas de 18,29kg, 19,94kg e 21,38kg.

Pode-se perceber na Figura 14 o comportamento do calor latente e sensível, assim como o comportamento das variações de potência consumida, tempo e temperaturas no processo de congelamento dos filés de tilápia, em relação às diferentes massas utilizadas. A região indicada pela área A está se referindo ao calor sensível, a região B, ao calor latente e a C, novamente ao calor sensível.

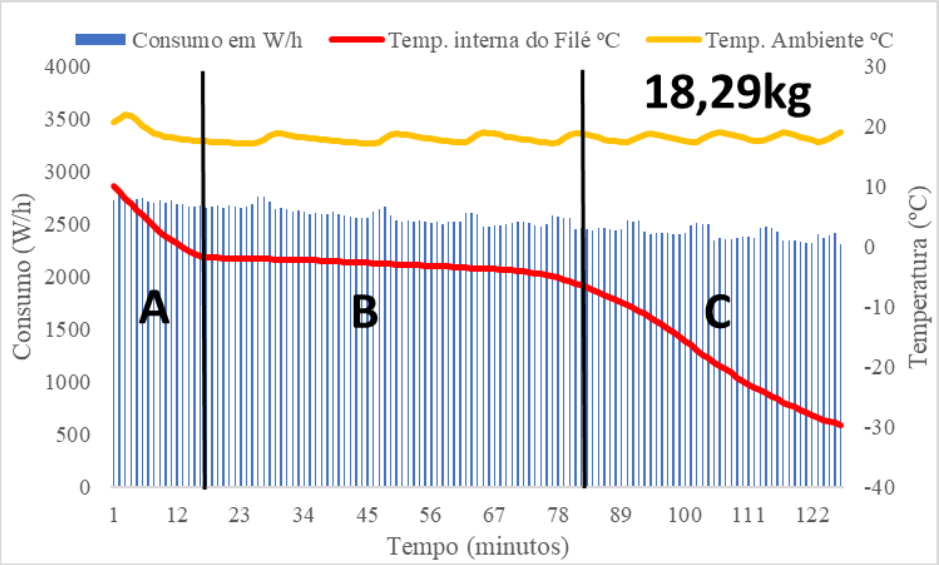
A quantidade de calor sensível (regiões A e C) é proporcional à capacidade calorífica da substância, à massa e à mudança de temperatura e esse evento pode ser observado nas linhas vermelhas dos gráficos da Figura 14, com o resultado dos

processos no congelamento dos filés de tilápia, tanto do lado esquerdo (região A), quanto direito (região C), dos traços verticais na cor preta, ressaltando as mudanças de temperaturas.

O calor latente (região B) é uma quantidade de calor trocada durante uma mudança de fase de uma substância, sem alteração na temperatura e pode ser caracterizado nos gráficos da Figura 14 (região B), pelo segmento entre os dois traços verticais na cor preta, no qual se percebe que há pouca variação da temperatura.

A potência consumida durante o processo de congelamento dos filés de tilápia foi mensurada utilizando o controlador eletrônico *Energy LOG Plus* (Figura 5) e está indicada pela escala vertical à esquerda, na Figura 14, na qual as linhas verticais azuis mostram a variação em tempo real. A temperatura ambiente, referente à temperatura da câmara de testes, foi monitorada pelo controlador e indicador digital MT-512E LOG (Figura 6) e oscilou entre 19ºC e 21ºC ao longo do processo, mantendo-se na média de +20ºC. O sensor SB19 (Figura 9) foi responsável por fornecer os valores das temperaturas ao controlador e indicador digital MT-512E LOG. As oscilações da temperatura ambiente são indicadas pelas linhas amarelas nos gráficos da Figura 14.

A câmara de testes (Figura 1) foi regulada para manter a temperatura em +20ºC, compensando eventuais aumentos ou diminuições de temperatura, através do acionamento do sistema de refrigeração pertencente a ela.



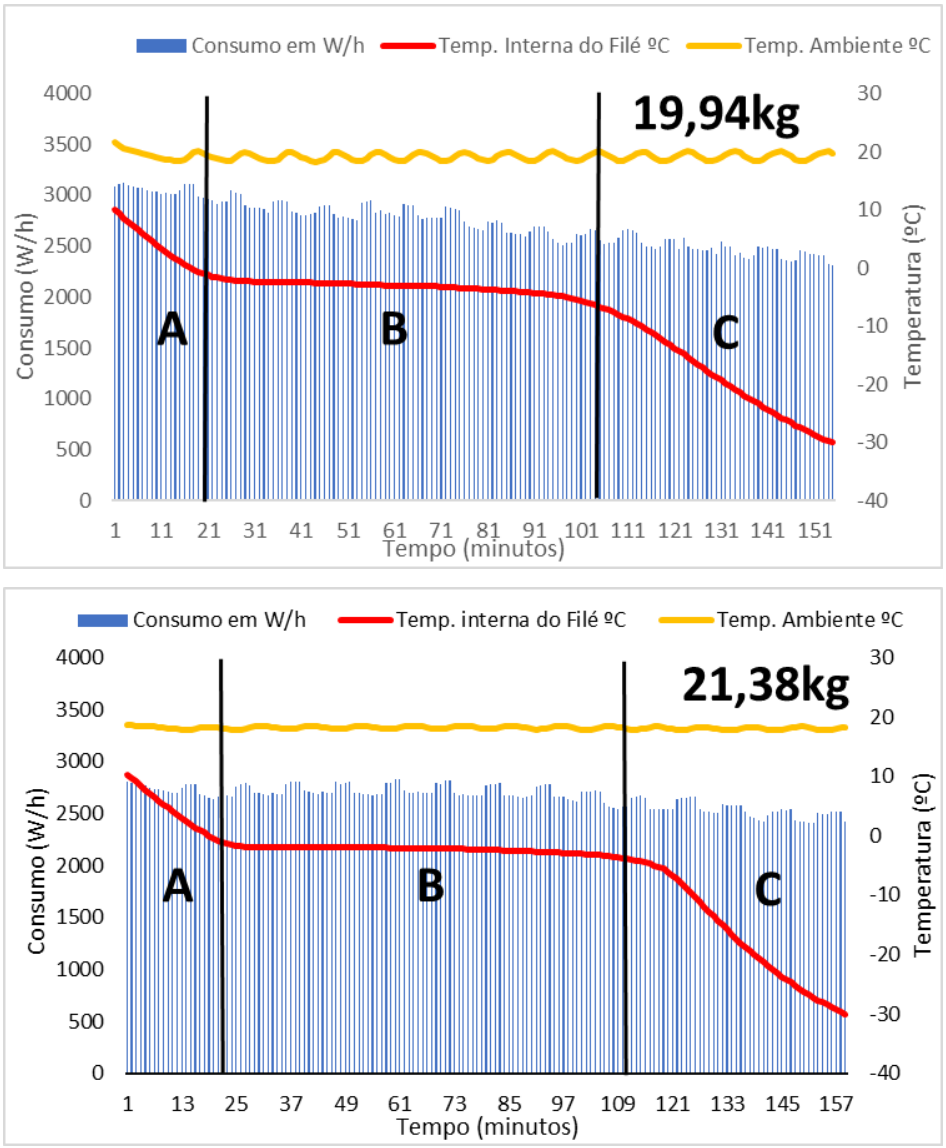


Figura 14. Resultado dos processos no congelamento dos filés de tilápia com diferentes massas. (A) região do calor sensível, (B) região do calor latente e (C) novamente calor sensível.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O congelamento inicial de todos os filés de tilápia foi realizado sem embalagem (Figura 3) e o fato de terem sido congelados em uma superfície plana e estarem acomodados de maneira uniforme nas prateleiras proporcionou uma maior área de contato com a superfície das bandejas (Figura 3).

O controle da temperatura interna do congelador vertical foi realizado pelo controlador eletrônico da Dixell Emerson, modelo XB570L, interno ao congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 7). Já o monitoramento da temperatura interna dos filés de tilápia, feito pelo controlador e indicador digital MT-512E, foi realizado desde a temperatura inicial de +10ºC até a temperatura final de -

0ºC, e está indicado na escala vertical à direita na Figura 14, onde a linha vermelha mostra a variação em tempo real.

A sonda espeto (Figura 8) contém o sensor responsável por fornecer o valor da temperatura dos filés de tilápia ao controlador e indicador digital MT-512E LOG e foi inserida nos filés de tilápia para obter a temperatura interna real durante o processo de congelamento. A escolha de sua posição na gaveta foi determinada pelo fato de estar mais distante do início do fluxo de ar refrigerado e mais próxima da porta do congelador. Os filés de tilápia nestas posições nas gavetas foram os últimos a completarem o ciclo de congelamento.

Durante o ciclo de congelamento de cada lote dos filés de tilápia, foram medidas as pressões altas e baixas nos circuitos de refrigeração do congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller (Figura 7). O congelador vertical tem uma válvula específica para o circuito de alta pressão e outra para o circuito de baixa pressão. O instrumento de medição de pressão, Manifold (Figura 10), foi conectado às válvulas de serviço Schrader (Figura 11), localizadas na parte inferior do congelador vertical. A medição com o Manifold, nos circuitos de alta e baixa pressão do congelador vertical, permitiu a coleta de informações das pressões.

Conforme a Figura 10, no Manifold, para os valores medidos de pressão, há correspondência com as temperaturas. Fazendo a correlação entre a pressão e a temperatura, foi realizado o monitoramento para certificação de que o congelador vertical, com túnel de congelamento Blast Chiller, estivesse operando dentro das condições projetadas para seu funcionamento com o fluído refrigerante Freon R404A (temperaturas de +32ºC/-45ºC).

O controle da temperatura permitiu que a estrutura física dos filés de tilápias fosse preservada, o processo de congelamento tivesse uma evolução gradativa e que houvesse uma forma fácil de visualização de seu término (processo de congelamento) em -30ºC (medida no interior do filé de tilápia com sonda espeto), através do display do controlador e indicador digital MT-512E LOG (Figura 6).

10 DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O diagrama de Mollier do fluído refrigerante Freon R404A (Figura 12), obtido através do software Coolpack, foi utilizado como base para determinação das

temperaturas para execução do ciclo de refrigeração, quando se manteve o regime de temperaturas entre +32ºC e -45ºC, no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 7).

Como o congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller*, usando o fluído refrigerante Freon R404A, foi projetado para trabalhar com temperaturas entre +32ºC e -45ºC foi realizado o monitoramento com o Manifold para certificação de que a condição operacional estava sendo mantida.

A temperatura interna no congelador vertical pode chegar a -40ºC, ou seja, há possibilidade de variar entre +3ºC e -40ºC. Também, segundo Stoecker (2002), como o sistema sob teste é um circuito de refrigeração fechado e de recirculação constante, há possibilidade de sua execução. Segundo Silva (2003), o COP (coeficiente de *performance*) demonstrará o rendimento do equipamento (relação entre energia útil e energia utilizada) sob o regime de trabalho proposto, evaporando a -45ºC e condensando a +32ºC.

Na situação proposta de dimensionamento do ciclo de refrigeração, o COP teórico, calculado pelo software Coopack (Figura 13 - COP) foi 1,81, ou seja, é a relação entre a energia útil produzida no evaporador do congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L e a energia utilizada para execução do ciclo de congelamento proposto (temperatura interna dos filés de tilápia iniciando em +10ºC e finalizando em -30ºC).

O experimento foi dimensionado para a utilização do fluído refrigerante Freon R404A, operando no ciclo de refrigeração entre as temperaturas de +32ºC/-45ºC (Figura 12), o congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller* 230L (Figura 7) operando entre as temperaturas internas de +3ºC/-40ºC, possibilitou a execução do ciclo de congelamento entre as temperaturas internas de +10ºC/-30ºC nos filés de tilápia (Figura 14).

