



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA,
INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL PARA A
PROSPECÇÃO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS**

ALCIONE BENACCHIO

Foz do Iguaçu
2023



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL PARA A
PROSPECÇÃO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS**

ALCIONE BENACCHIO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
Coorientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton

Foz do Iguaçu
2023

AUTOMAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL PARA A PROSPECÇÃO DE TÉCNICAS SUSTENTÁVEIS

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
UNILA

Coorientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton
UNILA

Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado
UNILA

Prof. Dr. Diego Dutra Zontini
IFPR

Profa. Dra. Priscila Ferri Coldebella
UDC

Profa. Dra. Maria Salete Marcon Gomes Vaz
UEPG

Prof. Dr. Warley Gramacho da Silva
UFT

Foz do Iguaçu, 30 de outubro de 2023.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

B456

Benacchio, Alcione.

Automação e otimização da produção de Cerveja Artesanal para a prospecção de técnicas sustentáveis / Alcione Benacchio. - Foz do Iguaçu - PR, 2023.
97 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu-PR, 2023.

Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.

Coorientador: Janine Padilha Botton.

1. Monitoramento de produção. 2. Metodologia experimental. 3. Água. 4. Energia. 5. Coleta de dados. 6. Internet das Coisas. I. Arrieche, Leonardo da Silva. II. Botton, Janine Padilha. III. Título.

CDU 663.2

AGRADECIMENTOS

Dizem que Deus atende às nossas orações da maneira que precisamos, não do jeito que desejamos. Acredito que foi essa divina providência que tornou minha jornada neste doutorado tão enriquecedora. Tive a oportunidade de conhecer professores excepcionais e colegas brilhantes que foram fonte de suporte e amparo nos momentos difíceis.

Agradeço à Secretaria e a todos os técnicos administrativos que trabalham e oferecem suporte às ações realizadas pelo PPGIES. Agradeço também ao NIT-UNILA, Núcleo de Inovação e Tecnologia, pelas orientações e auxílio no processo de registro do software desenvolvido nesta pesquisa.

À Coordenação do PPGIES, conduzida pela Professora Dra. Caroline da Costa Silva Gonçalves, e a todos os professores do programa, expresse minha gratidão por sua presteza, dedicação e urbanidade em todos os momentos, especialmente durante o período tão difícil e triste que foi o da pandemia de COVID-19.

Ao meu orientador, Professor Dr. Leonardo da Silva Arrieche, agradeço por ter acreditado e confiado em mim, pela paciência, visão e acompanhamento contínuo da minha pesquisa. Sua experiência e perspicácia em identificar e antecipar problemas foram determinantes para atingir os objetivos deste trabalho. Minha mais profunda e sincera admiração.

À minha coorientadora, Professora Dra. Janine Padilha Botton, agradeço pelo seu apoio, constante disponibilidade e por estar ao meu lado em momentos tão desafiadores. Sua ajuda na organização da pesquisa e as valiosas perspectivas que compartilhou comigo me ensinaram muito. Obrigado pela dedicação, empatia e profissionalismo.

Agradeço à minha família pelo amor incondicional, por compreenderem minha ausência e pelo incentivo e apoio. Agradeço ao meu filho Eduardo, cuja alegria sempre foi um farol de esperança. E, principalmente, agradeço à minha querida esposa Juliana, cuja inteligência, resiliência e coragem inabalável me inspiram e me impulsionam adiante.

Dedico este trabalho a minha família, em especial ao meu pai Salvador (*in memoriam*), que foi a pedra fundamental na construção do meu caráter e jornada.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre
os ombros de gigantes.”*

Isaac Newton

BENACCHIO, Alcione. Automação e Otimização da Produção de Cerveja Artesanal para a Prospecção de Técnicas Sustentáveis. 2023. 96 f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu.

RESUMO

Para atender a um amplo mercado consumidor, a indústria cervejeira utiliza grandes plantas automatizadas. Isso permite produzir cervejas de forma otimizada, garantindo repetibilidade na obtenção de um produto com características consistentes e minimização dos custos. Por outro lado, microcervejarias possuem processos predominantemente manuais, priorizando a elaboração de produtos diferenciados e maior valor agregado, para um público mais restrito. A produção de cervejas diferenciadas e que eventualmente podem utilizar matérias-primas locais demandam experimentos que avaliem a sua viabilidade. Nesse contexto experimental, reproduzir os métodos das microcervejarias torna-se desafiador devido à escala de produção e os equipamentos disponíveis. Esse aspecto é amplificado ao considerar que a produção sustentável se tornou ponto central no processo produtivo. Em relação ao consumo de água e energia, as grandes cervejarias têm processos automatizados e eficientes para coleta de dados, enquanto microcervejarias e ambientes experimentais tendem a operar manualmente, o que dificulta a obtenção desses dados. Por isso, o monitoramento automatizado e rigoroso dos recursos é uma ferramenta importante para cervejeiros artesanais e pesquisadores. O controle da temperatura em fases como a mosturação e fervura, assim como o registro do consumo de água e energia, são frequentemente baseados em estimativas, dada a falta de técnicas de medição integradas e precisas. Para atender a essa demanda, foi implementado um protótipo para produção de cerveja em escala de bancada, que realiza a coleta, monitoria e armazenamento de dados produtivos, consumo de água e energia. Suas operações são executadas através de um módulo de interpretação de instruções que possibilita ao pesquisador parametrizar os experimentos de acordo com sua finalidade. O protótipo consiste em três componentes principais: uma planta para aquecimento e processamento do mosto cervejeiro; um módulo de controle que gerencia a recepção de dados de sensores; e um módulo de acionamento para automatização das operações. O software envia as instruções programáveis parametrizadas para realizar as operações, e os dados coletados são transmitidos e armazenados na nuvem. Utilizando o protótipo e a metodologia de superfície de resposta em um planejamento experimental de 2^3 , com 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, foram obtidos os dados de consumo energético, gravidade original e produtividade. Após a realização da análise experimental, foram aplicadas funções de desejabilidade para determinar uma resposta única para a otimização. Os testes com o protótipo mostraram variabilidade experimental com relação a gravidade original de 0,2%, com uma margem de erro de 0,1%. Para otimização utilizando múltiplas variáveis de resposta (kWh, gravidade original e produtividade), o modelo preditivo construído utilizando as funções de desejabilidade determinou um ponto de otimização, validado por experimentos posteriores que apresentaram uma variação inferior a 5%. Portanto, os testes com o protótipo confirmaram sua capacidade de executar tarefas programadas, orientar o experimento e coletar dados precisos. Adicionalmente, os resultados obtidos através do planejamento experimental evidenciaram o potencial de otimização da produção de cerveja em escala reduzida, conciliando produtividade e sustentabilidade. Posteriormente, outros planejamentos experimentais serão realizados através do protótipo, o que irá ampliar a base de conhecimento e possibilitar novas análises.

Palavras-chave: Monitoramento de produção, Metodologia experimental, Água, Energia, Coleta de dados, Internet das Coisas.

BENACCHIO, Alcione. Automatización y optimización de la producción de cerveza artesanal para la prospección de técnicas sostenibles. 2023. 96 f. Tesis (Doctorado en Energía y Sostenibilidad) – Universidad Federal de Integración Latinoamericana (UNILA), Foz do Iguaçu.

RESUMEN

Para atender a un amplio mercado de consumidores, la industria cervecera utiliza grandes plantas automatizadas. Esto les permite producir cervezas de forma optimizada, garantizando la repetibilidad en la obtención de un producto con características homogéneas y minimizando los costos. Por otro lado, las microcervecerías tienen procesos predominantemente manuales, priorizando la producción de productos diferenciados y de mayor valor añadido para un público más restringido. La producción de cervezas diferenciadas que pueden utilizar materias primas locales requiere experimentos para evaluar su viabilidad. En este contexto experimental, replicar los métodos de las microcervecerías es un desafío debido a la escala de producción y al equipo disponible. Este aspecto se intensifica cuando se considera que la producción sostenible se ha convertido en un elemento central del proceso de producción. En cuanto al consumo de agua y energía, las grandes cervecerías disponen de procesos automatizados y eficientes para la recolección de datos, mientras que las microcervecerías y los entornos experimentales suelen operar de manera manual, lo que dificulta la obtención de estos datos. Por este motivo, el control automatizado y riguroso de los recursos es una herramienta importante para los cerveceros artesanos y los investigadores. El control de la temperatura en fases como la maceración y la ebullición, así como el registro del consumo de agua y energía, suelen basarse en estimaciones, dada la falta de técnicas de medición integradas y precisas. Para responder a esta demanda, se implementó un prototipo de producción de cerveza a escala de laboratorio, que recoge, monitorea y almacena datos de producción, consumo de agua y energía. Sus operaciones se llevan a cabo mediante un módulo de interpretación de instrucciones que permite al investigador configurar los experimentos en función de su finalidad. El prototipo consta de tres componentes principales: una planta para calentar y procesar el mosto cervecero; un módulo de control que gestiona la recepción de los datos de los sensores; y un módulo de accionamiento para automatizar las operaciones. El software envía instrucciones programables configuradas para realizar las operaciones, y los datos recogidos se transmiten y almacenan en la nube. Utilizando el prototipo y la metodología de superficie de respuesta en un diseño experimental 2^3 con 4 puntos centrales y 6 axiales, se obtuvieron datos sobre consumo energético, gravedad original y productividad. Tras realizar el análisis experimental, se aplicaron funciones de deseabilidad para determinar una única respuesta para la optimización. Las pruebas con el prototipo mostraron una variabilidad experimental en relación con la gravedad original del 0,2%, con un margen de error del 0,1%. Para la optimización utilizando múltiples variables de respuesta (kWh, gravedad original y productividad), el modelo predictivo construido utilizando las funciones de deseabilidad determinó un punto de optimización, validado por experimentos posteriores que mostraron una variación inferior al 5%. Por tanto, las pruebas con el prototipo confirmaron su capacidad para realizar las tareas programadas, guiar el experimento y registrar datos precisos. Además, los resultados obtenidos por el diseño experimental mostraron el potencial de optimización de la producción de cerveza en pequeña escala, conciliando productividad y sostenibilidad. Posteriormente, se llevarán a cabo otros planes experimentales utilizando el prototipo, lo que ampliará la base de conocimientos y permitirá realizar nuevos análisis.

Palabras-clave: Monitorización de la producción, Metodología experimental, Agua, Energía, Recogida de datos, Internet de las Cosas.

BENACCHIO, Alcione. Automation and Optimization of Craft Beer Production to Explore Sustainable Techniques. 2023. 96 f. Tese (PhD in Energy and Sustainability) – Federal University of Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

In order to serve a wide consumer market, the brewing industry uses large automated plants. This allows them to produce beer in an optimized way, ensuring repeatability in obtaining a product with consistent characteristics and minimizing costs. However, microbreweries have predominantly manual processes, prioritizing the production of differentiated products and higher added value, for a smaller consumer market. The production of differentiated beers that may use local raw materials requires experiments to evaluate their viability. In this experimental context, reproducing the methods of microbreweries becomes challenging due to the scale of production and the equipment available. This aspect is amplified when considering that sustainable production has become a central issue to the production process. With regard to water and energy consumption, large breweries have automated and efficient processes for collecting data, while microbreweries and experimental environments tend to operate manually, which makes it difficult to obtain this data. For this reason, automated and precise monitoring of resources is an important tool for craft brewers and researchers. Temperature control in phases such as mashing and boiling, as well as recording water and energy consumption, are often based on estimates, given the lack of integrated and accurate measurement techniques. To meet this demand, a bench-scale beer production prototype was implemented, which collects, monitors and stores production, water and energy consumption data. Its operations are carried out through an instruction interpretation module that allows the researcher to parameterize the experiments according to their purpose. The prototype consists of three main components: a plant for heating and processing beer wort; a control module that manages the reception of sensor data; and a drive module for automating operations. The software sends parameterized programmable instructions to carry out the operations, and the data collected is transmitted and stored in the cloud. Using the prototype and the response surface methodology in an experimental design of 2^3 , with 4 central points and 6 axial points, data was obtained on energy consumption, original gravity and productivity. After carrying out the experimental analysis, desirability functions were applied to determine a single response for optimization. Tests with the prototype showed experimental variability in relation to the original gravity of 0.2%, with a margin of error of 0.1%. For optimization using multiple response variables (kWh, original gravity and productivity), the predictive model built using the desirability functions determined an optimization point, validated by subsequent experiments that showed a variation of less than 5%. Therefore, the tests with the prototype confirmed its ability to carry out programmed tasks, guide the experiment and collect accurate data. In addition, the results obtained through experimental planning showed the potential for optimizing beer production on a reduced scale, reconciling productivity and sustainability. Subsequently, other experimental plans will be carried out using the prototype, which will expand the knowledge base and enable new analyses.