A Figura 14 demonstra o resultado do processo de congelamento dos filés de tilápia para as condições do experimento. Apesar da diferença de massa entre os lotes de filés de tilápia, o comportamento da temperatura interna dos filés de tilápia foi similar, existindo regiões de calor sensível (Figura 14, regiões A e C) e calor latente (Figura 14, região B).

Conforme Silva (2003), a quantidade de calor sensível (Figura 14, regiões A e C) é proporcional à capacidade calorífica da substância, à massa e à mudança de temperatura. Ao analisar-se a Figura 14, foi perceptível o comportamento do calor

sensível. Em termos de massa, verificou-se a relação entre ela e o calor sensível: quanto maior a massa, maior o tempo de permanência na região de calor sensível.

Segundo Silva (2003), calor latente é uma quantidade de calor trocada durante uma mudança de fase de uma substância, na qual a energia é usada para alterar a organização molecular da substância ao invés de aumentar a temperatura. Essa situação é caracterizada na Figura 14, região B, em que houve pouca variação de temperatura e o líquido no interior dos filés de tilápia solidificou.

A Figura 15 mostra a relação de grandeza do comportamento do ciclo de congelamento dos lotes de filés de tilápia quanto à permanência do tempo em cada uma das regiões de calor sensível e calor latente. Nas Colunas A e C, estão representados os tempos em minutos em que os lotes de filés de tilápia de massas 18,20 kg, 19,94 kg e 21,38 kg, com respectivas temperaturas em graus Celsius, permaneceram na região de calor sensível. Na coluna B, os tempos em que os lotes permaneceram na região de calor latente e temperaturas, também em graus Celsius.

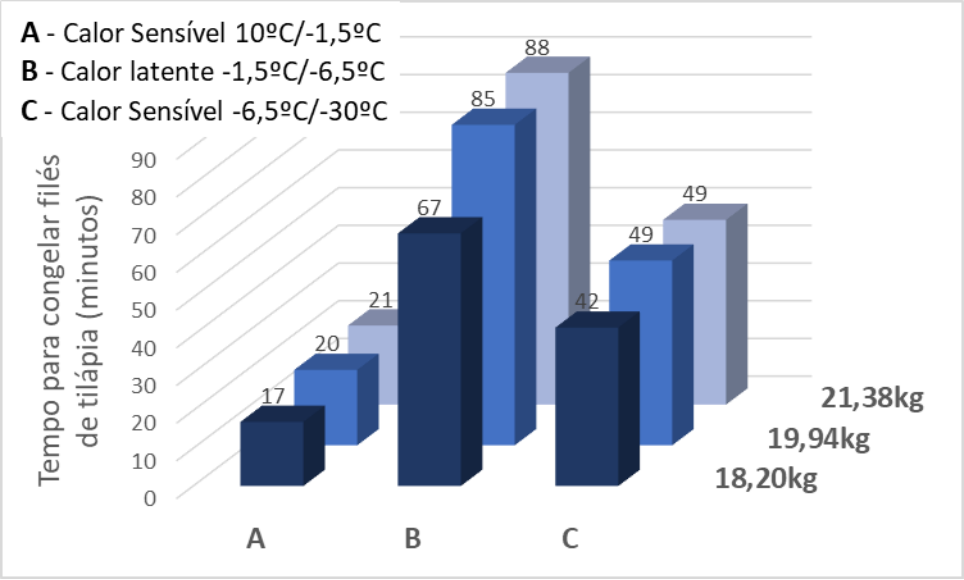


Figura 15. Tempo em minutos nas regiões de calor sensível (regiões A e C) e calor latente (região B) e temperaturas em graus Celsius para o ciclo de congelamento dos lotes de filés de tilápia com massas de 18,29kg, 19,94kg e 21,38kg.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O tempo em que cada lote dos filés de tilápia permaneceu nas regiões de calor sensível e calor latente (Figura 15) foi determinante para o consumo de energia, impactando na potência média consumida durante cada ciclo de congelamento. A região de calor latente é a que mais contribuiu para a duração do ciclo congelamento e, por consequência, a maior responsável pelo consumo de energia.

Na execução do experimento com os lotes de filés de tilápia, obteve-se três valores de potência média consumida (Figura 16): 291,87 (W/h)/kg para a massa de 18,29kg, 350,22 (W/h)/kg para a massa de 19,94kg e 327,50 (W/h)/kg para a massa de 21,38kg.

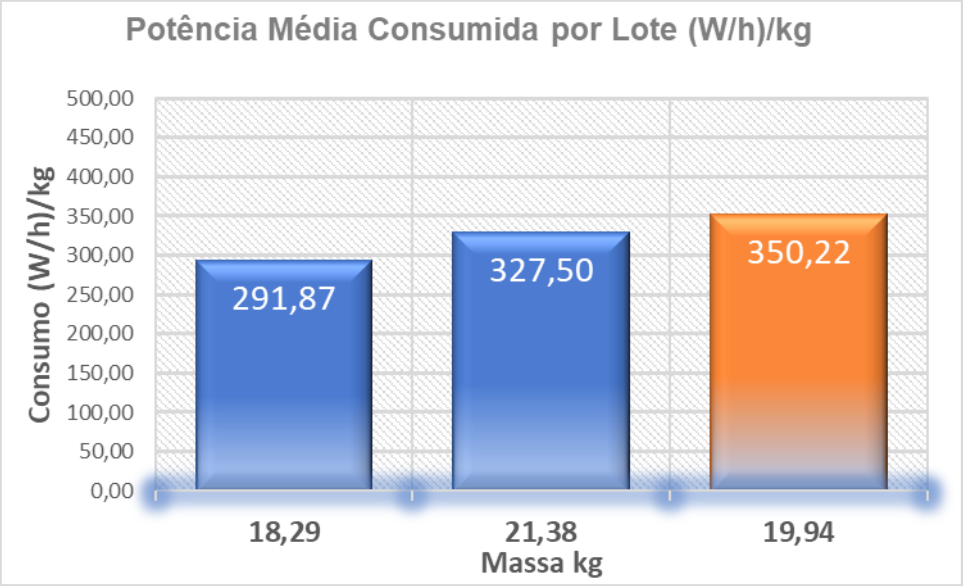


Figura 16. Potência Média Consumida em relação às massas de 18,29kg, 19,94kg e 21,38kg. Resultado dos testes em relação à Potência Média Consumida.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 detalha os dados referentes aos resultados dos testes com os lotes de filés de tilápia.

Tabela 1: Resultados dos testes com os lotes filés de tilápia.

Ordem dos testes dos lotes de filés de tilápia	Massa (kg)	Início dos testes (Temperatura interna inicial +10ºC)		Final dos testes (Temperatura interna final -30ºC)		Duração do teste (minutos)	Potência total consumida (W/h)	Potência média consumida por lote ((W/h)/kg)
		Data	Hora	Data	Hora			
Primeiro	18,29	03/09/21	14:23	03/09/21	16:29	126	5338,30	291,87
Segundo	21,38	03/09/21	18:51	03/09/21	21:29	158	7001,95	327,50
Terceiro	19,94	10/09/21	12:15	10/09/21	14:49	154	6983,39	350,22

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 demonstra os posicionamentos das sondas espeto nos testes com as respectivas datas: nos testes com os lotes de filés de tilápia com massas de 18,29kg e 21,38kg, respectivamente primeiro e segundo teste, a sonda espeto foi posicionada na 4ª. gaveta. Já no terceiro teste, a sonda espeto foi posicionada na 3ª. gaveta.

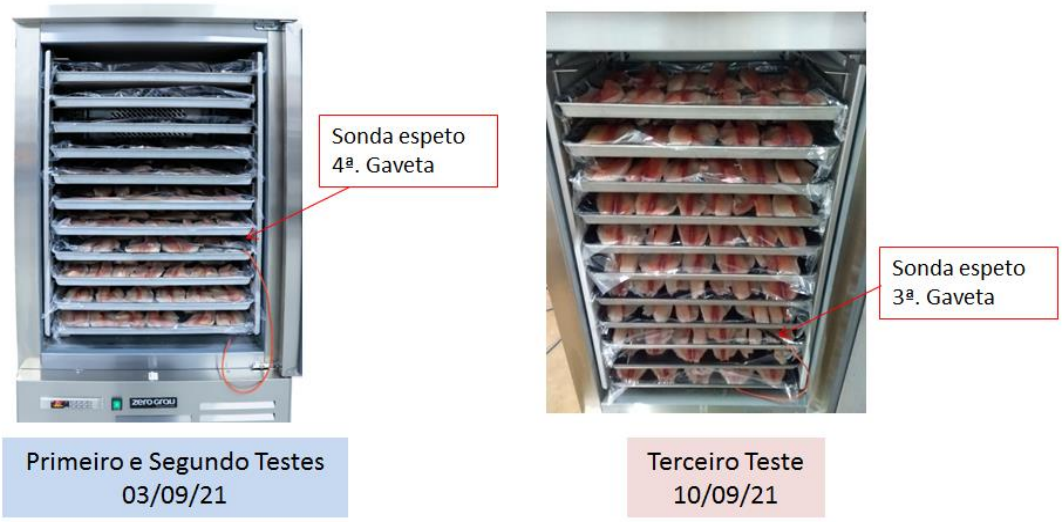


Figura 17. Posicionamentos das sondas espeto no congelador vertical com túnel de congelamento *Blast Chiller 230L* e datas dos testes.
Fonte: O autor.

Pelo fato de os dois pontos de medições de temperaturas estarem próximos no congelador vertical, verificou-se se haveria diferença do comportamento no ciclo de congelamento dos filés de tilápia. Pela quantidade disponível de lotes para o experimento (três lotes), foram utilizadas duas medições com a sonda espeto (Figura 8) numa mesma gaveta (4ª gaveta) e uma medição numa gaveta diferente (3ª gaveta). Em relação a isso, quando se compararam as potências médias consumidas pelos

lotes de filés de tilápia, constatou-se que o terceiro teste com a massa de 19,94kg (350,22 (W/h/)/kg), com a sonda espeto posicionada na 3ª gaveta, teve um consumo maior de energia em relação ao segundo teste com massa de 21,38kg (327,50 (W/h)/kg), sonda espeto posicionada na 4ª gaveta.

Os motivos do lote de filés de tilápia com sonda espeto na 3ª. gaveta com massa de 19,94 kg terem potência média consumida maior (350,22 (W/h/)/kg), quando comparada à medição do lote de filés de tilápia com sonda espeto na 4ª. gaveta com massa de 21,38 kg (327,50 (W/h)/kg), podem ser causados tanto às diferenças de calor sensível e latente, quanto a aspectos construtivos do congelador vertical, causadas pelos posicionamentos dos ventiladores de distribuição do ar refrigerado.

11 CONCLUSÃO

Através do estudo foi possível avaliar o ciclo de congelamento de filés de tilápia do Nilo em um congelador vertical, mais especificamente, em um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 203L, usando fluído refrigerante Freon R404A.

O diagrama de Mollier gerado pelo Software Coolpack para o fluído refrigerante Freon R404A foi utilizado como base para determinação das temperaturas para execução do ciclo de refrigeração do experimento com o congelador vertical.

O congelador vertical executou o ciclo de refrigeração proposto para o fluído refrigerante Freon R404A, permitindo avaliar o ciclo de congelamento de três diferentes lotes de filés de tilápia. O comportamento do ciclo de congelamento foi similar, seja em termos de comportamento de temperatura interna, quanto na diferenciação entre as regiões de calor sensível e calor latente, mesmo havendo diferença entre as massas dos lotes de filé de tilápia.

Destacou-se o tempo de permanência do ciclo de congelamento na região calor latente, sendo o ciclo de maior duração. Sua duração é maior que o tempo total dos ciclos de calor sensível.