Keywords: Production monitoring, Experimental methodology, Water, Energy, Data collection, Internet of Things.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo de produção de cerveja	21
Foto 1 – Produção de cerveja artesanal amadora	23
Foto 2 – Equipamento elétrico de produção de cerveja artesanal	24
Foto 3 – Microcervejaria	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de temperatura de atuação enzimática	22
Tabela 2 – Grist de maltes.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS

BIAB	Brew in a bag
ESP	Espressif Systems Processor
GPIO	General-Purpose Input/Output
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
hL	Hectolitro
I/O	Input/Output
IBU	International Bitterness Units
IoT	Internet of Things
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
O.G.	Original Gravity
pH	Potencial de hidrogênio
RAM	Random Access Memory
RSM	Response Surface Methodology

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. HISTÓRIA DA CERVEJA	17
2.2. MATÉRIAS-PRIMAS	18
2.2.1. Água.....	18
2.2.2. Malte.....	18
2.2.3. Lúpulo.....	19
2.2.4. Levedura	20
2.3. ETAPAS DE PRODUÇÃO.....	21
2.4. EQUIPAMENTOS.....	22
2.4.1. Cervejeiros Amadores.....	22
2.4.2. Microcervejarias	24
2.4.3. Indústria Cervejeira	25
2.5. CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PRODUÇÃO.....	26
2.6. TECNOLOGIAS.....	27
2.6.1. Internet das Coisas.....	27
2.6.2. Hardware para Internet das Coisas	28
2.6.3. Computação em Nuvem	29
2.6.4. Comunicação de Dados	29
3. METODOLOGIA E RESULTADOS.....	31
3.1. PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO (APÊNDICE A)	31
3.2. PROTÓTIPO DE BANCADA AUTOMATIZADO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA: SISTEMA PRECISO, ESTÁVEL E SUSTENTÁVEL (APÊNDICE B).....	32
3.3. OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÕES DE DESEJABILIDADE (APÊNDICE C)	34
4. CONCLUSÕES	36
5. REFERÊNCIAS	38
6. APÊNDICE A – PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO	41
7. APÊNDICE B – PROTÓTIPO DE BANCADA AUTOMATIZADO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA: SISTEMA PRECISO, ESTÁVEL E SUSTENTÁVEL.....	60
8. APÊNDICE C – OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÕES DE DESEJABILIDADE.....	79
9. ANEXO 1 – REGISTRO DE SOFTWARE	97

1. INTRODUÇÃO

Cervejarias de grande porte buscam aprimorar constantemente seus métodos produtivos para reduzir custos e manter a qualidade do produto, o que as mantém competitivas no mercado. Porém, a otimização na produção de cerveja enfrenta desafios devido as diversas variáveis relacionadas aos processos, como rampas de temperatura, relação água/malte, a água usada na lavagem dos grãos e as diversas matérias-primas que podem ser utilizadas na sua produção.

Diante desses desafios, a indústria cervejeira de grande porte utiliza plantas automatizadas com sistemas controladores programáveis e conta com uma equipe de operadores experientes, que monitoram e acompanham todas as etapas do processo produtivo.

Essa combinação de tecnologia e experiência profissional garante o uso mais eficiente de insumos, energia e água. Outra vantagem dos sistemas automatizados está relacionada à segurança alimentar, pois permitem identificar problemas que podem impactar a qualidade do produto e os custos de produção.

Em contraste, microcervejarias e produtores artesanais enfrentam outros desafios. Muitas vezes as etapas produtivas são realizadas por apenas um técnico, com operações predominantemente manuais. A limitação de recursos de automação implica que a coleta de dados, quando feita, seja executada de forma manual e dificulta a otimização dos processos. Desta forma, o processo de monitoria da produção fica mais suscetível a erros humanos e perda de informações.

O monitoramento e otimização dos recursos por cervejeiros artesanais e pesquisadores são essenciais. Processos, como a monitoria da temperatura nas etapas de mosturação e fervura e o consumo de água e energia, são apenas estimados por falta de métodos integrados e precisos de medição.

Além dos custos de produção, que são de extrema importância para a indústria e as microcervejarias, a sustentabilidade no processo produtivo se tornou um ponto central, destacando a relevância de aferir com precisão o consumo de água e energia.

Por isso, em um aspecto mais amplo do desenvolvimento sustentável, Smil (2016) ressalta que é necessário a utilização racional e moderada de recursos e buscar formas de reduzir o consumo de energia. Adicionalmente, o autor também destaca que a disponibilidade e extração de recursos naturais é uma forma indispensável para a manutenção e o avanço da civilização, e aponta algumas formas de reduzir o impacto desse processo.

Para Smil (2016) a substituição de materiais, reciclagem aprimorada e reutilização, são pontos centrais desses argumentos. Sugere que o aperfeiçoamento no design de produção pode contribuir para o aproveitamento de materiais. Reavaliação de processos fabris por métodos mais racionais e menos dispendiosos. E conclui com a intensificação da reciclagem e incentivos fiscais para substituição de materiais.

Essa estratégia pode apresentar vantagens associadas aos custos de produção e transporte. Além disso, uma logística facilitada pode contribuir para reduzir o impacto ambiental, por diminuir o uso de combustíveis fósseis. Produtores também podem ser beneficiados por uma cadeia produtiva local, e conseqüentemente contribuir para o desenvolvimento econômico regional.

Diversas pesquisas no Brasil têm abordado o uso de matérias-primas alternativas de cultivo local na produção cervejeira. Como exemplos, Venturini Filho e Cereda (1998) analisou a utilização da mandioca, enquanto Trindade (2016) realizou experimentos com a amora e Valentin et al. (2021) o umbu cajá. O uso dessas matérias-primas demonstrou além da viabilidade, o desenvolvimento de um produto diferenciado e maior valor agregado.

No entanto, estabelecer um comparativo entre esses estudos que utilizam matérias-primas locais pode ser um desafio, visto que utilizam metodologias diferentes para a realização de seus experimentos. Esse questionamento vai além do que se propõe a pesquisa dos autores, mas que podem impactar na produção cervejeira.

Ainda assim, se for ignorado o fato metodológico de produção e a forma de aferir dados, nenhum dos estudos analisados apontou o consumo energético e água total utilizada para a realização dos experimentos, dados relevantes para a sustentabilidade.

Portanto, monitorar e registrar os dados históricos de produção experimental, pode auxiliar os pesquisadores a aprimorarem processos e otimizar o consumo de energia e água. Por isso, uma metodologia para realizar experimentos em escala de bancada, de maneira a simular o processo de produção de cerveja artesanal, torna-se relevante.

O presente trabalho propõe um protótipo que automatiza e padroniza a produção de cerveja em escala experimental, bem como a coleta de dados para análises. Esta abordagem visa garantir a consistência dos resultados e a confiabilidade dos dados experimentais, bem como contribuir para o consumo e produção responsáveis.

Com base nos aspectos apresentados, este trabalho buscou:

- Implementar um protótipo para produção de cerveja em escala de bancada (4-5 litros), que realiza coleta, monitoria e armazenamento de dados das etapas produtivas, consumo de água e energia;
- Desenvolver um módulo de interpretação de instruções, para possibilitar a produção de cerveja de forma parametrizada de acordo com as necessidades experimentais;
- Otimizar o processo produtivo, através da análise dos dados coletados durante um planejamento experimental utilizando a metodologia de superfície de resposta e funções de desejabilidade.

Esta tese está estruturada como segue. Capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica sobre a história, as matérias-primas base utilizadas na elaboração da cerveja, etapas de produção e os equipamentos utilizados em diferentes escalas de fabricação. Adicionalmente, as principais tecnologias utilizadas no desenvolvimento do protótipo.

No Capítulo 3 são introduzidas as metodologias e resultados através de uma apresentação dos artigos produzidos durante o desenvolvimento desta tese e disponíveis na íntegra nos Apêndices. Inicialmente, a pesquisa que possibilitou compreender o contexto da automação no ambiente de produção de cerveja artesanal está descrita no Apêndice A. Na sequência, o Apêndice B descreve os detalhes relacionados a construção do protótipo, funcionamento do software e resultados de eficiência com relação ao consumo de água e energia. No Apêndice C é realizada uma análise experimental utilizando superfície de resposta e funções de desejabilidade que determinou um ponto de otimização utilizando múltiplas respostas.

Finalmente, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DA CERVEJA

Historiadores concordam que a agricultura deve ter sido iniciada por volta de 9000 a.C. O cultivo de grãos como sorgo, cevada e trigo pode ter exercido influência nesse desenvolvimento, dado que esses alimentos podiam ser armazenados por longos períodos, permitindo seu consumo em momentos de escassez e possibilitou à humanidade a fixação em comunidades. O armazenamento desses grãos era realizado em vasos, posteriormente eram transformados em farinha e depois em pão (TSCHOPE, 2001).

Uma possibilidade levantada pelos historiadores para a produção das primeiras cervejas, é que ao serem armazenados em vasos os grãos podem ter sido humedecidos pela chuva, o que fazia os grãos germinarem e se tornarem doce. Ao perceberem que o grão se tornava doce e agradável, produziam uma mistura de malte e água. Esse caldo, ao ficar por algum tempo exposto era contaminado por microrganismos, iniciando o processo de fermentação, resultando em um produto rudimentar que conhecemos hoje como cerveja. Ao longo do tempo, a cerveja esteve presente no cotidiano de diversas regiões do mundo, como a Mesopotâmia, China, Egito, Grécia, Roma, Trácios e Celtas, povos que habitaram diversas regiões da Europa (MORADO, 2017).

A primeira cervejaria do Brasil foi instalada em Recife, em uma das casas do governador Maurício Nassau, o palácio La Fontaine em 1640. O cervejeiro responsável era Dirck Dix, mas a fabricação e distribuição só teve início depois de abril de 1641 e funcionou por quatro anos, até que teve suas atividades encerradas com a partida de Nassau e o fracasso da colonização holandesa (ROTOLO & MARCUSSO, 2019).

Com a vinda de imigrantes europeus e seus respectivos costumes alimentares, surgiu a demanda por cerveja no Brasil. Inicialmente, com produção artesanal, ganhou impulso em 1860 com a fundação de novas cervejarias. Posteriormente essa indústria enfrentou desafios na importação de matérias-primas devida a primeira guerra mundial. Com a falta de matérias-primas, cervejeiros brasileiros adaptaram seus métodos e matérias-primas, utilizando ingredientes alternativos, como milho, arroz e trigo. Além disso, as técnicas de fabricação de cerveja introduzidas pelos imigrantes desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento da indústria cervejeira no país (LIMBERGER, 2013).

2.2. MATÉRIAS-PRIMAS

Em 1516 foi estabelecida a Lei da Pureza (*Reinheitsgebot*), na Baviera. Definia que as cervejas alemãs deveriam ser elaboradas estritamente com malte de cevada, lúpulo e água. Na época, a microbiologia não tinha evoluído o suficiente para reconhecer a levedura, não a incluindo como ingrediente, por isso a fermentação era considerada um fator divino do processo. Apesar de não ser mais obrigatória na Alemanha, a legislação sublinha a relevância dos ingredientes e métodos na caracterização dos tipos de cerveja (MORADO, 2017).

A escolha dos maltes, lúpulos e leveduras, combinada com a relação entre eles, condições de temperatura e duração das etapas nos processos de fabricação e as técnicas de maturação, armazenamento e embalagem, resulta em uma vasta gama de estilos cervejeiros (TSCHOPE, 2001).

2.2.1. Água

A água usada na fabricação de cerveja, pode ser proveniente de várias fontes, subterrânea, rios ou nascentes. Deve ser inodora e incolor, a presença de impurezas, contaminantes ou minerais em excesso na água pode levar a sabores e odores indesejados na cerveja. No entanto, já existem tecnologias de tratamento da água para que esta, tenha as características desejadas (KUNZE, 2014).

Caracterizada como o solvente universal, a água possibilita dissolver compostos iônicos como os sais minerais (MOSHER, 2015). Sua composição é determinante na fabricação de cerveja, com o pH sendo um componente entre vários a serem considerados. O impacto dos minerais presentes na água é mais pronunciado no processo de mosturação do que o pH isoladamente (PALMER & KAMISNKI, 2013).

Compondo até 90% da matéria-prima, a água interage com a química da mosturação e por isso o cuidado com a fonte é de máxima importância e diversos aspectos devem ser considerados na análise da água que será utilizada (PALMER & KAMISNKI, 2013).

2.2.2. Malte

O malte é uma matéria-prima desenvolvida a partir de grãos de cevada. Grãos como o centeio e o trigo também podem ser maltados. No entanto o mais utilizado é o grão de cevada. Para que o grão seja transformado em malte ele passa por um processo chamado malteação, que facilita a

conversão de açúcares durante a mosturação. Ao passar por esse processo, o teor de enzimas que auxiliam na produção do mosto e na quebra do amido em açúcares é elevado (MORADO, 2017).

O processo de malteação consiste em três etapas: maceração, germinação e secagem. Durante a germinação, ocorre a modificação dos componentes internos do grão de cevada, resultando na formação de enzimas e na degradação da estrutura proteica. Ao longo da história, o processo de malteação vem sendo otimizado, o que resulta em uma cerveja de melhor qualidade, além de reduzir custos operacionais (MALLET, 2021).

Uma dessas enzimas é a α -amilase, que desempenha um papel fundamental na conversão do amido do malte em açúcares fermentáveis. Ela quebra ligações específicas no amido, liberando açúcares que serão usados em etapas posteriores da fermentação. Essa ação também auxilia na liquefação do malte, reduzindo sua viscosidade (RANI, 2021).

Ao se modificar as condições de malteação e variedades da cevada é possível produzir diversos tipos de maltes, como o *pilsen* ou *pale ale*, muito comuns e usados na maioria das receitas (MORADO, 2017; MALLET, 2021).

Existem também diversos maltes especiais, com características únicas, como os caramelizados e torrados. O processo de caramelização dos açúcares internos nos maltes confere um sabor adocicado e uma cor mais viva a cerveja. Por outro lado, o malte chocolate ou café, com sua tonalidade escura, proporciona cervejas como *stout* e *porter* com notas de chocolate e café torrado.

O *grist* é um termo usado com frequência para se referir ao malte moído que é usado no processo de brassagem e a combinação entre os tipos diferentes de maltes. Ainda assim, diversos outros grãos podem ser utilizados na produção de cerveja. Além da cevada, grãos como trigo, aveia, arroz e milho também podem ser incorporados na composição como adjuntos (MORADO, 2017).

Adjuntos cervejeiros são ingredientes que podem substituir o malte na composição do *grist* para produção de cerveja. No Brasil, a Instrução Normativa N.º 65, de 10 de dezembro de 2019, define que eles podem representar até 45% do peso em relação ao extrato primitivo, seja em forma de malte ou de extrato de malte (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2019).

2.2.3. Lúpulo

Originário de diversas regiões do mundo, o lúpulo é uma planta trepadeira e possui diversas variedades. Possuem resinas que dão à cerveja o amargor e sabor característicos e são ricos em óleos aromáticos. Na produção cervejeira, apenas os cones das plantas femininas são utilizados

por sua maior concentração de resinas em comparação às plantas masculinas e a forma mais comum de distribuição é a peletiza (MORADO, 2017).

As variedades são estudadas há muito tempo e podem ser obtidas através de cruzamentos entre variedades, como o estudo de Ernest S. Salmon, que pesquisava variedades resistentes a pragas, mas também buscava combinar o alto teor de resina dos lúpulos norte-americanos, até mesmo algumas variedades selvagens, com o aroma dos lúpulos europeus. Os lúpulos norte-americanos apresentam maior quantidade de Alfa ácidos que os lúpulos europeus, e por isso possuíam maior poder conservante que as variedades inglesas. No entanto, os lúpulos americanos apresentavam sabores indesejáveis e por isso eram evitados (HIERONYMUS, 2020).

Cada variedade de lúpulo possui sabor e aroma distinto e os cervejeiros utilizam muitas vezes considerando sua composição e etapas de produção, como os lúpulos Amarillo, Citra e Galaxy, que são adicionados a seco durante a maturação. Lúpulos como Magnum e Crystal, comumente são utilizados na etapa de fervura. A combinação dessas técnicas e a utilização em quantidade e variedade de lúpulos pode ser uma ferramenta para adicionar aroma, sabor e amargor complexos a cerveja (HIERONYMUS, 2020).

2.2.4. Levedura

Pasteur foi responsável por um dos avanços mais significativos na produção de cerveja. Seus estudos sobre a fermentação da cerveja e do vinho em 1860, determinaram que o agente responsável pela fermentação era a levedura. Essa descoberta auxiliou em seus trabalhos posteriores sobre o antraz, raiva, cólera e outras doenças, contribuindo para o desenvolvimento das primeiras vacinas (MORADO, 2017).

A levedura é responsável por realizar a conversão dos açúcares presentes no mosto em álcool. A categoria de cepas *Saccharomyces cerevisiae* é utilizada para a produção de cervejas do tipo *ale*, e a *Saccharomyces pastorianus* para as cervejas do tipo *lager* (WHITE & ZAINASHEFF, 2020).

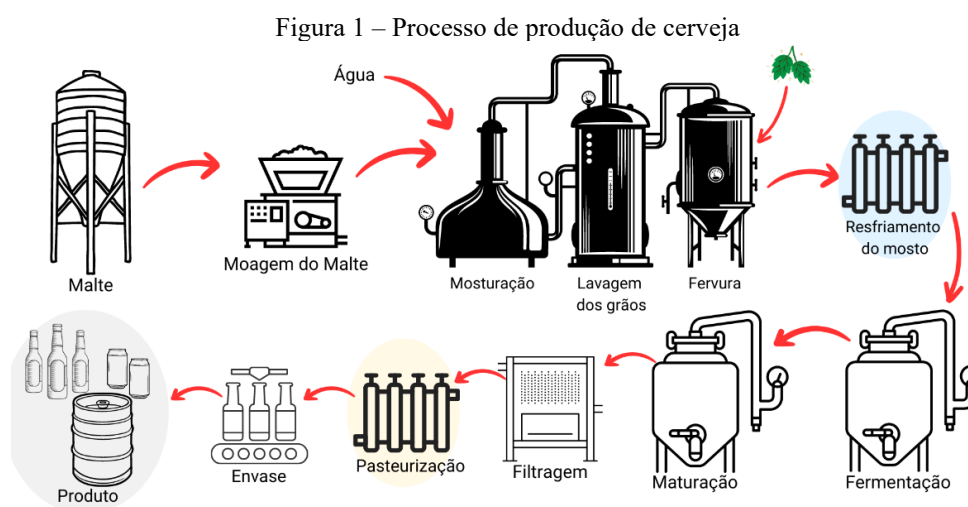
As cepas do tipo *ale*, fermentam em temperatura mais alta, entre 18 e 35°C, sendo esperado um caráter de fermentação, limpo, frutado e fenólico. As do tipo *lager*, fermentam em temperatura mais baixa entre 9 e 12°C e proporcionam a uma fermentação mais neutra e seca (WHITE & ZAINASHEFF, 2020).

2.3. ETAPAS DE PRODUÇÃO

Conforme estabelecido pela Instrução Normativa N.º 65, de 10 de dezembro de 2019, que determina os padrões de característica e qualidade para os produtos de cervejaria no Brasil, o Art. 7.º define o mosto como “solução em água potável de compostos oriundos da degradação enzimática do malte, com ou sem adjuntos cervejeiros e ingredientes opcionais, confeccionada através de processos tecnológicos apropriados” (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2019).

Essa normativa, está de acordo com a literatura, onde já existe um consenso a respeito das etapas produtivas. Embora seja possível realizar a produção de cerveja em quatro etapas básicas, moagem, mostura, fervura e fermentação. Utilizando equipamentos e técnicas diferentes, a indústria cervejeira e as microcervejarias podem adicionar outras etapas para melhorar a qualidade do produto.

Ainda que com variações em suas plantas, cervejarias possuem etapas de produção similares (MORADO, 2017; KUNZE, 2004 e MOSHER, 2015), como mostra a figura 1.



Fonte: o autor, 2023

O processo cervejeiro começa com a moagem, onde ocorre a quebra dos grãos e exposição do endosperma, aumentando a área superficial de contato do amido com as enzimas. Na fase de mostura e filtração, é realizada a adição e o aquecimento da água e adição do grist de malte. Este procedimento possibilita a ação enzimática e promove a extração e dissolução de compostos para obter um extrato fermentável. Realiza-se a separação do bagaço de malte do mosto. A lavagem dos grãos é realizada para maximizar o processo de produção e o aproveitamento dos grãos.

Alterações nas temperaturas favorecem a atuação de diferentes enzimas, possibilitando a conversão do amido em diferentes açúcares, o que possibilita a elaboração de diferentes perfis de cerveja. As principais estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de temperatura de atuação enzimática

Enzima	Temperatura (°C)	Produto
β -amilase	60 - 65	Maltose
α -amilase	70 - 75	Dextrinas
Dextrinase limite	55 - 60	Dextrina (cadeia linear)
Maltase	35 - 40	Glicose + glicose
Sacarase	50	Glicose + frutose

Fonte: MUXEL (2022)

Na sequência, a fervura do mosto é a etapa em que também se adiciona o lúpulo. Este processo permite a extração e isomerização das substâncias amargas do lúpulo, esterilização do mosto, formação e redução de compostos aromáticos, remoção de compostos voláteis de aromas indesejáveis e evaporação de água. O processo ocorre em temperaturas superiores a 98°C, por períodos entre 60 e 90 minutos. Posteriormente, a clarificação do mosto é realizada através de sedimentação ou centrifugação. Esta etapa envolve a remoção dos resíduos sólidos de lúpulo e outros subprodutos.

Para iniciar o processo de fermentação, é realizado o resfriamento do mosto através de um trocador de calor, baixando a temperatura do mosto de acordo com as especificações de inóculo da levedura. O mosto então é transferido para uma unidade de fermentação, onde é feita a adição da levedura, e mantida sob temperatura constante por um período variando entre 2 e 7 dias. Finalmente, na maturação ou fermentação secundária, a cerveja é armazenada para sedimentação de leveduras e outros resíduos em suspensão, por um período de 7 a 21 dias.

2.4. EQUIPAMENTOS

2.4.1. Cervejeiros Amadores

Cervejeiros artesanais domésticos ou amadores, podem utilizar uma variedade de técnicas para a produção de cerveja, como a técnica denominada BIAB, acrônimo em inglês que significa *brew in a bag*, ou infusão em uma bolsa. É comumente utilizada pelo cervejeiro artesanal iniciante, por poder ser realizada com utensílios de fácil improviso (MOSHER, 2015).

A técnica utiliza apenas um recipiente, geralmente em alumínio ou inox, para as etapas de mosturação e fervura. Os grãos são depositados em uma bolsa de tecido e mosturados em infusão como um sachê de chá. Após a conclusão da mostura, os grãos são suspensos, e uma breve lavagem dos grãos é realizada para tentar aproveitar o máximo potencial de conversão de amidos (PALMER, 2014).

Após terminar a filtragem, os grãos são retirados da tina de mostura, e é adicionada a água restante para realização da fervura. Concluída a fervura, a cerveja é resfriada em banho maria utilizando água fria e gelo, então, quando atinge a temperatura de 18°C, é colocado em um balde com tampa para realizar a etapa de fermentação (MOSHER, 2015).

Sistemas de produção utilizados por cervejeiros amadores podem variar muito, pois depende do preparo e planejamento deste cervejeiro. Um exemplo é apresentado na foto 1, na qual a marcação 1, mostra o recipiente usado para aquecimento da água. A transferência da água para outro recipiente pode ser por gravidade, ou bombeada mecanicamente através de uma válvula instalada no recipiente de aquecimento.

O recipiente utilizado para mosturação, demonstrado na marcação 2, possui uma válvula e um sistema de filtro que impede a saída dos grãos, conforme mostra na marcação 6 da foto 1. O recipiente na marcação 3 é usado para a fervura.

Foto 1 – Produção de cerveja artesanal amadora



Fonte: o autor, 2023

Válvulas, mangueiras de silicone e bombas elétricas de grau alimentício, são utilizadas para facilitar a transferência dos líquidos entre os recipientes, como disposto na foto 1, marcação 5.

Esse sistema pode ser desenvolvido usando alterações nas disposições dos recipientes utilizando a gravidade para a transferência reduzindo custo com bombas elétricas e simplificando as conexões e tubulações.

Nesse estágio, o cervejeiro artesanal geralmente já utiliza algum sistema trocador de calor mais eficiente que o banho maria. Geralmente utilizando trocadores de calor de imersão ou serpentinas, resfriadores de contrafluxo ou placas. Na foto 1 pode ser visto o trocador de calor de contrafluxo na marcação 4. Após o resfriamento da cerveja, esta é colocada em um recipiente fermentador de polietileno de alta densidade.

Outro equipamento que se tornou popular, são os equipamentos elétricos de produção de cerveja em um único recipiente, como mostra a foto 2. Seu funcionamento se baseia no princípio do BIAB, mas ao invés de utilizar uma bolsa de tecido, utilizam sistemas de fundo falso em materiais como alumínio ou o aço inox. Possuem recursos para controlar a temperatura de mostura, fervura e sistema de bombeamento para recirculação e transferência do mosto (MOSHER, 2015).

Foto 2 - Equipamento elétrico de produção de cerveja artesanal



Fonte: o autor, 2023

O aquecimento da água para a lavagem dos grãos deve ser realizado em recipiente separado. Sua transferência para realização deste processo, pode ser feita por gravidade como mostra na foto 2, marcação 1.

2.4.2. Microcervejarias

De acordo com os recursos financeiros ou por questões de legislação local, microcervejarias podem possuir muitas variações em sua estrutura. No entanto, em geral possuem uma sala de brassagem, onde utilizam tinas de mostura, clarificação e fervura, equipadas com sistema de controle de temperatura, sistemas de bombeamento para circulação hidrodinâmica e filtros para a separação do mosto dos resíduos, que auxiliam a extração dos açúcares durante a lavagem dos grãos, como mostrado na foto 3, marcação 1 (TSCHOPE, 2001).

O aquecimento nesses equipamentos pode ser realizado por meio de queimadores a gás ou ainda, para evitar a dispersão de calor e perda de recurso energético, algumas microcervejarias

possuem caldeiras de água ou vapor, como pode ser visto na foto 3, marcação 2, que aquecem de forma homogênea as tinas.

Foto 3 – Microcervejaria



Fonte: o autor, 2023

Para a etapa de fermentação, utiliza-se fermentadores cônicos (foto 3, marcação 3), também equipados com sistema de controle de temperatura, proporcionando um ambiente adequado para a fermentação de acordo com a cepa utilizada.