Durante a execução do experimento, mediu-se também o consumo energético necessário para o congelamento dos três lotes de filés de tilápia, o qual, em termos absolutos, está relacionado à quantidade de massa – maior massa, maior consumo energético – e ao tempo de permanência nas regiões de calor sensível e calor latente.

Destaca-se que o tempo de permanência na região de calor latente foi o maior responsável pelo consumo energético durante o ciclo de congelamento.

O posicionamento da sonda espeto em diferentes pontos do congelador vertical impactou na medição da temperatura interna dos filés de tilápia, fato que merece atenção e um estudo futuro sobre a distribuição do ar refrigerado no congelador vertical ou outras variáveis que possam ter afetado o desempenho, mas que não foram identificadas nesse estudo.

O experimento realizado pode colaborar com novos estudos que venham a avaliar o consumo energético necessário para o congelamento de filés de tilápia, bem como realizar um comparativo com outros equipamentos utilizando o fluído refrigerante Freon R404A ou mesmo diferentes fluídos refrigerantes.

12 REFERÊNCIAS

AGENDA 2030. **Os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/home/agenda. Acesso em 28/10/2023.

BALCEWICZ JUNIOR, L. **Tecnologia da liofilização na conservação de alimentos,** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

LINDON, F.; SILVESTRE, M. M. **Conservação de Alimentos –** Princípios e Metodologias**.** Lisboa: Escolar Editora, 2008. 232p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO apresenta avanços no combate às perdas e ao desperdício de alimentos.** 2017. Disponível em: http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1062706/. Acesso em: 28/10/2023.

FELLOWS, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos:** princípios e prática. Tradução de Florencia Cladera Olivera. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.429 – 450p.

MILLER, R.; MILLER, M. R. **Refrigeração e ar condicionado**. Tradução: Francesco Scofano Neto, Rodrigo Otávio de Castro Guedes. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 524p.

MONTEIRO, V. **Refrigeração I e II – Técnicas e Competências Ambientais**; ETEP – Edições Técnicas e Profissionais. Lisboa: Lidel, 2016. 419 – 453p / 954 – 952p.

ORDÓÑEZ PEREDA, J. A. **Tecnologia de Alimentos –** Componentes e Processos**.** Tradução Fátima Murad. Porto Alegre: Artmed, 2005. 294p.

SILVA, J. G. **Introdução à tecnologia da refrigeração e da climatização.** São Paulo – SP. Ertliber Editora, 2003.35 – 36p. 43 – 44p.

SILVA, M. G. **Aplicação de Amônia em sistemas de refrigeração industrial**, São Paulo: SENAI-SP editora, 2013. 62-73p.

STOECKER. W. F.SAIZ JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. São Paulo – SP. Editora Edgard Blücher Ltda, 2ª Edição, 2002. 268 -286p.

VASCONCELOS, M. A. S. **Conservação de alimentos.** Recife: EDUFRPE, 2010. 15 – 20p. 55 – 68p

13 ESTUDO 2

CONSUMO ENERGÉTICO PARA DESIDRATAÇÃO DE FILÉS DE TILÁPIA DO NILO (*OREOCHROMIS NILOTICUS*) EM LIOFILIZADOR VERTICAL

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o consumo energético para desidratação de filés de tilápia do Nilo em um liofilizador vertical submetido a ensaios controlados dentro de câmara de ensaios durante o período de 432 horas. Para realização da avaliação do consumo energético, foram selecionadas amostras de filés de tilápia de massas iniciais de 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg, totalizando 48kg, que foram submetidas à desidratação. O processo consistiu, primeiramente, em submetê-las a um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 230L e, em seguida, ao processo de liofilização com durações de 18, 24, 30 e 36 horas e medidas as massas finais, comparando sua perda de peso percentual em relação às massas iniciais e o consumo médio em W/h. Avaliaram-se o consumo energético e o tempo estimado como necessário para atingir o nível de 30,00% de matéria seca, considerado como ideal para desidratação dos filés de tilápia. Procedeu-se o comparativo entre o consumo energético de um congelador vertical de uso doméstico e o consumo energético estimado para liofilizar massa equivalente de filés de tilápia que podem ser armazenadas e conservadas no congelador. O consumo energético estimado para o processo de liolifização somente teria vantagens a partir de 0,96 anos (350 dias). Nesta comparação não estão sendo levados em considerações parâmetros como, por exemplo, menor massa e menor volume dos filés liofilizados.

Palavras-chave: Consumo energético. Desidratação de alimentos. Liofilizador. Desidratação filés de tilápia.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the energy consumption for dehydrating Nile Tilapia fillets in a prototype vertical freeze dryer. The vertical freeze dryer, still in the prototype stage, was subjected to controlled tests inside a test chamber over a period of 432 hours. To evaluate energy consumption, different samples of tilapia fillets with initial masses of 1.5 kg, 2.5 kg, 3.5 kg and 4.5 kg, totaling 48 kg, were subjected to dehydration. The process consisted, first, of subjecting them to a vertical freezer with a Blast Chiller 230L freezing tunnel. Once the samples were frozen, they were subjected to the freeze-drying process lasting 18, 24, 30 and 36 hours and the final masses were measured, comparing their percentage weight loss in relation to the initial masses and the average consumption in W/h. Energy consumption and the estimated time needed to reach the level of 30.00% dry matter, considered ideal for dehydrating two tilapia fillets, were evaluated. A comparison was made between the energy consumption of a vertical freezer for domestic use and the estimated energy consumption to freeze-dry an equivalent mass of tilapia fillets that can be stored and preserved in the freezer. The estimated energy consumption for the freeze-drying process would only have advantages starting at 0.96 years (350 days). In this comparison, parameters are not taken into consideration, for example, smaller mass and smaller volume of freeze-dried fillets.

Keywords: Energy use in dehydration. Freeze dryer. Lyophilizer. Dehydrator Machine Food. Dehydration of Nile tilapia fillets.

14 INTRODUÇÃO

A piscicultura no Brasil ainda é uma indústria relativamente nova, porém tem experimentado um crescimento contínuo ao longo das últimas três décadas, segundo Feiden *et al*. (2018), em especial pelo fato de passar por uma intensa profissionalização do setor produtivo e do processamento do pescado, o que tem contribuído para seu desenvolvimento. Há uma grande expectativa na possibilidade de expansão do mercado internacional para os produtos oriundos da piscicultura brasileira (FAO, 2022).

Embora a presença do peixe brasileiro no mercado global seja atualmente pequena, há potencial para um crescimento acelerado, pois a abertura de mercado dos EUA para produtos congelados, como por exemplo, a tilápia em filé ou inteira, pode contribuir com a produção de pescado nacional, já que esses produtos estão se tornando itens de exportação para o país (Associação Brasileira de Piscicultura, 2023).

Tal mercado, no entanto, demanda atenções redobradas com a questão da energia elétrica, que se tornou um recurso essencial para humanidade, impulsionando o estilo de vida atual e agindo de forma direta ou indireta nas mais variadas atividades do cotidiano, sejam industriais, domésticas ou de lazer. A energia elétrica também permitiu a criação de sistemas de refrigeração e congelamento, os quais são fundamentais para a conservação de alimentos e bebidas (Cury et al., 2021; Silva e Prat, 2020, Costa et al., 2021).

O sistema de refrigeração e congelamento é essencial para a conservação do pescado, principalmente *in natura,* por ser um alimento de rápida deterioração. Quando conservado adequadamente, prolonga sua vida de prateleira por um período de até 6 meses a 8 meses (Oetterer et al., 2012). Contudo, em paralelo à refrigeração, também é possível contar com outros processos de conservação, como os de secagem, por exemplo.

Segundo Ratti (2001), entre os diversos processos de secagem dos alimentos, destaca-se a liofilização, a qual consiste na desidratação por sublimação de um produto congelado. Devido à ausência de água líquida e às baixas temperaturas exigidas para o processo, a maior parte da deterioração e das reações microbiológicas são interrompidas, resultando em um produto de excelente qualidade (Ferrigolo, 2021).

O processo de liofilização favorece o transporte, pois reduz o volume e a biomassa, conservando o alimento por mais tempo e, dependendo do tipo da embalagem, aumenta a sua vida de prateleira (Amâncio et al., 2012; Celestino, 2010). Porém, apesar de apresentar muitas vantagens, quando comparado a outros processos de desidratação, tem um custo elevado, o que acaba diminuindo o interesse por sua utilização pela indústria alimentícia (Ratti, 2001).

De acordo com Fellows (2006), a desidratação de alimentos por sublimação é um processo que visa, principalmente, diminuir o desenvolvimento de micro-organismos e preservar as características iniciais do produto, consistindo basicamente em três etapas:

a) Congelamento rápido do alimento em uma câmara de congelamento, quando os cristais de gelo se formam no produto, facilitando a desidratação posterior através dos espaços deixados pela água sublimada;

b) Após o congelamento, o produto é transferido para o liofilizador, iniciando o processo de desidratação primária, no qual se aplica vácuo em todo o sistema para que a água aparente no alimento passe por sublimação, ou seja, passe diretamente do estado sólido (gelo) para o gasoso (vapor), sem passar pelo estado líquido intermediário;

c) Na terceira etapa, são alcançados níveis mais altos de vácuo e aumento de temperatura no produto, permitindo que a água ligada às células do produto se desprenda, o que diminui seu teor de água, que pode chegar a níveis ideais de 8% a 2% da massa final, adequados para a conservação do produto desidratado.

O congelamento é um requisito importante, tanto para o armazenamento de filés de tilápia após abate, quanto para o processo de liofilização. Portanto, para ambos os casos, é necessário adotar sistemas de refrigeração para manter a condição de conservação, ou seja, é preciso reduzir a temperatura através de um processo de congelamento rápido.

A remoção da água impede o crescimento de micro-organismos, causas enzimáticas ou reações químicas que possam degradar o produto, o que resulta em uma maior estabilidade e durabilidade. Os alimentos liofilizados podem ser armazenados por longos períodos, mas as características físico-químicas podem variar a depender do produto. A vantagem da liofilização é que a conservação não necessita de refrigeração, o que é especialmente útil em situações em que a refrigeração não está disponível ou é inviável (Fellows, 2006).

Diante disso, o presente estudo buscou analisar o consumo energético durante o processo de liofilização de filés de tilápia. Para tanto, foram delimitados os seguintes objetivos específicos:

a) Mensurar o consumo energético de um protótipo de liofilizador vertical durante a liofilização de filés de tilápia;
b) Avaliar a eficiência de um protótipo de liofilizador vertical;
c) Comparar o consumo energético de um congelador vertical de uso doméstico e o consumo energético estimado para liofilizar massa equivalente de filés de tilápia que podem ser armazenadas e conservadas no congelador.

15 MATERIAL E MÉTODOS

15.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E MATÉRIA-PRIMA

O experimento foi realizado em uma câmara de testes para ensaios controlados (Figura 1), cedida pela empresa Zero Grau, localizada na cidade de Nova Santa Rosa, Estado do Paraná.

Figura 1. Entrada da câmara de testes para ensaios controlados.
Fonte: O autor.

A câmara de ensaios com isolamento térmico foi utilizada no intuito de minimizar interferências externas e manter a estabilidade de temperatura, permitindo o monitoramento efetivo do protótipo do liofilizador vertical e do experimento. O protótipo do liofilizador vertical foi submetido a ensaios controlados dentro da câmara de ensaios durante o período de 432 horas.

Figura 2. Câmara testes de testes para ensaios controlados com congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller.
Fonte: O autor.

Os filés de tilápia foram obtidos por meio de doações de frigoríficos de peixes da região do oeste paranaense, totalizando a massa nominal de 60 kg de filés frescos, abatidos no mesmo dia do início do experimento, sem espinhas e sem couro, não havendo uma classificação em termos precisos de massa para o experimento. Quando medida novamente para a realização dos experimentos, verificou-se que a massa real era de 59,61 kg.

As amostras individuais dos filés de tilápia nos lotes tinham massa variando de 100 g a 300 g e todos os filés foram transportados em caixas térmicas até o local do experimento. É importante observar que os tamanhos dos filés de tilápia variam, mesmo nas condições em que apresentem a mesma massa inicial, o que se deve ao fato de as tilápias terem tamanhos diferentes, ou seja, para obtenção de mesma massa, têm-se tamanhos diferentes de filés.

Os filés de tilápia foram acomodados separadamente, fora das embalagens, em bandejas de aço inoxidável AISI 304 (Figura 3) as quais foram inseridas em um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 230L com 11 bandejas (Figura 4) e posteriormente congeladas.

Na seleção dos filés de tilápia para preenchimento das bandejas foram utilizados lotes com as massas de filés com 18,29 kg, 19,94 kg e 21,38 kg totalizando o lote com 59,61 kg. A diferença de 390 g entre a massa nominal fornecida pelos frigoríficos, 60 kg, e a massa utilizada, 59,61 kg, deve-se ao fato de que não houve precisão na pesagem por parte de alguns frigoríficos.

Figura 3. Bandejas de acomodação dos filés de tilápia no congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 230L.
Fonte: O autor.

Figura 4. Congelador vertical com túnel de congelamento vertical Blast Chiller 230L.
Fonte: https://zerograu.com/produto/blast-chiller-230/

A câmara de testes foi mantida em 20°C, através do sistema de controle de temperatura que possui, durante a execução dos ensaios (Figura 5).

Figura 5. Temperatura na câmara de testes durante os ensaios.
Fonte: O autor.

15.2 PROTÓTIPO DE LIOFILIZADOR

Para a realização do experimento foi utilizado um protótipo de liofilizador vertical, patente de invenção BR 10 2020 010874 3 (Figura 6) que pode ser utilizado para liofilizar produtos como carnes e vegetais e é composto pelos seguintes componentes (Figura 7):

a) Câmara de liofilização: compartimento em formato cilíndrico, aço inoxidável AISI 304 com volume interno de 0,065 m^3, local onde o produto é acomodado para ser submetido à desidratação, que possui um sistema para aquecimento por resistência elétrica e condução térmica para elevação da temperatura e acelerar a sublimação da água do produto a ser liofilizado;

b) Prateleiras em estruturas circulares perfuradas e ajustáveis, que permitindo alterar o espaço vertical entre suas partes, evitando prejudicar o fluxo de vapor de água da sublimação. A temperatura nesse espaço é medida por sensores fixados na prateleira e no tubo;

c) Câmara de sequestro de umidade, estrutura em formato cilíndrico em aço inoxidável AISI 304 com volume interno de 0,016 m^3, que possui um sistema de refrigeração no qual a temperatura interna pode atingir -46ºC para reter ao máximo a umidade da câmara de liofilização ao cristalizar a água, limitando a migração de umidade até a bomba de duplo estágio;

d) Bomba de duplo estágio, de vácuo, responsável pela remoção do oxigênio, da umidade e outros gases presentes na câmara de sequestro de umidade;

e) Unidade compressora e condensadora de ar e fluído para baixas, temperaturas de evaporação, preparada com acessórios para operar em baixas temperaturas, com a função de sequestrar a umidade que se desprendeu do produto durante a desidratação;

f) Quadro de comando para controle e operação do liofilizador, com dispositivo de proteção contra mau funcionamento e segurança da bomba de vácuo, controle de temperatura interna nas prateleiras, monitoramento da temperatura ambiente e acionamento individualizado de cada sistema elétrico do liofilizador.

Figura 6 – Protótipo do liofilizador vertical desenvolvido na pesquisa.
Fonte: O autor.

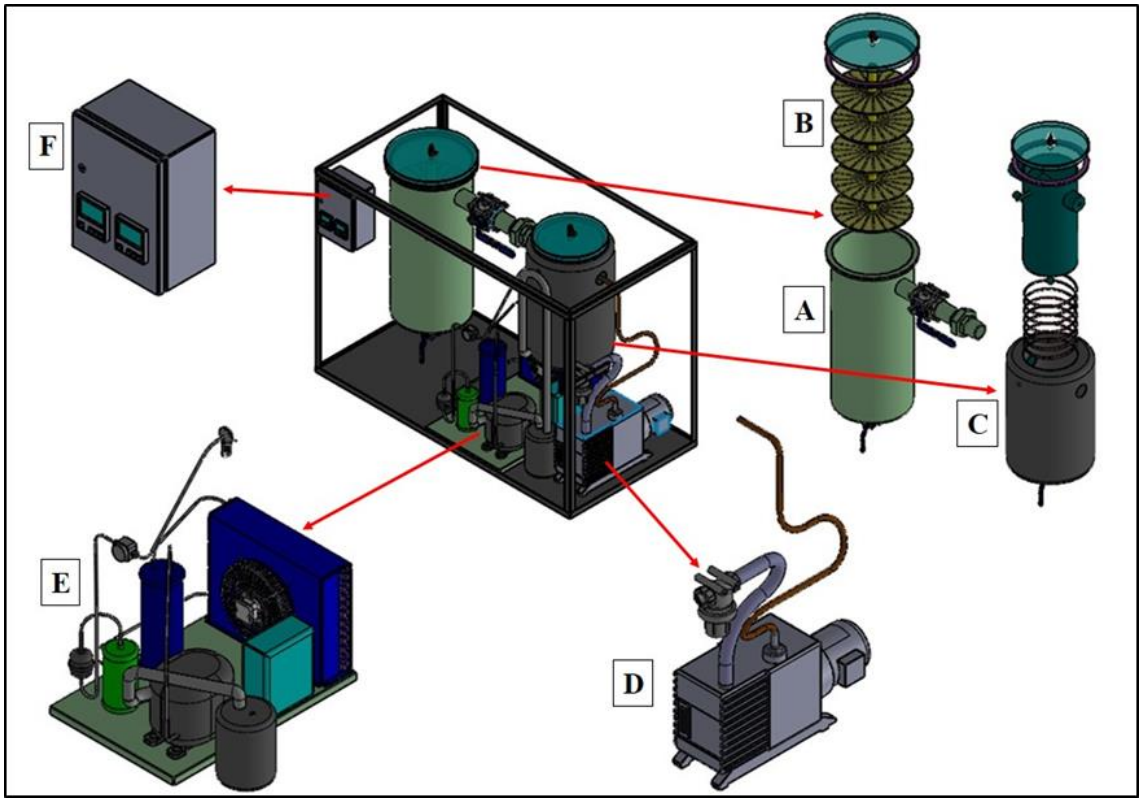


Figura 7**.** Desenho esquemático do protótipo de liofilizador vertical (BR 10 2020 010874 3) e seus componentes. A) Câmara de liofilização, B) Prateleiras, C) Câmara de sequestro de umidade, D) Bomba de duplo estágio (vácuo), E) Unidade compressora e condensadora de ar e fluído para baixas temperaturas de evaporação e F) Quadro de comando para controle e operação do liofilizador.
Fonte: Elaborado pelo autor.

15.3 PROCESSO DE LIOFILIZAÇÃO DOS FILÉS

Os filés de tilápia foram acomodados em um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller 230L (Figura 4) e congelados em três lotes (Figura 3), cada qual disposto em bandejas, com uma separação que permitisse a circulação de ar entre todos, alcançando a temperatura final de -40°C. Por meio de uma sonda espeto (Figura 8), foi possível monitorar a temperatura dos filés de tilápia dentro do túnel de congelamento, permitindo assim que os filés de tilápia atingissem a temperatura interna de -30°C.

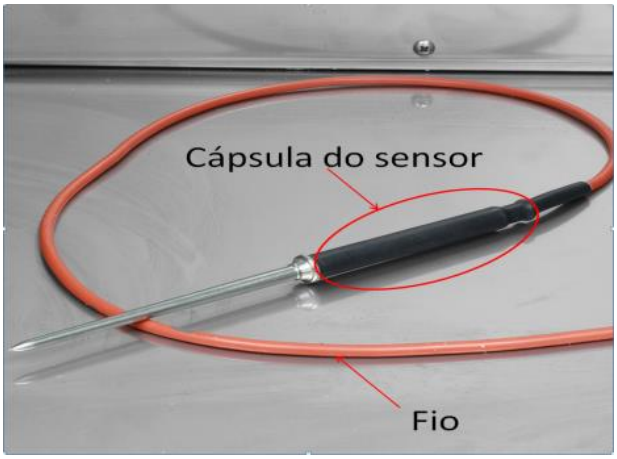


Figura 8. Sonda Espeto.
Fonte: https://zerograu.com/produto/blast-chiller-230/

Após o congelamento, os filés foram embalados em pacotes plásticos e armazenados a uma temperatura de -18°C até a realização do processo de liofilização (Figura 9).

Figura 9. Filés de tilápia embalados em pacotes plásticos e armazenados antes do processo de liofilização.
Fonte: O autor.

A massa total utilizada se restringiu a 48 kg, sendo que os 11,61 kg restantes destinados a outros estudos fora do escopo deste experimento. A massa restante de 48 kg foi utilizada para o processo de desidratação no liofilizador vertical (Figuras 6 e 7).

Estabeleceram-se quatro massas e quatro tempos para os processos de liofilização e a massa total de cada experimento foi determinada em balança, com precisão de 5 g, cuja capacidade mensura até 100 kg.

Mediu-se a massa do conjunto de prateleiras (Figura 10) nas quais foram inseridas as amostras de filés de tilápia. A balança permite subtrair a massa do conjunto das prateleiras durante a determinação da massa total dos filés de tilápia a serem liofilizados no processo específico (Figura 12).

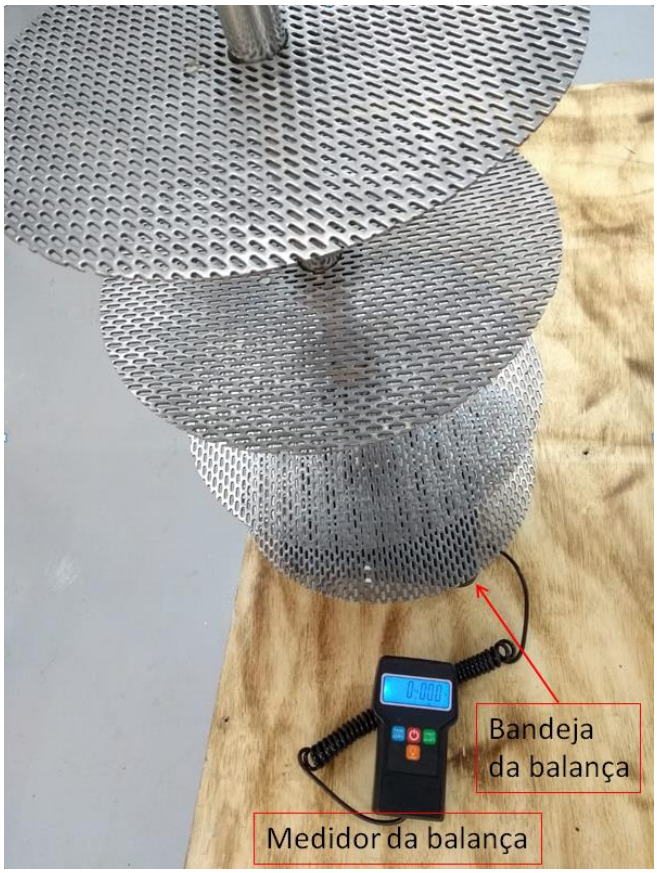


Figura 10. Determinação da massa das prateleiras.
Fonte: O autor

Cada processo totalizou a massa de 12 kg, divididos em massas iniciais de 4,5 kg, 3,5 kg, 2,5 kg e 1,5 kg (Figura 13). Como foram realizados quatro processos de 12 kg, o total do experimento foi de 48 kg. O critério para estabelecimento das massas iniciais foi baseado na capacidade máxima de massa para preenchimento das prateleiras do liofilizador (Figura 12).