2.4.3. Indústria Cervejeira

Uma indústria química é composta por um conjunto de unidades de processamento integradas de forma sistêmica e racional, com o objetivo de transformar materiais crus em um produto desejado, de maneira economicamente viável e seguindo os requerimentos de segurança, especificações de produção, regulamentação ambiental e restrições operacionais (STEPHANOPOULOS, 1984).

São utilizados diversos equipamentos para realizar o processamento desses materiais como, reatores, trocadores de calor, destiladores, absorventes, evaporadores, entre outros. Esses equipamentos trabalham de forma que seus produtos e subprodutos possam ser transferidos por meio de encanamentos de um recipiente para o outro, até que o produto desejado seja obtido, envasado e distribuído. Esses processos devem garantir a segurança e produção de acordo com as especificações de cada produto (STEPHANOPOULOS, 1984).

Portanto, uma indústria cervejeira é um tipo de planta química desenvolvida especificamente para esta finalidade e dispõe de uma diversidade de equipamentos de grande porte para produções em larga escala.

2.5. CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO DE PRODUÇÃO

Ao elaborar uma cerveja é necessário definir o grist de maltes que será utilizado. O grist de maltes é a combinação entre os diferentes tipos de malte, com o objetivo de elaborar um produto de acordo com um determinado perfil (MOSHER, 2015). Na tabela 2, é demonstrado a estimativa de rendimento para um quilograma de grist de maltes, composto de 70% de malte pilsen, 20% de malte munich e 10% de malte carapils.

Tabela 2 – Grist de maltes

	Malte (kg) - 4% de Umidade		
	Pilsen	Munich	Carapils
Quantidade	0,700	0,200	0,100
Malte seco	0,670	0,190	0,100
Rendimento do malte	76%	80%	20%
Extrato	0,510	0,150	0,020
Extrato total	0,680		

Para determinar o rendimento, é necessário avaliar o processo de produção de acordo com o uso das matérias-primas. Cervejarias de médio e grande porte chegam a um rendimento em torno de 78%. Cervejarias artesanais ou microcervejarias podem ficar em torno de 70 e 73%. Essa diferença de resultados está ligada diretamente com os equipamentos e técnicas utilizadas durante a produção (TSCHOPE, 2001), como mostra a equação 1.

$$\frac{\% \text{ Rendimento} = A \times B \times C \times D}{E} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A = Volume de mosto em hL

B = Extrato sacarométrico - g/100g

C = Fator fixo de contração - 0,96

D = Gravidade específica

E = Quantidade de matéria-prima em kg transformada em extrato

Logo, usando os dados da tabela 2 e a equação 1 para estimar uma produção de 4,5 litros de mosto pós fervura:

$$\frac{\% \text{ Rendimento} = 0,045 \times 11,15 \times 0,96 \times 1,045}{0,680}$$

$$\% \text{ Rendimento} \approx 74\%$$

Com relação ao uso de lúpulo, é necessário calcular a quantidade de alfa-ácidos, para determinar o índice de amargor da cerveja, ou IBU (*International Bitterness Units*) (TSCHOPE, 2001). Na equação 2 é considerado alfa-ácidos em 5%, para produção 4,5 litros.

$$IBU = \frac{\text{Quantidade de Lúpulo (g)} \times \text{Utilização} \times \text{Alfa Ácido (\%)}}{\text{Volume do Mosto (L)}} \quad (\text{Equação 2})$$

$$IBU = \frac{8 \times 5}{4,5}$$

$$IBU \approx 8,8$$

Cervejas comerciais são elaboradas utilizando entre 8 e 12 IBU (PALMER, 2014). Adequando esse produto a uma expectativa geral comum.

2.6. TECNOLOGIAS

Com o amadurecimento das tecnologias computacionais de internet das coisas (*IoT – Internet of Things*) e computação em nuvem, novas possibilidades para o desenvolvimento de soluções estão se tornando tecnicamente viáveis, com baixo impacto econômico.

Para Silva et al. (2017), o dado é o foco central dessa evolução. Através das tecnologias disponíveis, coletar dados e transmitir para a nuvem é uma alternativa do ponto de vista econômico, por não demandar infraestrutura local.

2.6.1. Internet das Coisas

Ao observar a crescente necessidade de coleta e troca de dados entre dispositivos que inicialmente não podiam se comunicar, mas que devido à evolução tecnológica de sensores e dispositivos eletrônicos passou a ser possível, o professor Kevin Ashton do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) percebeu uma tendência e descreveu esse padrão de desenvolvimento tecnológico como Internet das Coisas (SILVA et al., 2017).

Este conceito é amplo e é aplicado a diversas áreas, tornando possível a troca de dados por relógios, sistemas de iluminação, eletrodomésticos, sistemas de irrigação, semáforos entre outros. Essa interconexão é tão profunda e pode elencar tantos elementos que tratam temas tão distintos, que houve a necessidade de dividir em subáreas, sendo as mais comuns os dispositivos vestíveis (*wearebles*), casas inteligentes (*smart homes*), cidades inteligentes (*smart cities*), indústria 4.0 (*industry 4.0*), agricultura 4.0 (*agriculture 4.0*), entre outros (DELSING, 2016).

Soluções em IoT são projetos complexos, pois necessitam de análise sobre sua aplicação, quais tecnologias serão empregadas, disponibilidade de funcionamento do equipamento e o desenvolvimento de sistemas que serão responsáveis por receber e processar os dados coletados. Esses fatores auxiliam no processo de tomada de decisões ou orientações que possam ser dadas aos seus usuários (SILVA et al., 2017).

2.6.2. Hardware para Internet das Coisas

A necessidade de coletar dados do mundo real para que possam ser analisados em busca de padrões, previsão e melhoria de resultados, mudou a forma como hardwares eram desenvolvidos pela indústria. Essa demanda impulsionou a aplicação de hardwares que foram criados para fins acadêmicos como o caso da plataforma Arduino, NodeMCU e RaspBerry Pi (KASWAN et al., 2020).

Esses microcontroladores possuem entrada e saídas (*I/O – Input/Output*), digitais e analógicas, podem ser ligados diretamente a energia, ou por se tratar de dispositivos de baixo consumo elétrico, serem ligados a baterias por longos períodos. Sua capacidade de processamento, memória e interfaces variam de modelo para modelo (PATEL e DEVAKI, 2019).

O gerenciamento de entrada e saída desses dispositivos são chamados de GPIO (*General Purpose Input Output*) e de acordo com os dispositivos utilizados para fazer a leitura, como sensores, relés, motores e drivers, são programados por software para realizar suas operações de entrada ou saída de dados. Alguns apontamentos sobre as plataformas:

- **Arduino:** É uma plataforma de baixo custo de desenvolvimento para sistemas embarcados, possui um microcontrolador Atmel, e por ser um hardware disponibilizado como plataforma hardware aberto, pode ser produzido por diferentes fabricantes. Possui diversos modelos que variam em capacidade de processamento e entradas e saídas (KASWAN et al., 2020).
- **Rasperry PI:** Desenvolvido como hardware aberto, utiliza um processador da família ARM, e inclui em sua composição recursos como Wi-Fi, bluetooth, memória RAM, usb e saída HDMI. Sua estrutura é a de um computador de pequeno porte e baixo consumo de energia, exigindo inclusive a instalação de um sistema operacional (PATEL e DEVAKI, 2019).
- **NodeMCU:** Fabricante da família de microcontroladores ESP, produzidos na China. É a plataforma mais competitiva em termos de custo, com diversos modelos. O

modelo mais popular é ESP8266, seguido pelo ESP32. Possuem uma estrutura de programação compatível com o Arduino, e possuem recursos como Wi-Fi e bluetooth já integrados (PATEL e DEVAKI, 2019).

2.6.3. Computação em Nuvem

O termo computação em nuvem ou *cloud computing*, é uma forma de expressar algo que engenheiros de redes de computadores já desenhavam em diagramas a muito tempo, tudo o que não está na rede local e está na internet, está na nuvem (TAURION, 2009).

Essa é uma tendência cada vez mais presente no dia a dia dos usuários de computadores. Com a popularização dos serviços de banda larga, a transmissão de dados está mais acessível e possibilita que usuários em locais remotos do globo possam ter acesso ao poder de processamento de um conjunto de tecnologias que processam dados com maior rapidez e oferecem uma gama de serviços sem a necessidade de uma infraestrutura para o usuário final ou empresa.

A computação em nuvem é um conjunto de recursos computacionais e tecnologias. Empresas como Google, Amazon, IBM e Microsoft, são fornecedores nesse seguimento. Serviços conhecidos como e-mail, edição de documentos, planilhas, agenda, armazenamento de arquivos são os mais comuns, no entanto, a gama de serviços vêm sendo ampliada e banco de dados de tempo real e aprendizado de máquina já fazem parte do escopo de serviços dessas companhias (TAURION, 2009).

Manter em uma infraestrutura local, os serviços como os mencionados que estão disponíveis na nuvem é caro. É necessário levar em consideração a aquisição de equipamento e pessoal técnico especializado para cada serviço necessário. Portanto, os serviços de nuvem possibilitam aos usuários e empresas o consumo por demanda, sem a necessidade de adquirir equipamentos, dispensando a contratação de pessoal especializado para sua manutenção.

2.6.4. Comunicação de Dados

MQTT significa, transporte de telemetria de enfileiramento de mensagens (*message queuing telemetry transport*). Tornou-se um protocolo importante para comunicação entre dispositivos IoT por ser específico para pequenas mensagens, ideal para dados de sensores. Seu funcionamento se dá através de um *Broker*, que pode ser instalado em um computador da rede local ou através de um serviço de nuvem (AMORIM SILVA *et al*, 2017).

É função do *Broker* gerenciar a segurança desse processo e garantir o serviço de envio e recebimento mensagens dos publicadores, filtrando-as, e enviando mensagens para todos os clientes cadastrados, através de um processo chamado publicar/subscrever (*publish/subscribe*). Usuários criam tópicos que são pequenas variáveis, prontas para receber dados. Quando usuários subscrevem aos tópicos de interesse, podem receber essas informações. Os publicadores, são responsáveis por enviar dados para essas variáveis de interesse (SONI e MAKWANA, 2017).

3. METODOLOGIA E RESULTADOS

A pesquisa desenvolvida e os resultados apresentados nesta tese foram descritos na forma de artigos. Dispostos nos apêndices, estes representam as etapas de realização desta pesquisa. O artigo contido no Apêndice A foi publicado na Revista Orbis Latina. O artigo exposto no Apêndice B foi aceito pela Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales, e o Apêndice C está em revisão para submissão.

3.1. PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO (APÊNDICE A)

O estudo foi iniciado com uma pesquisa integrativa sobre os processos produtivos da indústria cervejeira e das microcervejarias, com o objetivo de identificar suas diferenças e especificidades. Também foi buscado compreender a produção de cerveja em relação aos aspectos de sustentabilidade e o papel da automação nesse contexto.

Através deste estudo, foi possível verificar um crescimento do mercado cervejeiro e como as microcervejarias artesanais tem se destacado. Por elaborarem uma variedade de cervejas com características distintas, apresentam um produto apreciado por um público que preza pela qualidade e sabores singulares.

Apesar disso, as microcervejarias enfrentam desafios relacionados à competitividade e custo de produção. Ainda assim, possuem a vantagem de poder inovar em processos, matérias-primas e contribuir para um desenvolvimento mais sustentável.

Diversos estudos têm explorado a inovação em matérias-primas e adjuntos, apresentando substituições e benefícios sem comprometer a qualidade da cerveja. Ingredientes diferenciados podem ser utilizados para produzir cervejas com características únicas, e auxiliar as microcervejarias na diversificação de sabores. Cervejarias comerciais buscam atender um público mais amplo, restringindo-se a sabores mais neutros e a matérias-primas convencionais.

As indústrias de grande porte, com acesso a tecnologias avançadas e profissionais qualificados, utilizam sistemas automatizados para garantir a segurança alimentar e monitorar continuamente os processos produtivos. Com isso é capaz de identificar e corrigir possíveis riscos ao sistema, ao produto, evitando prejuízos.

As microcervejarias, no entanto, geralmente não possuem os mesmos recursos. Uma opção, em um nível mais simplificado, pode ser o uso de equipamentos desenvolvidos para Internet das Coisas para auxiliar no monitoramento, automação e coleta de dados de operações.

Plataformas como Arduino e Raspberry Pi podem ser opções de tecnologia para microcervejarias pela flexibilidade de prototipação. Com o uso de *Shields* nessas plataformas podem expandir recursos e funcionalidades dos seus sistemas com baixo custo, o que pode auxiliar em processos de produção, monitoramento e controle de qualidade.

O desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e controle de variáveis do processo cervejeiro, como temperatura, pressão e pH, pode auxiliar na realização de ajustes em tempo real e se tornar um recurso importante para a consistência do produto e reduzir erros operacionais.

Para que as microcervejarias se mantenham atualizadas existe a necessidade de inovação e experimentação, contrastando com a tendência das grandes cervejarias a seguir padrões estabelecidos. A flexibilidade e a capacidade de explorar novas oportunidades colocam as microcervejarias em uma posição favorável em um mercado em constante evolução, em um contexto de diversificação e busca por sabores diferenciados.

3.2. PROTÓTIPO DE BANCADA AUTOMATIZADO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA: SISTEMA PRECISO, ESTÁVEL E SUSTENTÁVEL (APÊNDICE B)

Na indústria cervejeira, os grandes produtores focam no aperfeiçoamento contínuo de seus métodos para reduzir custos e manter a qualidade do produto. No entanto, microcervejarias enfrentam desafios devido à falta de recursos de automação, tornando-as menos competitivas em relação ao custo do produto.

Inclusive, além destas diferenças na otimização dos processos produtivos, as cervejarias que utilizam sistemas automatizados também dependem de profissionais experientes para assegurar a eficiência.

Quando considerados os fatores geográficos, no Brasil, microcervejarias que produzem até 21.600 litros anuais, são menos eficientes em produção e consumo de recursos, e o mesmo pode ser dito sobre as microcervejarias americanas.

Antes da produção em larga escala, as indústrias realizam testes laboratoriais para assegurar a qualidade do produto, pois caso haja algum problema no produto, o prejuízo é alto.

Portanto, coletar e gerenciar esses dados é um desafio, requerendo planejamento e equipamentos específicos.

Aplicar técnicas de automação e coleta de dados em menor escala é outro desafio, principalmente ao se considerar os métodos e processos produtivos das grandes cervejarias, dada a falta de tecnologias adequadas para a produção cervejeira de pequeno porte.

Este trabalho apresenta um protótipo automatizado que utiliza recursos de Internet das Coisas e Computação em Nuvem para a produção experimental de cerveja artesanal em escala reduzida. O sistema registra as etapas produtivas, dados de sensores e emite alertas com detalhes de operação. Estes registros permitem o acompanhamento e revisão histórica da produção, contribuindo para a identificação de métodos que maximizem a eficiência no uso de recursos, como matérias-primas, água e energia.

O protótipo é estruturado em três componentes distintos. A estrutura da planta, é uma unidade dedicada às etapas de aquecimento da água, mosturação, fervura e resfriamento do mosto. Para gerenciar as operações, um hardware para Internet das Coisas foi utilizado para construir um módulo de controle, baseado na arquitetura Raspberry Pi B+ que processa informações dos sensores. Para gerenciar as tarefas que são realizadas pelo hardware, foi desenvolvido um software em Python, que envia instruções para executar as operações programadas e armazena os dados na nuvem. Desta forma, o protótipo é ferramenta para a realização de experimentos, gestão e coleta de dados.

Como forma de testar o sistema, foram realizadas quatro observações com o objetivo de medir a gravidade original (O.G.), consumo de energia e água. Para a O.G., apresentou resultados entre 1,043 e 1,045, com uma variação de 0,2% e precisão de 0,1%. Esses resultados são compatíveis com o rendimento de microcervejarias, que ficam entre 70 e 73% (TSCHOPE, 2001).

Em termos de consumo energético, cada ensaio consumiu 2,17 kWh, totalizando 8,68 kWh para os quatro ensaios, resultando em um consumo de 0,55 kWh por litro de cerveja. Com relação ao consumo de água, cada ensaio utilizou 18,5 litros, dos quais 6,5 litros foram para produção e 12 litros para sanitização, ou 4,6 litros por litro de cerveja.

Ao se comparar os resultados, as microcervejarias têm um consumo mais elevado de água (18 litros) e energia (6,41 kWh) por litro produzido, em contraste as grandes cervejarias utilizam 4,89 litros de água e 0,55 kWh de energia por litro.

Com relação ao consumo da água, é importante salientar que o resfriamento do mosto frequentemente resulta em desperdício de água, especialmente em produções menores. Então, usar um repositório de água reciclável para resfriamento auxiliou a reduzir esse desperdício.

Outro aspecto importante a destacar, consiste no armazenamento das informações do processo. Como os experimentos são realizados utilizando o protótipo e os resultados obtidos são armazenados na nuvem, novos estudos e análises podem ser realizados levando em consideração todos os dados históricos.

Assim, com o uso do protótipo, estabelece-se uma metodologia experimental que proporciona um suporte consistente aos pesquisadores durante a execução dos experimentos.

3.3. OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÕES DE DESEJABILIDADE (APÊNDICE C)

Este trabalho buscou considerar a sustentabilidade para cervejarias, especialmente as artesanais, que enfrentam o desafio de conciliar um consumo energético eficiente com o uso adequado das matérias-primas, sem sacrificar a produtividade. Neste contexto, foi avaliada a eficiência produtiva utilizando múltiplas variáveis de resposta, para maximizar a produtividade, uso das matérias-primas e ao mesmo tempo minimizar o consumo energético.

A metodologia utilizada para a modelagem experimental foi a técnica de superfície de resposta, utilizando os fatores relação água/grist de maltes, rampa de temperatura e tempo de mosturação, para as variáveis de resposta consumo de energia, conversão do amido em açúcares e produtividade. Através dos fatores foi utilizado um delineamento experimental composto central rotacional de 2^3 . A este modelo foram adicionados 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, obtendo uma matriz de 18 experimentos.

Para a análise estatística foi utilizada a linguagem de programação R e para otimização das respostas múltiplas foi usada a técnica de otimização simultânea de Derringer e Suich (1980). A partir das funções de desejabilidade, foi especificada uma função de desejabilidade individual, e as respostas foram então transformadas em uma função objetivo otimizável. Então, foi criado um modelo de previsão, que permite estimar resultados futuros com base em parâmetros específicos de entrada.

Foram utilizados como parâmetros de desejabilidade, o consumo energético inferior à média experimental de 1,56 kWh, gravidade original superior à média de 1,043, e produtividade

superior à média de 4.088 mL. Utilizando esses critérios, foi possível identificar parâmetros otimizados em equilíbrio com os três critérios estabelecidos. A expectativa para as variáveis de resposta para consumo energético foi de 1,509 kWh, gravidade original de 1,0441 e produtividade de 4.141 mL.

Através do modelo construído, foi obtido como o resultado de otimização para a relação água/grist de maltes de 3.950 mL, com rampa de temperatura em 60°C e mosturação por 60 minutos. Utilizando os dados como parâmetros de produção, foram realizados dois experimentos para validar os resultados inferidos pelo modelo de previsão. Os resultados desses experimentos apresentaram a média de consumo de energia de 1,57 kWh, gravidade original de 1,0455 e produtividade de 4.113 mL.

Ao analisar os resultados de média de precisão observados, é possível constatar que o consumo energético (kWh), conversão do amido em açúcares (O.G.) e a produtividade medida (mL), estão dentro de uma taxa de variação inferior a 5%. Isto demonstra a viabilidade de conciliar produtividade e sustentabilidade em produções de baixa escala. Utilizando a metodologia de superfície de resposta e as funções de desejabilidade, foi identificado um ponto de otimização para objetivos de diferentes escalas, considerando múltiplas variáveis de resposta, sem comprometimento da eficiência energética.

Outro ponto identificado pelo modelo preditivo, foram as áreas de desejabilidade. A identificação dessas áreas pode auxiliar a otimizar sistemas de produção, preservando o perfil da cerveja planejada, conciliando os custos e o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis.

4. CONCLUSÕES

Microcervejarias podem se beneficiar da automatização nas etapas de produção de cerveja artesanal e em procedimentos de análise e monitoramento. No entanto, a automatização de uma microcervejaria possui desafios relacionados aos custos de equipamentos, e à necessidade de pessoal capacitado para montagem, manutenção e operação.

A automação pode exercer um papel importante no avanço do desenvolvimento sustentável, contribuindo para melhorar a eficiência em várias etapas da fabricação. No entanto, cabe destacar, que tais tecnologias devem ser incorporadas como componentes de uma estratégia mais abrangente e envolvendo modificações nos padrões de consumo. Políticas públicas que incentivam o emprego de ingredientes locais e orgânicos também são essenciais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e econômico.

O protótipo desenvolvido possibilitou a realização de experimentos e a coleta dos dados relacionados às etapas produtivas de forma consistente e precisa. Para avaliar a eficácia do dispositivo, foram realizados quatro experimentos idênticos, com a finalidade de obter a gravidade original em um processo produtivo. Os resultados obtidos foram 1,045, 1,043, 1,045 e 1,044, resultando em um coeficiente de variação de 0,2% e um erro de precisão de 0,1%. Estes resultados evidenciaram boa precisão e baixa variabilidade.

Também foram coletados os dados referentes ao consumo energético e de água. Sendo possível observar que a média para os ensaios foi de 1,56 kWh para a produção e 0,61 kWh para a sanitização do equipamento, totalizando 2,17 kWh por ensaio e um total de 8,68 kWh para os quatro ensaios. Portanto, apresentou um consumo de energia de 0,55 kWh por litro de cerveja produzida.

Cada ensaio necessitou um total de 18,5 litros de água. Para a produção foram utilizados 6,5 litros por ensaio e 12 litros nos procedimentos de sanitização do protótipo. Assim, para cada litro de cerveja produzido foi consumido 4,6 litros de água.

Desta forma, esses resultados demonstram possibilidade de adequação do consumo de recursos envolvidos no processo de fabricação de cerveja e reforçam a importância de considerar esses fatores desde os procedimentos experimentais, e assim buscar realizar a otimização da produção.

O interpretador de instruções do protótipo possibilitou a programação do protótipo e a criação de planos experimentais complexos, com várias etapas, rampas de temperatura e volumes

de água diferentes. As alterações desses parâmetros podem auxiliar a identificar uma direção para otimização de recursos, com relação à gravidade original, consumo de energia elétrica e água.

A otimização da produção através de um planejamento experimental composto central rotacional de 2^3 , com 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, e a utilização da superfície de resposta, com múltiplas respostas e funções de desejabilidade, conciliou produtividade e sustentabilidade.

O modelo de previsão apontou que uma relação água/malte de 3.950 mL, em uma rampa de temperatura de 60°C, com mostura por um período de 60 minutos, obterá uma O.G. de 1,0441, consumindo 1,509 kWh de energia e apresentando uma produtividade de 4.141 mL.

Os dados obtidos como parâmetros de produção foram aplicados novamente no protótipo e dois experimentos foram realizados para validar os resultados inferidos pelo modelo de previsão. Os resultados desses experimentos para as variáveis de resposta demonstraram uma média de precisão para o consumo energético de 4% acima da expectativa, 0,13% para gravidade original, e 0,68% abaixo da produção esperada.

O consumo de energia apresentou maior variância em relação as outras respostas. Isso se deve ao fato de que os experimentos foram realizados em períodos diferentes do ano, e variáveis não controladas, como a variação de temperatura da água fornecida pela rede pública e a temperatura do meio ambiente, tiveram impacto sobre o consumo de energia.

Ainda assim, ao analisar esses resultados, é possível constatar que o consumo energético, gravidade original e a produtividade, estão dentro de uma taxa de variação inferior a 5%. Portanto, esse estudo evidencia a viabilidade de conciliar produtividade e sustentabilidade em microcervejarias e no ambiente experimental, sem perder a eficiência energética.

Outro ponto importante a destacar, foi a construção de um modelo preditivo que revelou áreas de desejabilidade que podem favorecer a eficiência energética, em outras temperaturas de mosturação que afetam o perfil da cerveja.

Posteriormente, o protótipo pode ser utilizado para realizar experimentos com outras configurações experimentais e através do acúmulo de dados possibilitar análises diferenciadas. Outra questão que pode ser abordada, é o desenvolvimento de interface gráfica para facilitar e integrar a apresentação dos dados de monitoria e produção. A planta também pode receber aperfeiçoamentos com relação ao isolamento térmico, o que pode trazer vantagens com relação ao consumo de energia.

5. REFERÊNCIAS

AMORIM SILVA, R. *et al.* **Aplicando Internet das Coisas na Educação: Tecnologia, Cenários e Projeções**, 2017.

DELSING, J. *et al.* **Enabling IoT automation using local clouds**. IEEE 3RD WORLD FORUM ON INTERNET OF THINGS (WF-IOT). Anais...345 E 47TH ST, New York, NY 10017 USA: IEEE, 2016

HIERONYMUS, S. **Lúpulo: guia prático para o aroma, amargor e cultivo de lúpulos**. Belo Horizonte: Editora Krater, 2020.

KASWAN, K. S.; SINGH, S. P.; SAGAR, S. **Role Of Arduino In Real World Applications**, 2020.

KUNZE, W.; PRATT, S.; MANGER, H. J. **Technology Brewing and Malting**. Berlin: VLB, 2004.

LIMBERGER, S. C. **O setor cervejeiro no Brasil: Gênese e evolução**. CaderNAU, v. 6, n. 1, 2013.

MALLETT, J. **Malte: um guia prático do campo à cervejaria**. Porto Alegre: Editora Krater, 2021.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. E. A. INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 65, DE 10 DE DEZEMBRO DE 2019. Diário Oficial da União, Brasil, 11/12/2019.

MORADO, R. **Larousse da cerveja: A história e as curiosidades de uma das bebidas mais populares do mundo**. São Paulo: Alaúde Editorial, 2017.

MOSHER, R. **Mastering Homebrew: The Complete Guide to Brewing Delicious Beer**. San Francisco: Chronicle Books LLC, 2015.