Nessa situação, determinou-se que a massa, medida com a balança seria de 4,5 kg, permitindo a disposição de filés de tilápia de vários tamanhos sem necessidade de seleção precisa de tamanho. As demais massas iniciais foram selecionadas de

modo a haver uma diferença de 1 kg entre cada uma até a massa mínima de 1,5 kg, sempre preenchendo todas as prateleiras com filés de tilápia.

Na Figura 11 podem ser vistas as câmaras de liofilização e câmara de sequestro de umidade.

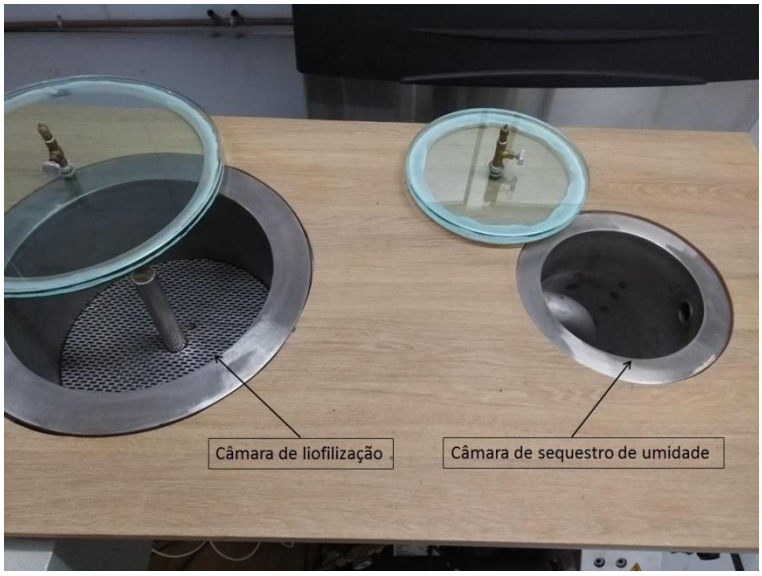


Figura 11. Câmara de liofilização e câmara de sequestro de umidade antes do início do processo de liofilização.
Fonte: O autor.

A Figura 12 mostra o preenchimento das prateleiras do liofilizador com a massa de 4,5 kg.

Figura 12. Prateleira do liofilizador preenchida com a massa de filés de tilápia com 4,5 kg e balança para determinação da massa nas prateleiras
Fonte: O autor.

Durante as etapas de desenvolvimento do protótipo do liofilizador vertical foram realizados testes com filés de tilápia obtidos por produção própria e, com base nos testes e dados empíricos obtidos durante o desenvolvimento, optou-se por iniciar o processo de liofilização com a duração de 18 horas, adicionando 6 horas a cada processo subsequente, de modo que fossem executados os 4 processos. Desse modo, as durações dos processos de liofilização foram de 18 horas, 24 horas, 30 horas e 36 horas.

A massa de 48 kg disponível para o experimento não permitiu a realização de outros testes com durações e massas diferentes das especificadas nos 4 processos. A massa inicial e tempo de liofilização de cada processo sob teste são mostrados na Figura 13.

Figura 13. Diferentes massas de filés de tilápia submetidas aos diferentes tempos de liofilização dos filés de tilápia.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os filés foram dispostos de forma aleatória nas prateleiras do liofilizador (Figura 12) até atingir a massa do processo específico sob teste (Figura 13). Depois de acomodados dentro da câmara de liofilização (Figura 14), foi realizado o controle de temperatura no interior da câmara de ensaios (Figura 1).

Figura 14. Filés de tilápia nas prateleiras dentro da câmara de liofilização no início do processo de liofilização.
Fonte: O autor.

Foi necessário controlar a temperatura de ensaios para que a câmara de sequestro de umidade (Figuras 11 e 15) operasse de maneira estável, sem interferências do meio externo, atingindo -46ºC para início do processo de lioflilização.

Figura 15. Câmara de sequestro de umidade do liofilizador com a água retirada dos filés de tilápia já cristalizada.
Fonte: O autor.

Para o experimento, estabeleceu-se que a concentração de água presente nos filés de tilápia antes do processo de liofilização seria de 77,98 ±2,94%. Além disso, também se optou por um parâmetro de referência de 30,00% de massa final para os filés de tilápia, como nível desejado para classificá-los como desidratados. Essa condição se baseou na somatória de 22,02% de massa seca de um filé de tilápia mais os 8% de água, que segundo Fellows (2006), é o percentual da água possível de encontrar no alimento desidratado (Ferrigolo et al., 2021). A Figura 16 demonstra os filés de tilápia durante o processo de liofilização.

Figura 16. Filés de tilápia sendo liofilizados na câmara de liofilização.
Fonte: O autor.

O resultado do processo de liofilização dos filés de tilápia com o tempo de liofilização de 24 horas, massa inicial de 4,5 kg e massa final de 2,95 kg, pode ser visto no display da balança na Figura 17.

Figura 17. Filés de tilápia liofilizados em 24 horas, massa inicial de 4,5 kg e massa final 2,950 kg (medida na balança).
Fonte: O autor.

15.4 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO DO PROTÓTIPO DE LIOFILIZADOR VERTICAL

O registro do consumo de energia do protótipo de liofilizador foi realizado através de um controlador eletrônico Energy LOG Plus da fabricante *Full Gauge Controls* (Figura 18), o qual possui um *data-logger* para registro das informações coletadas. O controlador eletrônico possui um *software* que possibilita o monitoramento e indica a qualidade e consumo de energia elétrica.

Figura 18. Energy LOG Plus.
Fonte: https://www.fullgauge.com.br/produto-energylog-plus

Além disso, conta com um relógio de tempo real e possui memória interna capaz de armazenar os valores medidos da rede elétrica em períodos de tempo determinados. Neste estudo, os registros do consumo energético do equipamento foram realizados em intervalos de 1 minuto e os dados do *data-logger* possibilitaram formação tanto dos gráficos de consumo energético quanto do cálculo das médias de consumo energético (Figura 20).

Procedeu-se o comparativo entre o consumo energético de um congelador vertical de uso doméstico e o consumo energético estimado para liofilizar a massa equivalente de filés de tilápia que podem ser armazenadas e conservadas no congelador.

Para realizar a comparação, utilizou-se o consumo médio de um congelador vertical doméstico da marca Brastemp, modelo Flex Frost Free, 228 litros de armazenamento (Figura 19). Esse equipamento é fabricado no Brasil e já passou pela certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) que tem a responsabilidade por avaliar a conformidades e os requisitos mínimos necessários para ser comercializado no Brasil.

Figura 19. Freezer vertical Brastemp Flex Frost Free 228 litros BVR28NB.
https://www.brastemp.com.br/freezer-vertical-brastemp-flex-frost-free-228-litros---bvr28nb/p

Esse equipamento não precisa ser descongelado, ou seja, retirar o gelo que impede a troca de calor, dificultando que o congelador chegue à temperatura desejada de conservação dos alimentos. Desse modo é possível estimar que, mantendo o equipamento em condições adequadas de ambiente e conforme recomendação do fabricante, isto é, livre de variações bruscas de temperatura, exposição ao sol e em um espaço ventilado, por exemplo, e com o fornecimento de energia elétrica adequada para o seu funcionamento, o alimento pode ser armazenado em condições de consumo.

As dimensões do Freezer Vertical Flex Frost Free 228, sem embalagem, são: altura de 1698 mm, largura de 631 mm e profundidade de 695 mm. Possui uma capacidade bruta de 276 litros e uma capacidade de armazenamento de 228 litros, com a diferença de 48 litros destinada à circulação de ar no interior do equipamento para favorecer a refrigeração do produto.

Para estimar a quantidade de filés de tilápia que podem ser acomodados no volume de 228 litros do congelador vertical, partiu-se do volume das embalagens de conservação e transporte do frigorífico CVALE, que possuem 479 x 374 x 138 mm, totalizando um volume de 24,72 litros que acomodam 8 kg. Dessa forma é possível acomodar 9 caixas de filés totalizando 72 kg (https://www.cvalealimentos.com.br/site/produto/133/file-de-tilapia-2kg).

A comparação foi feita entre a estimativa do consumo energético para liofilizar a massa de 72 kg de filés de tilápia e seu armazenamento e conservação e o consumo energético do Freezer Vertical Flex Frost Free 228, operando no modo congelador, com temperatura inferior a -18ºC, para armazenamento e conservação da mesma massa num período de até 24 meses.

15.5 MÉTODO PARA ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos nos processos de liofilização foram submetidos à análise de regressão não linear simples, conforme a equação: (GUIMARÃES, 2008).

y = a * e^(bx)

Onde:

y = o tempo de processo de liofilização;

a = coeficiente de interceptação da curva exponencial;

x = percentual de perda de água dos filés de tilápia e

b = coeficiente de inclinação da curva exponencial.

O intuito da análise foi estimar, a partir dos dados obtidos, o tempo de liofilização necessário para atingir 30,00% de massa final em relação à massa inicial do lote de filés tilápia para cada uma das massas dos lotes sob teste: 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg.

Além disso, para melhor ajuste dos dados coletados ao modelo estatístico, foi empregada uma análise de potência para projeção não linear, possibilitando realizar uma prospecção dos resultados. Todos os dados coletados foram tabulados e analisados utilizando as ferramentas estatísticas do programa Microsoft Excel 2016.

16 RESULTADOS

O liofilizador deste experimento foi utilizado para a desidratação dos filés de tilápia e a medida de consumo energético associado a esse processo. Para a execução das medições, foram utilizadas distintas amostras, com diferentes lotes de massas de filés de tilápia, a saber, 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg, sendo cada lote submetido a diferentes tempos de liofilização, respectivamente, 18 horas, 24 horas, 30 horas e 36 horas. Na Tabela 1 estão detalhados os testes e os resultados.

Duração do teste (horas)	Massa Inicial (kg)	Massa final (kg)	Massa final %	Potência Consumida (W/h)	Potência Média Consumida (W/h)
18	4,5	3,36	74,67	11462	636,78
	3,5	2,13	60,71	10790	599,44
	2,5	1,47	58,60	10162	564,56
	1,5	0,78	52,00	9729	540,50
24	4,5	2,95	65,56	15607	867,06
	3,5	1,81	51,57	14492	805,11
	2,5	1,28	51,20	14230	790,56
	1,5	0,72	48,00	13053	725,17
30	4,5	2,42	53,67	17462	970,11
	3,5	1,58	45,14	18105	1005,83
	2,5	0,92	36,80	17754	986,33
	1,5	0,54	36,00	16661	925,61
36	4,5	2,23	49,44	21488	1193,78

	3,5	1,38	39,29	22640	1257,78
	2,5	0,80	32,00	22541	1252,28
	1,5	0,49	32,67	19302	1072,33

Tabela 1: Resultado do processo de liofilização para os lotes de massas de filés de tilápia de 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg submetidas aos tempos de liofilização de 18 horas, 24 horas, 30 horas e 36 horas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O objetivo do processo de liofilização é obter uma maior redução de água na massa quando comparada à massa inicial, submetida à liofilização. Valores porcentuais maiores de massa final indicam menor desidratação, ou seja, menor eficiência do processo de liofilização, que é a relação entre a massa final e inicial. Os resultados do processo de liofilização demonstraram que os filés de tilápia do lote 4,5 kg de massa inicial liofilizados por 18h mantiveram maior percentual de massa final em relação à inicial (74,67%) entre os tratamentos (Tabela 1 – Coluna Massa final %).