MUXEL, A. A. **Química da Cerveja: Uma Abordagem Química e Bioquímica das Matérias-Primas, Processo de Produção e da Composição dos Compostos de Sabores da Cerveja**. [s.l.] Editora Appris, 2022.

PALMER, J.; KAMINSKI, C. **Water: a comprehensive guide for brewers**. Kristi Switzer, 2013.

PALMER, J. J. **How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time** (4rd ed.). Brewers Publications, 2014.

PATEL, A.; DEVAKI, P. **Survey on NodeMCU and Raspberry pi: IoT**. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), v. 6, n. 4, p. 5101–5105, 2019.

PRESTES, D. N. **Desenvolvimento tecnológico de cervejas com matérias-primas de importância regional**. [s.l.] Universidade Federal de Pelotas, 2019.

RANI, H.; BHARDWAJ, R. D. **Quality attributes for barley malt: “The backbone of beer”**. Journal of Food Science, v. 86, n. 8, p. 3322–3340, 2021.

ROTOLO, T.; MARCUSSO, E. **A cerveja no Brasil Holandês: notas sobre a instalação da primeira cervejaria do Brasil**. Contextos da Alimentação – Revista de Comportamento, Cultura e Sociedade, v. 6, p. 73–93, 2019.

SILVA, R. A. DE et al. **Aplicando Internet das Coisas na Educação: Tecnologia, Cenários e Projeções**, 2017.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice**. [s.l.] Prentice-Hall New Jersey, 1984.

SILVA, M. J. S. DA. **Produção de Cerveja Artesanal Tipo Weiss Adicionada de Manga Cv. Espada**. [s.l.] Universidade Federal de Campina Grande - PB, 2020.

SMIL, V. **Making the Modern World: Materials and Dematerialization**. [s.l.] Lulu.com, 2016.

SONI, D.; MAKWANA, A. **a Survey on Mqtt: v. Vol. 20**, n. April, p. 173–177, 2017.

TAURION, C. **Cloud computing-computação em nuvem**. Rio de Janeiro: Brasport, 2009.

TRINTADE, S. C. **Incorporação de Amora na Elaboração de Cerveja Artesanal**. Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

TSCHOPE, E. C. **Microcervejarias e cervejarias: a história, a arte e a tecnologia**. São Paulo: Aden, 2001.

VALENTIM, S. S.; FONSECA, A. A. O.; SILVA, S. M. P. C. DA. **Elaboração e avaliação da estabilidade de cerveja artesanal utilizando o umbu-cajá (Spondias bahiensis) e canela na maturação**. Diversitas Journal, v. 6, n. 1, p. 114–136, 2021.

VENTURINI FILHO, W. G.; CEREDA, M. P. **Hidrolisado de fécula de mandioca como adjunto de malte na fabricação de cerveja: avaliação química e sensorial.** Food Science and Technology, v. 18, p. 156–161, 1998.

WHITE, C.; ZAINASHEFF, J. **Levedura: guia prático para a fermentação de cerveja.** Porto Alegre: Editora Krater, 2020.

6. APÊNDICE A – PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO

ARTIGO A – Benacchio A, Padilha Botton J, Arrieche Silva L, Produção de Cerveja Artesanal e Oportunidades de Automação. Revista Orbis Latina, v. 13, 2023.

PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO

Alcione Benacchio, Janine Padilha Botton, Leonardo Arrieche da Silva

Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território – PPGIES – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

Revista Orbis Latina

2023

RESUMO

A produção de cerveja artesanal é uma atividade em expansão, tendo seu consumo ampliado e ocupa uma parcela importante do mercado consumidor de cerveja. As microcervejarias artesanais apresentam produtos singulares, apesar de não possuírem o mesmo grau de automação das grandes cervejarias. Isso as torna menos competitivas e mais sujeitas aos problemas de segurança alimentar e erros humanos. Estudos apontam que o impacto ambiental de uma microcervejaria é proporcional ao de uma grande indústria cervejeira, no que diz respeito à produção de resíduos líquidos, sólidos e ao consumo de energia e água. Portanto, o objetivo deste trabalho é prover uma visão geral de questões ligadas à automação na produção, registro e coleta de dados referentes ao processo de produção de cerveja artesanal. E assim, apontar possibilidades que podem contribuir para aumentar a competitividade do produto, o desenvolvimento sustentável da atividade e reduzir os impactos ambientais.

Palavras-Chave: Coleta de Dados, Microcervejaria Artesanal, Energia, Sustentabilidade, Desenvolvimento Sustentável.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento mundial do mercado consumidor de cerveja provocou mudanças no ramo. Além das grandes indústrias, aumentou expressivamente a quantidade de microcervejarias artesanais que atraem os consumidores por oferecerem produtos com características distintas (COLEN; SWINNEN, 2016) e (VILLACRECES; BLANCO; CABALLERO, 2022).

Muitos desafios se apresentam nesse ramo de atividade, principalmente do ponto de vista da competitividade de mercado, resultado da qualidade, quantidade e custo de produção. Dessa forma, novas pesquisas e desenvolvimento são demandadas.

Indústrias de grande porte possuem recursos tecnológicos e profissionais altamente capacitados para operarem suas plantas cervejeiras. Com isso, além de produzirem cervejas de qualidade, com valores competitivos de mercado, se beneficiam da segurança alimentar que sistemas automatizados proporcionam. As informações coletadas durante a produção alertam para situações que podem gerar risco tanto ao próprio sistema produtivo, quanto ao produto ou aos seus custos (LÓPEZ, 2020).

Diferente de grandes cervejarias, o monitoramento e a otimização dos recursos utilizados, principalmente por cervejeiros artesanais, é um processo complexo. No entanto, pode ser um fator determinante na qualidade do produto e aceitação do consumidor final.

A automação e o monitoramento dos processos podem auxiliar o pequeno produtor de cerveja. A coleta dos dados de produção nem sempre é possível quando realizada manualmente, sendo mais suscetível à falha humana (LÓPEZ, 2020).

A falta de implementação de recursos para leitura automática de dados referentes à produção impacta na coleta de dados históricos e, portanto, no conhecimento sobre os processos, o consumo de insumos, energia e água relacionados à produção. Tais informações são importantes, tanto para reproduzir um processo que deu certo, quanto para identificar falhas que podem comprometer a cerveja produzida.

Nesse contexto, esse artigo aborda a importância da cerveja artesanal no mercado consumidor, o processo de produção e dificuldades encontradas, além de vantagens que os microprodutores possuem em relação às grandes cervejarias. Na sequência, são apresentados hardwares de baixo custo utilizados para automação, bem como questões relacionadas às dificuldades no processo de automação e a coleta de dados na produção em microcervejarias. Então, busca-se apresentar o uso de métodos e matérias primas que contribuem para a inovação na produção da cerveja artesanal de forma sustentável.

2. CERVEJA ARTESANAL - ASPECTOS SENSORIAIS E IDEIAS PARA NOVOS PRODUTOS

A grande indústria cervejeira, responsável pela maior produção no mundo, se concentra principalmente em produzir cervejas do tipo *lager*, com um perfil sensorial mais homogêneo e neutro. Já as microcervejarias produzem a cerveja artesanal predominante do tipo *ale*, e chamam a atenção de consumidores que procuram por sabores diferenciados (MASTANJEVIC et al., 2019).

Utilizando ingredientes modificados geneticamente, como lúpulos e leveduras, as microcervejarias artesanais, produzem em menor escala e possuem vantagem sobre sistemas industriais, pois conseguem facilmente experimentar variações de processos, receitas e matérias primas. A adição de ingredientes diferenciados pode incluir café, frutas, legumes, ervas, pimentas, castanhas, entre outros. Essas adições resultam em uma maior variedade de sabores e proporcionam assim, resultados singulares (MASTANJEVIC et al., 2019).

Outro exemplo da utilização de ingredientes diferenciados, é o estudo realizado por Schuina (2019) e colaboradores, com a substituição do ingrediente tradicional lúpulo, em uma cerveja artesanal *lager*, pela alcachofra. De acordo com o estudo, a cerveja produzida com alcachofra apresentou qualidade similar às cervejas *lager* produzidas com o lúpulo.

Ainda considerando o uso de ingredientes alternativos, o estudo com o trigo-sarraceno de Brasil (2020) e colaboradores, proporcionou ao produto uma maior estabilidade coloidal,

e redução de 4 vezes no teor de glúten. Isto demonstrou que o trigo-sarraceno pode ser utilizado como um adjunto eficiente com alto teor de proteínas e polifenóis. No entanto, o alto teor de polifenóis causa uma alteração de sabor e turbidez à medida que a cerveja envelhece, apresentando um aroma adocicado, picante e semelhante ao aroma de coco.

No estudo de Tozetto (2019) e colaboradores, foi realizada a produção de cerveja artesanal, com método tradicional de produção de cerveja pilsen utilizando gengibre *in natura* na etapa de maturação, adicionada em forma de raspas. Sua produção foi realizada com menor quantidade de malte para a obtenção de um produto de baixo teor alcoólico (3,40°GL). Seus resultados apontaram que a cerveja artesanal com gengibre apresentou características semelhantes às amostras classificadas quanto à proporção de cevada maltada na cerveja, e a avaliação sensorial obteve um índice geral de aceitabilidade de 92%.

Como já mencionado anteriormente, as cervejas comerciais buscam sabores mais neutros ou mais próximos do padrão esperado para o estilo, enquanto nas cervejas artesanais é esperado que possuam algumas variações de sabores. Tais estudos apresentados (SCHUINA et al., 2019), (BRASIL et al., 2020) e (TOZETTO et al., 2019), reforçam a teoria que o mercado consumidor de cerveja artesanal é atraído por sabores inovadores e diferenciados.

Ao se considerar que a produção de cerveja comercial é baseada em matérias primas restritas aos paladares das grandes massas, as microcervejarias ficam abertas às oportunidades de experimentação de matérias primas e métodos produtivos inovadores. Do ponto de vista econômico, as cervejarias de grande porte buscam aprimorar seus métodos produtivos para que seus custos de produção sejam otimizados. Uma das ferramentas utilizadas pela indústria nesse processo é a automação, que auxilia na obtenção de um produto de boa qualidade e baixo custo, assim mantendo a competitividade de mercado.

Diferentemente, as cervejarias artesanais oferecem um produto com maior custo, porém, para um público restrito que é atraído por sabores diferenciados. A regulamentação relacionada à produção cervejeira, como impostos e legislação, cria diversas barreiras para pequenos produtores. Mesmo assim, atividades já regulamentadas como os *brewpubs* estimulam o consumo da cerveja artesanal que têm aumentado ao longo dos anos (BAHL; GUPTA; ELZINGA, 2021) e (FLETCHALL, 2016), demonstrando ser um mercado promissor.

Com essa crescente demanda, aperfeiçoar os métodos produtivos e garantir produtos competitivos é de vital importância para as microcervejarias, do ponto de vista econômico.

Por isso, com o desenvolvimento tecnológico, inovações podem trazer benefícios na otimização de recursos, garantindo assim crescimento econômico e sustentável.

3. PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL

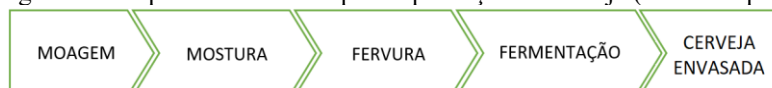
De acordo com Palmer (2006), os principais ingredientes da cerveja são: água, malte, lúpulo e a levedura. Alterações e variações de qualidade ou de tipos desses ingredientes produzem cervejas diferentes. A água pode compor até 90% da matéria prima e nela serão dissolvidos os demais ingredientes.

O malte consiste em grãos de cereais como a cevada, trigo e o centeio, que passaram por um processo de malteação. Esse processo ativa enzimas que facilitam a obtenção de açúcares. O lúpulo, possui diversas variedades, oriundas de diversos locais do mundo, produz cones que são fonte de resinas responsáveis por agregar amargor, sabor e óleos essenciais aromáticos. A levedura determina o tipo de cerveja produzida, *lager* ou *ale*, as quais são fermentadas em temperaturas e tempos diferentes.

São utilizados diversos equipamentos para realizar o processamento desses materiais como, reatores, trocadores de calor, destiladores, absorventes, evaporadores, entre outros. Esses equipamentos são interligados por tubulações, por onde passam os produtos e subprodutos. O produto é obtido, envasado e distribuído. Esses processos devem garantir a segurança e produção de acordo com as especificações de cada produto (STEPHANOPOULOS, 1984). Portanto, uma cervejaria é um tipo de planta química, desenvolvida especificamente para a produção de cerveja.

As etapas fundamentais para a produção de cerveja são, moagem, mosturação, fervura e fermentação, conforme mostrado na Figura 1. Para melhorar a qualidade do produto, etapas como filtragem, resfriamento do mosto e clarificação também são realizadas para melhorar a qualidade do produto. Essas etapas podem ser realizadas utilizando diversos equipamentos e técnicas diferentes.