Lotes de filés de tilápia com as mesmas massas iniciais (Tabela 1 – Coluna Massa Inicial) submetidos a tempos de liofilização maiores (Tabela 1 – Duração do Teste) apresentaram os melhores resultados em relação à perda de massa (Tabela 1 – Coluna Massa final %) quando comparados a menores tempos de liofilização.

Para lotes de filés de tilápia de massa inicial de 4,5 kg, a relação entre maior tempo de liofilização e redução de massa final (49,44%) pode ser vista na Tabela 1 – Coluna Massa final %. Os maiores porcentuais de perda de massa foram registrados para os lotes de filés de tilápia de massa inicial de 1,5 kg (32,67%) e 2,5 kg (32,00%) processados por 36 horas (Tabela 1 – Coluna Massa final %).

Para cada um dos processos de liofilização, com as diferentes amostras de massas e tempos, foi medido o consumo em Watts/hora (W/h), como se visualiza na Figura 20. Em relação ao consumo energético do liofilizador, observou-se que o consumo energético médio entre todos os processos de liofilização foi de 590 W/h.

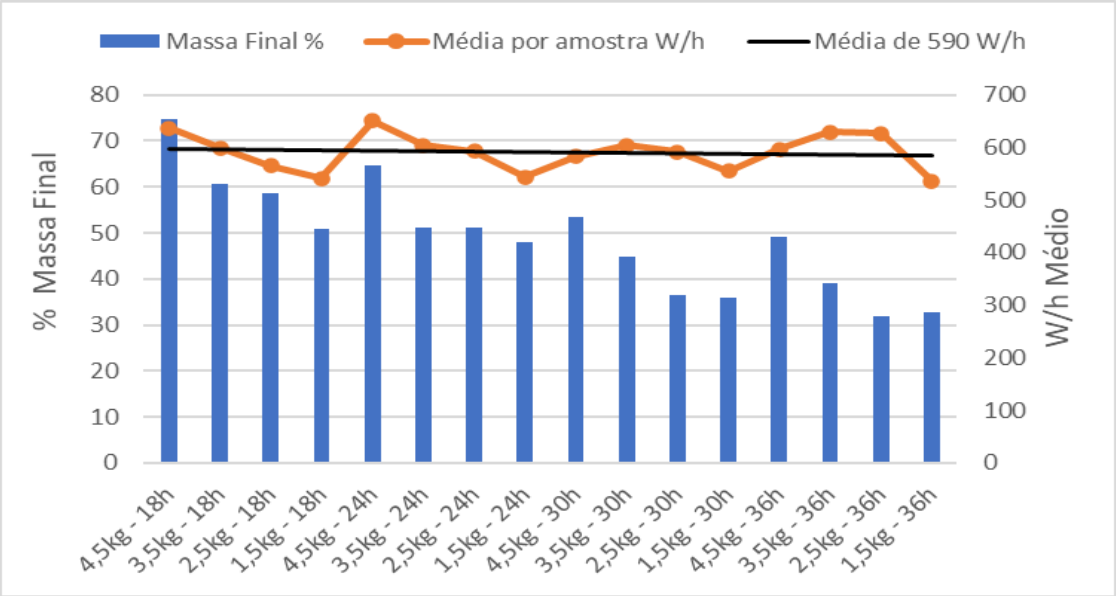


Figura 20. Massa final (%) dos filés desidratados em diferentes tempos e a média de consumo do liofilizador durante todos os processos de liofilização.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Mediante aplicação da análise de regressão não linear simples, percebeu-se que a velocidade do processo de liofilização dos filés de tilápia apresentou um padrão não linear em todos os tratamentos (Figura 21). A melhor condição foi observada entre as variáveis para os filés de tilápia do lote com massa inicial de 2,5 kg, cujo menor tempo estimado foi de 37,8 horas para atingir a menor porcentagem de massa final, havendo uma forte relação entre as variantes que levou ao melhor ajuste do modelo (Figura 21 B).

A Tabela 2 demonstra os resultados da aplicação da análise de regressão não linear simples, destacando em amarelo a duração do teste (horas) atinge 30,00% da massa final.

Amostra	Duração do teste (horas)	Massa final %
A (1,5 kg)	18	52,00
	24	48,00
	30	36,00
	36	32,67
	39,5	30,00
B (2,5 kg)	18	58,60
	24	51,20
	30	36,80

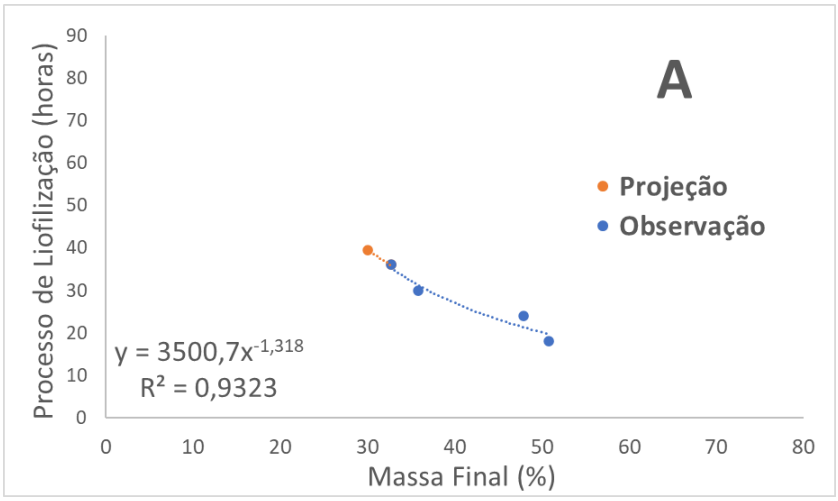
	36	32,00
	37,8	30,00
C (3,5 kg)	18	60,71
	24	51,57
	30	45,14
	36	39,29
	55,7	30,00
D (4,5 kg)	18	74,67
	24	65,56
	30	53,67
	36	49,44
	77,7	30,00

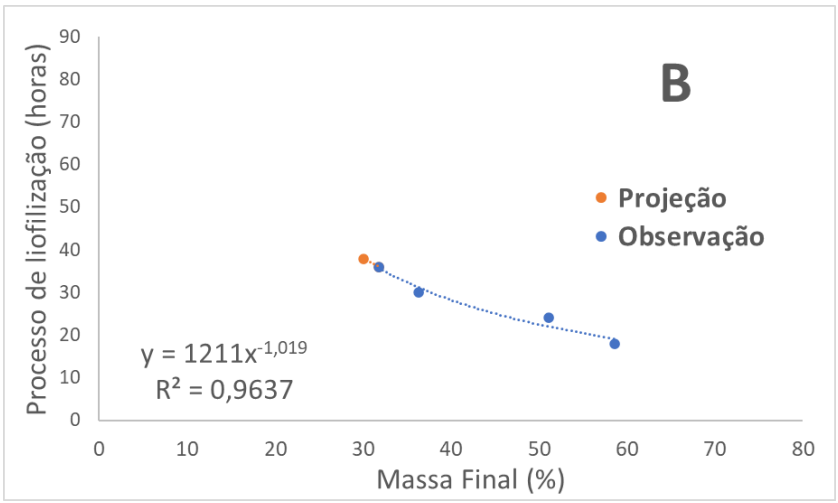
Tabela 2. Relação entre a perda de massa final (%) dos lotes de filés de tilápia durante o processo de liofilização (horas). A) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5kg, B) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 2,5kg, C) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 3,5kg e D) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 4,5kg.
Fonte: Elaborado pelo autor.

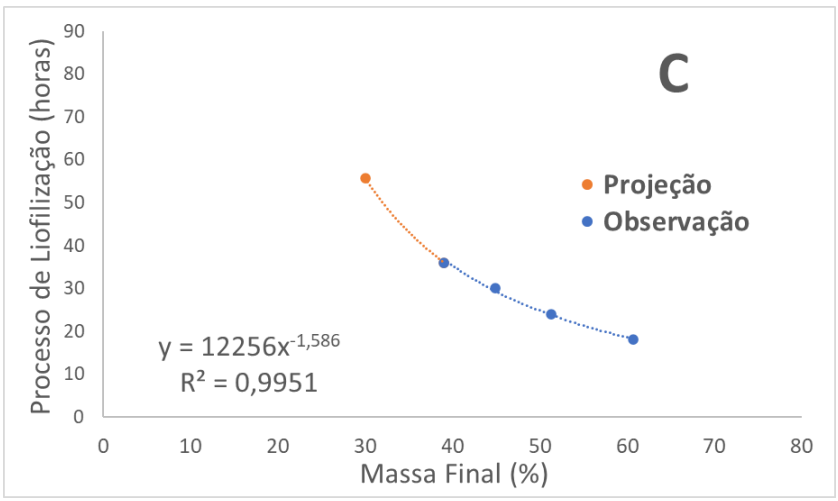
Além disso, os resultados da análise de consumo energético demonstraram que o tempo necessário para atingir o nível considerado como ideal para desidratação dos filés de tilápia – 30,00% de matéria seca da proposta inicial do trabalho conforme já mencionado – na pior condição de redução de massa, para os filés de tilápia do lote com massa inicial e 4,5 kg, foi estimado em 77,7 horas de processo (Figura 21 D). Ressalta-se que as estimativas foram realizadas através da análise de regressão não linear simples.

Também se observou que o tempo para liofilização do lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5 kg foi praticamente equivalente ao tempo necessário para o lote com massa inicial de 2,5 kg (Figuras 21A e B e Tabela 3).

O consumo médio foi calculado a partir dos dados obtidos através do controlador eletrônico Energy LOG Plus da fabricante Full Gauge Controls (Figura 18). A média utilizada foi a aritmética simples, na qual a soma dos dados de consumo energético, medidos no intervalo de 1 minuto, foi dividida pelo período desejado em horas. Desse modo, obteve-se o consumo energético em W/h de todos os lotes de filés de tilápia.


A
Projeção
Observação
Processo de Liofilização (horas)
Massa Final (%)
y = 3500,7x-1,318
R² = 0,9323
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90


B
Projeção
Observação
Processo de liofilização (horas)
Massa Final (%)
y = 1211x-1,019
R² = 0,9637
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90


C
Projeção
Observação
Processo de Liofilização (horas)
Massa Final (%)
y = 12256x-1,586
R² = 0,9951
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

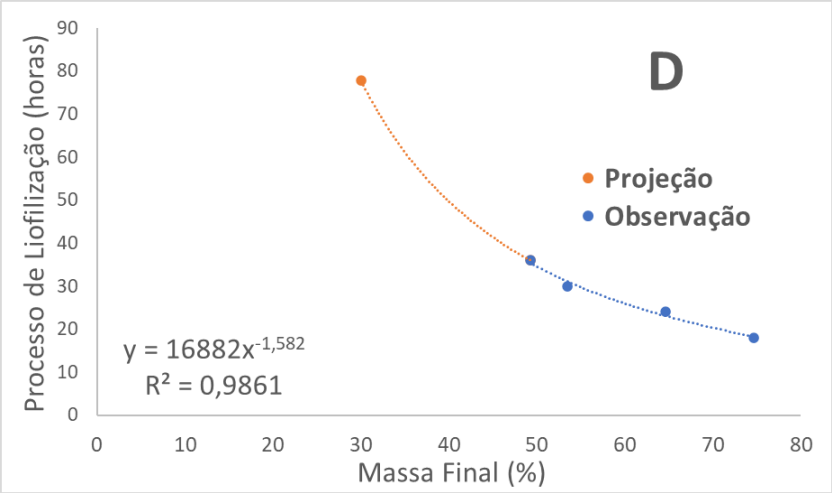


Figura 21. Relação entre a perda de massa final (%) dos lotes de filés de tilápia durante o processo de liofilização (horas). A) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5kg, B) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 2,5kg, C) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 3,5kg e D) Lote de filés de tilápia com massa inicial de 4,5kg.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Fez-se uma simulação entre o consumo energético de um congelador vertical residencial de uso doméstico padrão e o processo de liofilização dos filés de tilápia selecionando o congelador por ser um equipamento nacional já produzido com a condição *frost free,* em que não há necessidade de descongelamento, o que permite que funcione de maneira ininterrupta desde que se mantenha o fornecimento de energia elétrica.