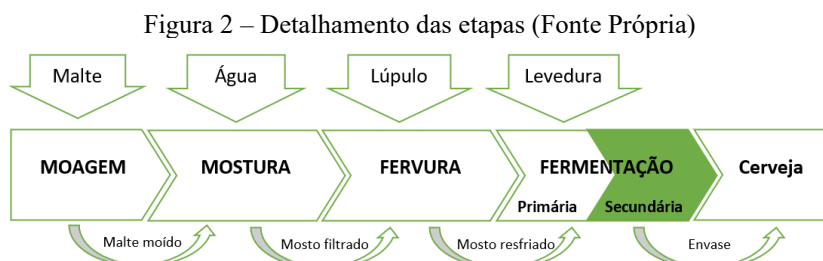
Figura 1 – Etapas fundamentais para a produção de cerveja (Fonte Própria)



Fonte: o autor, 2023

O processo inicia-se pela moagem do malte, que abre os grãos e expõe o endosperma para a ação das enzimas e realização da mostura, que é o cozimento do malte. Este pode ser realizado de várias formas (PALMER, 2006), com alterações nas temperaturas para a extração e

conversão de diferentes açúcares que estão presentes no malte. Essas variações de temperatura e tempo irão proporcionar a cerveja diferentes perfis durante o processo de fermentação. Ao final desta etapa, o mosto é filtrado e transferido para a tina de fervura, conforme mostrado na Figura 2.



Fonte: o autor, 2023

A etapa de fervura é responsável pelos processos de isomerização das substâncias do lúpulo, esterilização do mosto e coagulação das proteínas e resíduos do lúpulo. Diferentes lúpulos podem ser adicionados nessa etapa. O tempo de fervura pelo qual este irá passar irá conferir determinado amargor, sabor ou aroma à cerveja.

Durante a fervura, possíveis contaminantes biológicos são eliminados no processo e a coagulação das proteínas e resíduos podem decantar na tina, facilitando a separação desses resíduos na transferência para o fermentador. A eliminação desses resíduos é importante pois irão influenciar no sabor e limpidez do produto. O tempo de fervura varia dependendo do estilo da cerveja, mas geralmente são feitos em torno de 60 minutos, (PALMER, 2006) e (VIADER et al., 2021).

Após a realização da fervura, o mosto é resfriado e transferido para o fermentador onde a levedura é inoculada. As temperaturas devem ser controladas e irão variar de acordo com o estilo e tipo da cerveja produzida, com temperaturas distintas para *lagers* e Ales.

As cervejas do tipo *lager* são fermentadas em temperaturas em torno de 10 °C e as Ales em temperaturas mais altas em torno de 18 °C (EATON, 2017). No entanto, algumas leveduras possuem temperaturas ótimas determinadas pelo fabricante.

Em seguida é iniciado o processo de fermentação secundária, também chamada etapa de maturação. Subprodutos oriundos da fermentação podem ser consumidos pelas leveduras, por isso em processos genéricos as temperaturas são elevadas em torno de 4 a 6 °C durante alguns dias. Essa elevação da temperatura, estimula as leveduras para que possam absorver esses subprodutos.

Posteriormente a temperatura é reduzida a 2 °C, por um período que varia de acordo com o estilo, para que seja realizado o processo de clarificação da cerveja por decantação. Após concluída essas etapas é realizado o envase, (PALMER, 2006).

4. EXPERIMENTOS COM AUTOMAÇÃO

A automação é a aplicação de recursos computacionais para realização de controle, monitoramento e medição de processos, auxiliando a diminuir custos e proporcionar maior segurança na produção. Pode ser aplicado em diversos ambientes, como a indústria química, petroquímica, têxtil e laboratorial (CAMPANA; OPLUSTIL, 2011).

Sua utilização em equipamentos de difícil controle e monitoramento, como caldeiras, reatores e bombas, além de maior segurança, auxiliam a tornar os processos mais eficientes. Torna possível a substituição ou redução da necessidade de mão obra especializada, maior velocidade na produção e redução de desperdícios (CAMPANA; OPLUSTIL, 2011).

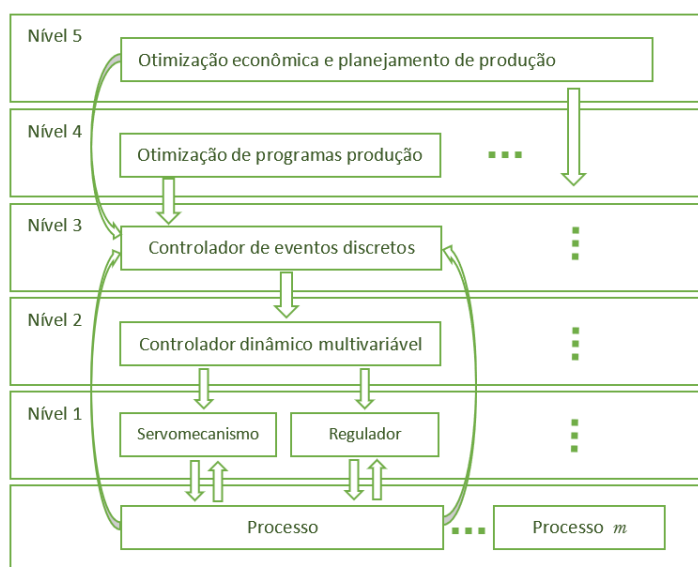


Figura 3 - Hierarquia da Automação (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

Apresentado na Figura 3, a representação hierárquica da automação possui 5 níveis. A solução de um problema pode ser realizada de forma específica ou generalizada (MORAES; CASTRUCCI, 2001), conforme tabela 1.

Tabela 1 – Níveis Hierárquicos (MORAES; CASTRUCCI, 2001)

Nível 1	Máquinas, dispositivos e componentes.
Nível 2	Controladores digitais, dinâmicos e lógicos. Ou também os relacionados a supervisão de processos. Concentram as informações do Nível 1, e as Interfaces Homem-Máquina.
Nível 3	Possibilita o controle do processo de produção da planta. Pode ser composto por bancos de dados com informações relacionadas à qualidade da produção, estatísticas de processo, produtividade e algoritmos de otimização da operação.
Nível 4	Nível incumbido pela programação e planejamento da produção. Efetua o controle e a logística dos suprimentos.
Nível 5	Encarregado pela administração dos recursos da empresa. Nível onde estão os softwares para gestão de vendas e gestão financeira. Área responsável pela decisão e o gerenciamento de todo o sistema.

Dos processos de automação, pode ser destacada a automação flexível, associada ao uso de robôs e pode ser empregada para a realização de tarefas em diversos ambientes produtivos. Sua aplicação pode ser mais adequada de acordo com a finalidade de produção. No entanto, devido aos altos custos de programação e dos equipamentos necessários, sua aplicação é mais direcionada à grande indústria. Por isso, sua utilização em ambientes experimentais, e de pequenos lotes ainda é bastante restrita como descreve Lofving (2018) e colaboradores, em um estudo de caso na Suécia.

Um estudo realizado por Hancke (2020), aborda questões e problemas relacionados à automação automobilística e na aviação, e não trata do processo de automação para experimentações ou na produção cervejeira. Mas, sua análise aponta uma questão fundamental para a automação, que é a necessidade de intervenção humana, qualificação e familiaridade com o equipamento pelo operador. Portanto, operações automatizadas eventualmente podem requerer correções de curso, principalmente em situações de falhas em sensores ou atuadores, o que pode ocasionar em prejuízos na produção.

Mesmo em um processo de produção cervejeira, onde uma falha no processo possa não gerar uma situação crítica, pode haver problemas de segurança, prejuízos de custos de insumos, energia e tempo na produção.

Para essas situações, a intervenção humana pode contornar eventuais problemas. Por isso, existe a necessidade de que o equipamento seja projetado para que o operador possa realizar operações manuais e retomar a sequência de operações automática. Além disso, o autor destaca a importância do registro dos dados para monitoria e melhoria dos processos (HANCKE, 2020).

Em um estudo sobre automação elétrica, Feng (2019) ressalta a importância para o desenvolvimento e competitividade para a China, país onde foi realizado o estudo. Esse argumento é amplamente aplicável, visto que a eficiência energética tem impacto sobre os custos de produção e melhora o desempenho econômico da indústria. Essa perspectiva também pode ser aplicada às microcervejarias artesanais.

Utilizando um controlador lógico programável (CLP), Galvis-Loiza e Tangarife-Escobar (2020), desenvolveram uma micro planta automatizada, utilizando lógica *fuzzy* para diminuir o grau de incerteza e diminuir problemas com a estabilidade da temperatura durante o processo de mosturação e fervura. Com isso, conseguiu diminuir erros por imprecisões organolépticas e tornou o processo de extração de açúcares mais eficientes e melhor aproveitamento dos insumos. Seu estudo também demonstra uma economia de 9,56% de energia.

Com o objetivo de auxiliar na detecção de falhas em produtos alimentícios, foi desenvolvido o *e-nose*, que em Viejo (2020) e colaboradores, realizaram experimentos em cervejas artesanais com o intuito de avaliar aromas indesejáveis. Como já mencionado, custos de produção e automação são um problema relevante na produção artesanal, e o projeto foi concebido utilizando componentes eletrônicos de baixo custo e aprendizado de máquina.

Esta tecnologia com custo acessível, é mais rápida para ser aplicada, pois não necessita o envio de amostras para análise em laboratórios. E por isso, viabiliza seu uso em microcervejarias, que em muitos casos contam apenas o mestre cervejeiro como o responsável por toda a operação.

O equipamento foi desenvolvido utilizando um microcontrolador conversor analógico-digital (ADC) e sensores para medir, etanol, metano, monóxido de carbono, hidrogênio, amônia, álcool, benzeno, sulfato de hidrogênio, dióxido de carbono e temperatura de umidade.

A coleta dos dados amostrados é transmitida via USB para um sistema que utiliza interface gráfica. Então os dados são analisados utilizando técnicas de aprendizado de máquina. Os resultados demonstraram que a tecnologia para prever aromas de cerveja atuou de forma confiável e eficaz. A avaliação da qualidade da cerveja em tempo real também viabiliza a sua utilização em linha de produção, e evita o uso de equipamentos mais caros, lentos e ineficientes (VIEJO et al., 2020).

Também utilizando plataformas de baixo custo, Andrade (2021) e colaboradores realizaram experimentos produzindo lotes de 20 litros, com a plataforma de *hardware* RaspberryPi. O *software* utilizado foi o CraftBeerPi, desenvolvido e disponibilizado à comunidade para utilização sem custos em licença. O estudo realizou a comparação de custos dessa plataforma com os controladores lógicos programáveis CLP, plataforma concebida para utilização na indústria. De acordo com os autores, o RaspberryPi e o *software* CraftBeerPi atenderam as necessidades do projeto, para automatização do processo de produção de cerveja artesanal.

Esses experimentos publicados, demonstram a viabilidade técnica da utilização de equipamentos de baixo custo para aplicação em ambientes experimentais. Ao analisarmos o ambiente de produção de cerveja artesanal, é possível perceber oportunidades de estudos e desenvolvimento de protótipos acadêmicos para resolver problemas deste setor.

5. HARDWARES DE BAIXO CUSTO PARA AUTOMAÇÃO

A necessidade de criar ambientes eletrônicos, coletar e analisar dados do mundo real, impulsionou o desenvolvimento de *hardwares* de prototipagem e desenvolveu uma indústria focada em atender a essas necessidades. Esses equipamentos comumente utilizados de forma acadêmica, como os demonstrados anteriormente, também estão em uso experimental para outros fins, como demonstrado na tabela 2.

Tabela 2 – Exemplos de Aplicações - Adaptado de (KASWAN; SINGH; SAGAR, 2020)

Área	Aplicações
Casas Inteligentes	Sensores de movimento, temperatura e controladores de porta de garagem, fluxo de ar e irrigação.
Defesa	Sistema de radar ultra sônico.
Transporte	Controle de tráfego com sistemas de semáforo, integração aeromodelos e veículos de controle remoto em arena de robôs, sistemas de controles experimentais, estratégias e sensores.
Médico	Detecção de câncer, sistemas de medição de batimento cardíaco, termômetro.
Minação de dados	Indústria, defesa e saúde.
Laboratório	Sistemas para coleta de amostra, microscópio digital.
Controle corporal	Monitor de batimento cardíaco, atividade muscular, rastreamento ocular, reconhecimento e expressões faciais.

Plataformas como Arduino e Raspberry Pi, são exemplos de equipamentos de baixo custo que podem ser utilizados para a prototipação. Sua capacidade de processamento, memória e interfaces varia de modelo para modelo. Esses equipamentos possuem entradas e saídas, digitais e analógicas. Podem ser ligados diretamente a energia, ou por se tratar de dispositivos de baixo consumo elétrico, também podem ser ligados a baterias por longos períodos.

Arduino é uma plataforma de *hardware* e *software*, que possibilita a entrada e saída de dados. O gerenciamento de entrada e saída desses dispositivos são chamados de GPIO (*General Purpose Input Output*) e podem gerenciar uma gama diversa de dispositivos. Pode ligar motores, *leds*, e ler dados de diversos tipos de sensores (PATEL; DEVAKI, 2019).