Marca	Modelo	Tensão Nominal (Vac)	Registro INMETRO	Volume interno (l)	Consumo de energia (kW/h)/ mês)	Faixa de Classifi-cação
Brastemp	BVR28MBBNA BVR28MKBNA	220	005221/2016	228,0	55	A

Quadro 1 – Freezer Vertical Frost Free 228

Fonte: http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/Refrigeradores_e_assemelhados_-_2020-07-02.pdf

Conforme o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), o Freezer Vertical Flex Frost Free 228 da marca Brastemp, modelo BVR28MBBNA ou BVR28MKBNA, pode ser adquirido tanto nas tensões de 127V quanto de 220V e o consumo médio nas duas tensões é, segundo o fabricante, de 55 kWh/mês.

Com base nos experimentos realizados com os lotes de filés de tilápia de diferentes massas iniciais e tempos de liofilização, foi estimado o consumo energético médio e comparado com o consumo médio de um Freezer vertical Flex Frost Free 228, utilizando o valor médio de 1,83 kW/h por dia para armazenar a massa de 72 kg de filés de tilápia, por um período de 24 meses (730 dias). Os dados podem ser vistos Figura 22.

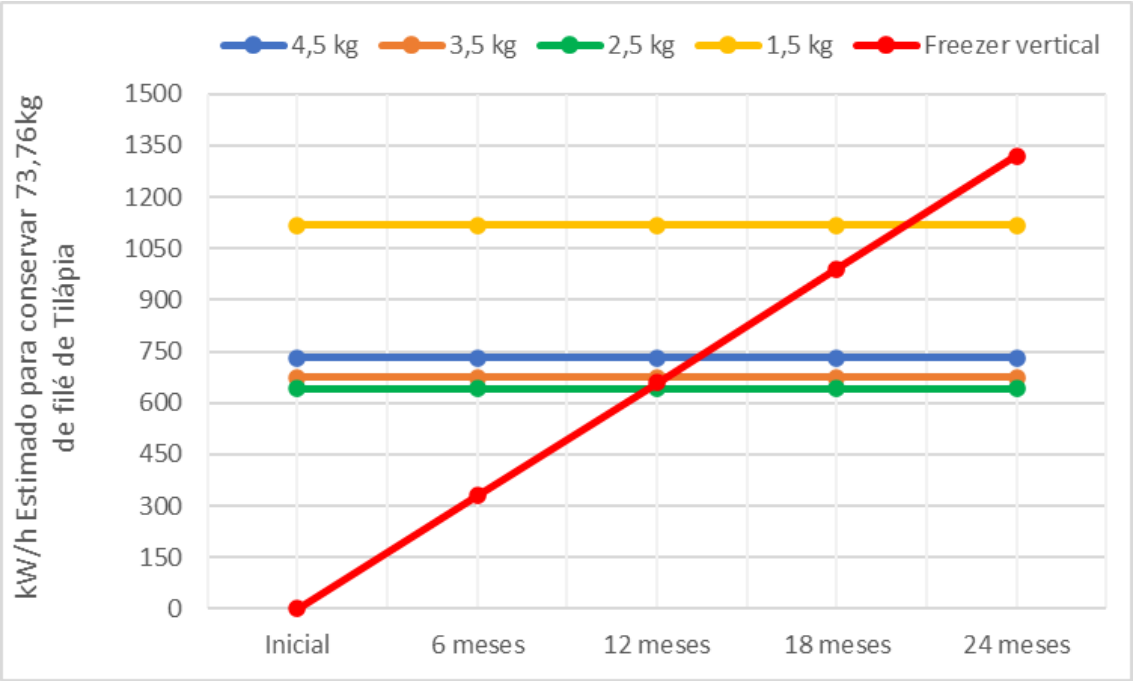


Figura 22. Simulação do tempo em meses de funcionamento do congelador, armazenando a massa de 72 kg de filés de tilápia, em relação à quantidade de energia utilizada (kW/h) para liofilizar 4 lotes de tilápia e conservar a mesma massa no congelador. Fonte: Elaborado pelo autor.

Massa inicial das amostras (kg) (a)	Tempo estimado de liofilização em horas (h) (b)	Consumo energético estimado para liofilizar as amostras (kW/h) (c)	Consumo energético médio estimado para liofilizar as amostras ((kW/h)/kg) (d)	Consumo energético estimado para liofilizar 72 kg de um congelador de filés de tilápia (kW/h) (e)	Tempo de funcionamento estimado do congelador para equivalência de consumo com o processo de liofilização (dias) (f)
4,5	77,7	45,84	10,18	732,96	400
3,5	55,7	32,86	9,38	675,36	369
2,5	37,8	22,30	8,92	642,24	350
1,5	39,5	23,30	15,53	1118,16	611

Tabela 3. Consumo energético estimado para liofilização de filés de tilápia e um congelador para armazenamento e conservação para a massa de 72 kg e um período de 730 dias (24 meses).
Colunas:
(a) Obtido da Figura 20
(b) Obtido da Figura 21

(c) Calculado através da relação de Consumo médio de 590 W/h (0,59 kW/h) e tempo estimado de liofilização em horas da coluna (b)
(d) Calculado através da relação entre colunas (c) e (a)
(e) Calculado através do consumo da coluna (d) e a massa de 72 kg.
(f) Dados obtidos da Figura 22 (meses estimados convertidos para dias). Exemplo: interpolação entre as retas de massa de 4,5 kg e reta de consumo do congelador.
Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 22, utilizou-se a escala de tempo em meses para facilitar a visualização. Na Tabela 3 os dados são detalhados em dias. Observa-se no gráfico que o consumo energético do processo de liofilização, para um determinado lote dos filés de tilápia, permanece o mesmo durante o período analisado. Uma vez realizada a liofilização, não haverá mais consumo energético. Em contrapartida, o Freezer Vertical Flex Frost Free 228 exigirá um consumo médio contínuo de 1,83 kWh/dia para conservação dos filés de tilápia.

O menor consumo energético médio estimado é de 642,24 kW/h durante o período de 24 meses e se refere ao lote de filés de tilápia com massa inicial de 2,5 kg. Já o maior consumo energético médio estimado é de 1118,16 kW/h, durante o mesmo período, é para o lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5 kg. Já o menor tempo para o equilíbrio de consumo energético médio estimado entre o Freezer Vertical Flex Frost Free 228 e os lotes de filés de tilápia é para a massa inicial de 2,5 kg e será alcançado em 0,96 anos (350 dias). O pior é de 1,67 anos (611 dias) para o lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5 kg.

A desvantagem do Freezer Vertical Flex Frost Free 228 é a necessidade de um fornecimento energético ininterrupto para manter a temperatura dos filés de tilápia. Outras condições são os cuidados com o congelador, como por exemplo, o número de abertura de porta por dia, a certificação de que a porta foi totalmente fechada e que a borracha de vedação está em perfeito estado de conservação, pois todas essas situações podem comprometer a qualidade do produto estocado.

O Freezer Vertical Flex Frost Free 228 tem a vantagem de não necessitar da etapa de liofilização para conservação dos filés de tilápia, nem o consumo energético associado, sendo um equipamento da linha branca comum no mercado. Por outro lado, o liofilizador tem um consumo pontual durante o processo de liofilização e ppós o processo de liofilização não há necessidade de manter um sistema de refrigeração contínuo. Ressalta-se que a liofilização estimada só será vantajosa a partir do 0,96 anos (350 dias) na melhor situação, considerando que o melhor resultado alcançado na liofilização foi de 32,00% para o lote de filés de tilápia com a massa inicial de 2,5

kg e tempo de liofilização de 36 horas. O tempo estimado para liofilizar a mesma massa de 2,5 kg e 30,00% de massa seca foi de 37,8 horas e isso também considera os resultados do congelador usado como base para comparação, pois outros modelos podem apresentar desempenhos diferentes, podendo ser objeto de estudos futuros.

17 ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO

De acordo com Fellows (2006), a condição ideal de desidratação é quando o alimento apresenta no máximo 8% de água, quando então, pode ser considerado um produto liofilizado. Nos testes realizados, esse resultado não foi alcançado nas amostras. O parâmetro de referência de 30,00% de massa final para os filés de tilápia, adotado neste estudo, como nível desejado para classificá-los como desidratados, não foi alcançado.

Essa condição baseou-se na somatória de 22,02% de massa seca de um filé de tilápia mais os 8% de água que, segundo Fellows (2006), é o percentual da água possível de encontrar no alimento desidratado. Observou-se que o maior tempo de liofilização e a redução da massa dos lotes de filés de tilápia resultaram na melhoria da eficiência energética do processo de liofilização, conforme se destacam respectivamente nas colunas Duração do teste (horas), Massa final (%) e Potência Média Consumida (W/h) da Tabela 1.

O melhor resultado alcançado foi de 32,00% para o lote de filés de tilápia com a massa inicial de 2,5 kg e tempo de liofilização de 36 horas. O pior foi de 74,67% para o lote de filés de tilápia com massa inicial de 4,5 kg e tempo de liofilização de 18 horas.

Possivelmente, esse cenário foi influenciado pelos ganhos entre água superficial e a que se encontrava ligada aos filés de tilápia, os quais eram diferentes em termos dimensionais e com variações de massa inicial. Conforme se constatou durante o processo de liofilização, ocorreram dois fenômenos distintos: desidratação primária, conhecida como sublimação da água aparente ou superficial, e desidratação secundária, conhecida como sublimação da água ligada à célula, Fellows (2006), resultando em uma taxa de secagem não linear.

No entanto, como pôde ser observado na coluna Massa final % (porcentual), da Tabela 1, o lote de filés de tilápia com a massa inicial de 4,5 kg teve o pior resultado na redução de massa quando comparado aos demais lotes. Esta piora foi causada

porque a bomba de vácuo de duplo estágio (Figura 7 D) atingiu o limite de eficiência, não conseguindo desidratar na mesma proporção das demais massas, por conseguinte, precisa ser mantida funcionando por um tempo maior, o que implica em maior consumo de energia.

Convém, portanto, destacar que o acréscimo de um vacuômetro com *data-logger* ao protótipo do liofilizador vertical ajudaria no monitoramento e avaliação do real problema enfrentado no processo de liofilização do lote de filés de tilápia com massa inicial de 4,5 kg.

De acordo com as estimativas realizadas, o consumo de energia, mesmo na melhor condição do experimento, caso fossem liofilizados 72 kg de filés de tilápia – massa de estocagem de um Freezer Vertical Flex Frost Free 228 –seriam necessários 0,96 anos (350 dias) de funcionamento do congelador para equivaler à mesma energia gasta. Esses dados podem ser vistos na coluna Tempo de funcionamento estimado do congelador para equivalência de consumo com o processo de liofilização (dias) da Tabela 3, para a massa inicial de 2,5 kg.

Deve-se ressaltar que para manter os filés de tilápia conservados, garantindo a segurança alimentar do produto, o gasto em energia elétrica de 641,67 kW/h do Freezer Vertical Flex Frost Free 228*,* na melhor situação de consumo energético – coluna Tempo de funcionamento estimado do congelador para equivalência de consumo com o processo de liofilização – para a massa inicial de 2,5 kg, não leva em consideração a manutenção do equipamento e o monitoramento constante para certificação de que o produto seja mantido com temperatura inferior a -18ºC.

Neste experimento, não foram analisados aspectos inerentes às mudanças nutricionais, sabor e outras características que possam diferenciar o produto após o processo de liofilização. Também não se considerou o tempo de conservação dos filés de tilápia liofilizados, pois a ênfase foi dada ao consumo energético para desidratação de filés de tilápia em um protótipo de liofilizador vertical.

18 CONCLUSÃO

O presente estudo buscou analisar o consumo energético durante o processo de liofilização de filés de tilápia no intuito de conhecer sua empregabilidade na indústria alimentícia e na cadeia produtiva de piscicultura na região do oeste do

Paraná. Na determinação do consumo energético do liofilizador vertical no processo de liofilização dos filés de tilápia foi utilizada a massa total de 48 kg, que foi dividida em 16 lotes de filés de tilápia, com amostras subdivididas em de massas de 1,5 kg, 2,5 kg, 3,5 kg e 4,5 kg. Já os tempos de liofilização dos lotes de tilápia foram 18 horas, 24 horas, 30 horas e 36 horas.

Os resultados do processo indicam a necessidade de modificações no protótipo, pois não se atingiu o valor de referência de 30,00% de massa final para os filés de tilápia como nível desejado para classificá-los como desidratados. O melhor resultado do processo de liofilização foi para o lote de filés de tilápia, com a massa inicial de 2,5 kg e tempo de liofilização de 36 horas, resultando na massa final de 32,00%, enquanto o pior foi para o lote de filés de tilápia, com a massa inicial de 4,5 kg e tempo de liofilização de 18 horas, resultando na massa final de 74,67%.

O menor resultado na redução da massa final de 4,5 kg foi causado porque a bomba de duplo estágio de vácuo, utilizada atingiu o limite de eficiência na retirada da umidade, não conseguindo desidratar os lotes de maior massa na mesma proporção dos demais. Por conseguinte, a bomba de vácuo, precisa ser mantida funcionando por um tempo maior, o que implica em maior consumo de energia.

O acréscimo de um vacuômetro com *data-logger,* ao protótipo do liofilizador vertical ajudaria no monitoramento e avaliação do problema no processo de liofilização do lote de filés de tilápia com massa inicial de 4,5 kg. Com os dados obtidos, a bomba de duplo estágio poderia ser melhor dimensionada e planejada numa nova versão do protótipo do liofilizador vertical.

De acordo com as estimativas realizadas, o consumo de energia, mesmo nas melhores condições do experimento, caso fossem liofilizados 72 kg de filés de tilápia – massa de estocagem de um Freezer Vertical Flex Frost Free 228 – seriam necessários 0,96 anos (350 dias) de funcionamento do congelador vertical para equivaler à mesma energia gasta para a massa inicial de 2,5 kg. O menor tempo para o equilíbrio de consumo energético médio estimado entre o congelador vertical e os lotes de filés de tilápia também se aplica para a massa inicial de 2,5 kg e será alcançado em 0,96 anos (350 dias). O pior é de 1,67 anos (611 dias) para o lote de filés de tilápia com massa inicial de 1,5 kg.

O consumo energético estimado para o processo de liolifização somente teria vantagens a partir de 0,96 anos (350 dias). Nessa comparação não estão sendo levados em considerações parâmetros, como, por exemplo, menor massa e menor

volume dos filés liofilizados, mas no consumo energético estimado para o processo de liofilização e o do congelador vertical. Por isso, pode-se afirmar que a implantação do processo de liofilização e do protótipo de liofilizador vertical, no estágio atual do equipamento e custos associados é complexa. Apesar de haver ainda margem para melhorias no protótipo, quando da elaboração de uma nova versão do liofilizador, acredita-se que seja mantida a dificuldade de implantação do equipamento devido a custos de energia associados ao processo de liofilização.

Uma solução possível para implantar o liofilizador seria a formação de uma Associação de Pequenos Produtores, centralizando a aquisição do equipamento e do processo num local específico, amortizando os custos do liofilizador vertical e do consumo energético entre vários produtores.

O presente estudo não faz uma comparação entre os custos com transporte dos filés liofilizados, que, por possuírem uma massa 70,00% menor, possibilitariam economia de combustível, facilidade de transporte, menor desgaste de equipamentos, redução de armazenamento, quando comparados com o processo de transporte tradicional do produto congelado. Essas condições ainda carecem de pesquisas e aprimoramento na busca de tecnologias de liofilização, com equipamentos mais específicos para atender a necessidade de liofilização do pescado que possam levar a melhores condições de comparação com congeladores verticais.

19 REFERÊNCIAS

AMÂNCIO, L.M., SILVA, W.L.C.P., SANTOS, V.M.L., 2012. **Liofilização: perspectivas para um novo mercado na região do Vale do São Francisco**. Revista Semiárido De Visu, 2, 326 -337.

COSTA, L.R.C., FERREIRA, M.M.J., BARBOSA, R.F.G., MELO, M.M., 2021**. Estudo da faixa de trabalho de um refrigerador visando a redução de consumo de energia** elétrica. Brazilian Journal of Development, 7, 10267-10275. https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-696

CURY, I.L.R., FILHO, R.P., GARCIA, V., 2021. **Geração de energia elétrica: reflexões para um diálogo interdisciplinar** 2021. p.8-27

FAO- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022. **The state of world fisheries and aquaculture 2022**. Towards blue transformation. Roma, FAO. https://doi.org/10.4060/cc0461en

FEIDEN, A.; RAMOS, M. J.; CHIDICHIMA, A. C.; SCHMIDT, C. M.; FIORESE, M. L.; COLDEBELLA, A. **A cadeia produtiva da tilápia no oeste do Paraná: uma análise sobre a formação de um arranjo produtivo local** 2018. Redes, v. 23, n. 2, p. 238-263.

FELLOWS, P.J., 2018. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 4 ed., Artmed, Porto Alegre-RS, p.944.

FERRIGOLO, F.R.G., ROSA, G.M., AGUIAR, R.S., DIAS, K.C., VILLANOVA, J.C.V., MARTINS, G. B., PRETTO, A., 2021. **Qualidade físico química e sensorial de filés de peixes de água doce**, in: Cordeiro, C.A.M. (Org.), Ciência e tecnologia do pescado: uma análise pluralista, 3, 166-176. https://doi.org/10.37885/210805756

GUIMARÃES, P.R.B., 2008. **Métodos Quantitativos Estatísticos**. Curitiba: IESDE Brasil S.A., p.245.

OETTER, M., SAVAY-DA-SILVA, L.K., GALVÃO, J.A., 2012. **Tecnologias emergentes prologam características do pescado *in natura*.** Visão Agrícola, 142-144.

RATTI, C. 2001. **Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review**. Jornal of Food Engineering. 49, 311-319.

20 CONCLUSÕES FINAIS

Com os 2 estudos finalizados, a realização dos experimentos pôde mensurar o consumo energético tanto para congelar como para liofilizar filés de tilápia. Sabendo que o processo de congelamento é uma das etapas do processo de liofilização, para determinar o consumo energético total, foi necessária a medição tanto do processo de congelamento quanto do processo de liofilização.

O experimento com o congelamento usando um congelador vertical com túnel de congelamento Blast Chiller propiciou informações sobre o ciclo de congelamento de filés de tilápia com o fluído refrigerante Freon R404A, que foi utilizado devido ao seu amplo uso nos sistemas de refrigeração comercial, o que facilita sua aquisição, suas características refrigerantes e seu impacto no meio ambiente. O fluído é conhecido por sua capacidade refrigerante eficiente, possuindo bom desempenho em ampla faixa de temperatura e isso reforça a necessidade de utilizar fluídos refrigerantes como esse pelos impactos mínimos que causa na camada de ozônio.

A medição do consumo energético durante o ciclo de congelamento dos filés de tilápia permitiu determinar qual é a etapa que mais demanda tempo e energia, chegando à conclusão de que é a de calor latente, no entanto, essa análise abre a possibilidade de novos estudos utilizando outros fluídos refrigerantes que possam ter menores consumos energéticos e tempos na etapa de calor latente do ciclo de refrigeração.

O processo de liofilização foi desenvolvido utilizando um liofilizador vertical desenvolvido pelo autor. O liofilizador ainda se encontra no estágio de protótipo e o processo de liofilização mensurou o consumo energético de 4 lotes de filés de tilápia de diferentes massas iniciais, submetidos a diferentes tempos de liofilização.

A utilização de lotes de filés de tilápia de massas e tempos diferentes de liofilização permitiu a comparação do consumo energético após o fim do tempo estipulado para o teste. De modo que a medição da massa final dos filés indica o quão eficiente foi o processo de liofilização e o consumo energético associado.

O objetivo do estudo foi a obtenção de 30,00% de matéria seca após a liofilização, porém essa meta não foi atingida nas condições dos testes realizados porque a bomba de duplo estágio à vácuo atingiu o limite de eficiência na retirada da umidade, não conseguindo desidratar os lotes de maior massa na mesma proporção

dos demais, resultando que precisa ser mantida em funcionamento por um tempo maior, o que implica em maior consumo de energia.

Outra avaliação realizada foi a comparação do consumo energético estimado de um congelador vertical e o consumo energético estimado para liofilizar massa equivalente de filés de tilápia que podem ser armazenados no congelador vertical. O período considerado para a comparação foi de 24 meses (730 dias) e o Freezer Vertical Flex Frost Free 228 utilizado como referência para a comparação é padrão de mercado com capacidade de armazenamento de 72 kg de filé de tilápia.

A comparação estimou que o processo de liofilização somente seria vantajoso, na melhor condição, a partir de 0,96 anos (350 dias), ou seja, para lotes de 2,5 kg e 36 h. Essa comparação é baseada somente no consumo energético, não levando em consideração outros fatores, como, por exemplo, menor massa e volume dos filés liofilizados, área de armazenamento e manutenção do congelador vertical.

21 REFERÊNCIAS

ANDRADE, D. C. **Modelagem e Valoração de Serviços Ecossistêmicos**: Uma contribuição da Economia Ecológica. 2010. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Econômico) - Instituto de Economia - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2010.

BATALHA, M. O.; SOUZA FILHO, H. M. de. **Gestão integrada da agricultura familiar**. São Carlos: Ed UFSCar, 2005. 359p.

BOSCOLO, W. R., HAYASHI, C., MEURER, F. 2002. **Digestibilidade aparente da energia e nutrientes de alimentos convencionais e alternativos para a tilápia do nilo (Oreochromis niloticus, L.)**. Revista Brasileira de Zootecnia, 31, 2, 539-545.

LOPES, M. A.; CONTINI, E. **Agricultura, sustentabilidade e tecnologia. Agroanalysis**, fev. 2012 p. 28-34

MARINS, B. R.; TANCREDI, R. C. P.; GEMAL, A. L. **Segurança alimentar no contextoda vigilância sanitaria: reflexes e práticas**. Rio de Janeiro: EPSJV, 2014.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAO apresenta avanços no combate às perdas e ao desperdício de alimentos.** 2019. Disponível em: http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1062706/. Acesso em: 29/06/2023.

FURUYA, W.M. **Tabelas brasileiras para nutrição de tilápias**. 21 ed. Toledo: GFM, 2010. 100 p.

ORDÓÑEZ PEREDA, J. A. **Tecnologia de Alimentos –** Componentes e Processos**.** Tradução Fátima Murad. Porto Alegre: Artmed, 2005. 294p.

VASCONCELOS, M. A. S.; MELO, A. B. F.; **Conservação de alimentos**. Recife: EDUFRPE. 2010. 15- 45p