O desenvolvedor pode realizar o envio de instruções ao microcontrolador da placa através de programas desenvolvidos na linguagem de programação Arduino, que então irão processar as operações de acordo com os dispositivos de entrada e saída ligadas ao sistema (PATEL; DEVAKI, 2019). Sensores podem ser aplicados para diversas soluções, como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Exemplos de Soluções (SAROIU; WOLMAN, 2010)

Aplicação	Descrição
Prova de localização	Um sensor GPS, pode coletar dados e possibilitar descontos a clientes frequentes, premiar pessoas que usem menos seus veículos.
Sensoriamento Participativo	Uso de diversos sensores para compor informações e são armazenados em um banco de dados central para posterior análise.
Detecção de Presença de Usuário	Pode ser aplicado para distinguir se uma atividade é realizada por uma pessoa ou por programa. E pode oferecer maior segurança da Internet.
Carros	Sensores podem evitar que um motorista embriagado ou mesmo uma criança tome a direção de um veículo. Ou impedir que jovens motoristas conduzam em alta velocidade.
Devolução de Itens	Garantir que um item, como carro ou livro seja está no local que deveria.
Detecção de Ruídos	Ruídos elevados podem prejudicar a audição, por isso sensores podem ser utilizados para desativar sistemas de som ou diminuir seu volume.
Monitoramento de Consumo de Energia	Sensores para monitoramento de consumo elétrico ligados a rede podem auxiliar a verificar se os valores cobrados pelas companhias elétricas estão corretos.

Esta plataforma possui 25 modelos de placas e 18 *Shields*. Os documentos de especificação técnica providos pelo fabricante, também chamado de *datasheet*, apresenta todos os detalhes e recursos de cada modelo. Cabe ao desenvolvedor levantar suas necessidades e analisar o equipamento que pode atendê-las.

Projetos desenvolvidos nessa plataforma podem demandar diversos sensores e dispositivos eletrônicos. Uma forma de facilitar a ligação de sensores ou outros dispositivos eletrônicos a essas placas, é através da utilização de *Shields*.

Com recursos específicos, *Shields* são instalados sobre placas Arduino e podem expandir suas capacidades e adicionar novas funcionalidades. Os *Shields* podem ser instalados uns sobre os outros, dessa forma agrega maior número de funcionalidades no projeto.

Diferente do Arduino que é microcontrolador, o Raspberry Pi é um microcomputador. Seus recursos de processamento e rede, possibilitam a integração e processamento de vídeo e áudio e acessos a servidor. Possui sistema operacional e por isso realiza operações como um computador. No entanto, diferentemente de um computador, esse possui entradas GPIO e pode manipular sensores e outros dispositivos eletrônicos como o Arduino.

Possui 9 modelos de dispositivos e da mesma maneira que o Arduino, deve-se identificar as necessidades do projeto, para que então analisando o *datasheet* dos modelos, possa ser escolhido o modelo mais adequado para cada projeto.

Embora demandem análise, customização e programação específica para cada projeto. Diversos sensores compatíveis de baixo custo estão disponíveis. Sua utilização já é amplamente difundida na comunidade acadêmica. Por isso, com vários experimentos de automação já realizados, é possível assumir que estes equipamentos podem contribuir para automação das microcervejarias.

6. ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

No que diz respeito ao desenvolvimento sustentável, Harlem Brundtland, em 1987, emitiu o relatório *Nosso Futuro em Comum*, que também é conhecido como relatório de Brundtland. Este relatório define desenvolvimento sustentável como segue:

“O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades” (BRUNDTLAND, 1987).

No mesmo relatório, também define conceitos chave como de “necessidades”, em particular as necessidades básicas dos mais pobres, às quais, prioridade absoluta deve ser dada; “limitações”, que apresenta a ideia de limitações impostas pelo estado da tecnologia e da organização social. E enfatiza que a definição acima inclui diversos aspectos impostos e classifica como nosso dever com a geração presente e as futuras (BRUNDTLAND, 1987).

Para Albanese (2017) e colaboradores, as cervejarias artesanais devem investir em novas técnicas de produção, que possam contribuir para a sustentabilidade, e reduzir o custo do produto. Também destaca que, utilizar insumos e outros cereais pode contribuir para melhorar a margem de lucro desses pequenos produtores e empresas e ainda reduzir o impacto ambiental.

Da perspectiva da sustentabilidade, Baiano (2021) classifica as cervejarias artesanais e industriais como não ambientalmente amigáveis, com relação ao consumo de água, energia, produção de efluentes e resíduos sólidos. O impacto ambiental das cervejarias artesanais são proporcionais aos provocados pelas grandes indústrias.

Outra questão apontada no estudo de Baiano (2021), é o impacto ambiental causado no consumo de combustíveis fósseis no transporte de matérias primas. Sugere como solução a utilização de ingredientes locais e orgânicos, principalmente na questão dos grãos que podem ser amplamente cultivados, diferentemente do lúpulo que depende de condições específicas para seu cultivo.

As embalagens também são um problema ambiental que contribuem de forma negativa para essa atividade, visto a grande quantidade de vidro e alumínio utilizado. E aponta que apesar do vidro consumir menos energia do que o alumínio para sua produção, este acaba levando vantagem na distribuição e transporte (BAIANO, 2021).

Do ponto de vista da sustentabilidade, Smil (2016) chama atenção que para racionalizar e moderar o consumo de materiais modernos, é necessário continuar a busca por

oportunidades para reduzir o custo de energia ao longo da cadeia material. A disponibilidade e extração de recursos naturais se tornaram indispensáveis para a manutenção e o avanço da civilização. Aponta oportunidades para evitar o desperdício para economia material e de energia.

Essas oportunidades seriam aprimoradas por novos materiais e pelos contínuos avanços na relativa desmaterialização, ou seja, na redução do uso de materiais. Também destaca para as oportunidades de substituição de materiais, reciclagem aprimorada e reutilização, apresentando quatro categorias de redução de desperdício (SMIL, 2016).

- Melhor uso do material através do aprimoramento do design.
- Fabricação mais racional e menos dispendiosa;
- Melhorar e intensificar a reciclagem;
- Recompensar substituições de materiais.

Ao considerar essas categorias de Smil (2016) na produção de cerveja artesanal, três categorias podem ser praticadas pelos produtores, no entanto recompensar as substituições de materiais é uma questão que vai além das possibilidades das microcervejarias.

O uso de matérias primas cultivadas ou produzidas de forma local ou regional, pode ter impacto na redução dos custos de transporte e até mesmo do ponto de vista ambiental reduzir o uso de combustíveis fósseis. O estímulo à produção local traz vantagens do ponto de vista econômico e ambiental, mas para que isso ocorra, há a necessidade do desenvolvimento de uma cadeia produtiva para que os produtores de cerveja artesanal possam interagir.

Como já mencionado anteriormente, as microcervejarias artesanais já buscam utilizar novas técnicas, matérias primas e insumos, com o intuito de obter novos sabores para um mercado consumidor interessado em cervejas diferenciadas. Por isso, as teorias de Smil (2016), sobre sustentabilidade se conciliam, e mostram o potencial que as microcervejarias têm para se tornarem ambientalmente amigáveis.

7. PERSPECTIVAS PARA MICROERVEJARIAS

Mesmo com o crescimento no consumo de cerveja artesanal, e do número expressivo de microcervejarias pelo mundo, a automação na produção da cerveja artesanal ainda não é amplamente empregada por esse segmento produtivo.

A vantagem que as microcervejarias possuem em relação às grandes cervejarias é a variação de matérias primas e a modificação nos processos de produção, para a fabricação de cervejas

diferenciadas. Processos automatizados podem se tornar uma barreira para essas microcervejarias manterem seu potencial de inovação.

Grandes cervejarias possuem processos completamente automatizados. Por isso, produzir cervejas diferenciadas, pode demandar alterar a programação desses processos. Conseqüentemente, produzir uma nova cerveja pode se tornar dispendioso e arriscado, visto que produzem grandes lotes.

Enquanto a falta de automação dificulta alguns processos na produção artesanal, este possibilita que as microcervejarias alterem de maneira mais simplificada seus métodos de produção, conseqüentemente podem produzir uma maior variedade de cervejas.

Nas microcervejarias, por não possuírem muitos recursos de automação, os processos na maioria das vezes também não passam por mecanismos de monitoria sistemática. Ficando dependentes dos cuidados e atenção do mestre cervejeiro ou do operador responsável pela etapa de produção.

Processos automatizados dependem de pessoal especializado. Alterar os mecanismos de automação pode onerar os custos de produção. Mecanismos baseados em hardwares de baixo custo podem contribuir para baratear o processo. No entanto, os custos de mão de obra especializada para realizar essa customização ainda será uma despesa adicional.

Ao se levar em consideração que as cervejas artesanais consomem proporcionalmente os mesmos recursos da indústria cervejeira. Ainda é preciso ponderar que muitos dados são perdidos durante o processo produtivo. Por isso é difícil determinar com precisão o grau de eficiência do uso dos insumos, matérias primas, água, energia e quanto de resíduos líquidos e sólidos são gerados pelas microcervejarias.

Para que as microcervejarias possam utilizar recursos de automação, monitoria e coleta de dados dos processos, é necessário que esses equipamentos sejam de baixo custo, fácil operação e customização. Vale destacar, que os sistemas devem ser projetados para que seja possível a realização de intervenção humana durante a produção.

Esses requisitos são necessários para que estas microcervejarias possam se beneficiar das vantagens da automação, mas sem perder a liberdade de produzirem cervejas diferenciadas e continuem inovando nos processos produtivos e uso de matérias primas.

8. CONCLUSÃO

Microcervejarias podem se beneficiar do processo de automatização nas etapas de produção da cerveja artesanal e em processos de análise e monitoramento de processos. Essas tecnologias são capazes de otimizar o tempo de produção, garantir as especificações das variáveis operacionais, a fim de garantir o produto dentro das especificações pretendidas e a identidade sensorial.

No entanto, automatizar uma microcervejaria envolve complexidades atinentes aos custos de equipamentos, hardwares e pessoal capacitado necessário para sua montagem, manutenção e operação. A utilização de hardwares de baixo custo pode ser uma opção para que esses pequenos negócios se beneficiem das vantagens da automação e melhorar a eficiência de produção e qualidade dos seus produtos.

Fica evidente, que a automação pode desempenhar um papel importante no desenvolvimento sustentável e pode contribuir para melhorar a eficiência em diversas etapas da fabricação, como processos de produção, gerenciamento de energia, reutilização de água e resíduos.

Em geral, a automação pode ajudar as microcervejarias a serem mais eficientes e sustentáveis. No entanto, cabe destacar que essas tecnologias devem ser utilizadas como parte de uma abordagem mais ampla que inclua mudanças de comportamento de consumo, como o uso embalagens recicláveis e biodegradáveis. Políticas públicas que incentivem o uso de ingredientes locais e orgânicos também tem papel importante.

9. REFERÊNCIAS

ALBANESE, L. *et al.* Innovative beer-brewing of typical, old and healthy wheat varieties to boost their spreading. **bioRxiv**, p. 114157, maio 2017.

ANDRADE, A. A. *et al.* **Low Cost Solution for Home Brewing and Small Brewing Business Using Raspberry Pi** (J. R. H. and K. P. and K. M. and D. N. V. J. Pereira Lucianaand Carvalho, Ed.) Proceedings of IDEAS 2019. **Anais...**Cham: Springer International Publishing, 2021

BAHL, H. C.; GUPTA, J. N. D.; ELZINGA, K. G. A framework for a sustainable craft beer supply chain. **International Journal of Wine Business Research**, v. 33, n. 3, p. 394–410, 1 jan. 2021.

BAIANO, A. Craft beer: An overview. **Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety**, v. 20, n. 2, p. 1829–1856, mar. 2021.

BRASIL, V. B. *et al.* Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) characterization as adjunct in beer brewing. **Food Science and Technology**, v. 41, maio 2020.

BRUNDTLAND, G. H. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future** (United Nations General Assembly document A/42/427, Ed.) Oslo: 1987.

CAMPANA, G. A.; OPLUSTIL, C. P. Conceitos de automação na medicina laboratorial: revisão de literatura. **Jornal Brasileiro de Patologia e Medicina Laboratorial**, v. 47, n. 2, p. 119–127, 2011.

CASTRUCCI, P. DE L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

COLEN, L.; SWINNEN, J. Economic Growth, Globalisation and Beer Consumption. **JOURNAL OF AGRICULTURAL ECONOMICS**, v. 67, n. 1, p. 186–207, 2016.

EATON, B. An Overview of Brewing. *In: Handbook of Brewing*. [s.l.] CRC Press, 2017.

FENG, Y. **Reliability Analysis of Electrical Automation Control Equipment** (L. Liu, C. Yang, & J. Ke, Eds.) **ADVANCES IN MATERIALS, MACHINERY, ELECTRONICS III. Anais...** AIP Conference Proceedings.2 HUNTINGTON QUADRANGLE, STE 1NO1, MELVILLE, NY 11747-4501 USA: AMER INST PHYSICS, 2019.

FLETCHALL, A. Place-Making Through Beer-Drinking: A Case Study of Montana's Craft Breweries. **Geographical Review**, v. 106, maio 2016.

GALVIS-LOAIZA, O. M.; TANGARIFE-ESCOBAR, H. I. Design and implementation of a fuzzy temperature control for a craft beer production microplant using PLC/Diseno e implementacion de un control difuso de temperatura para microplanta de coccion de cerveza artesanal mediante PLC. **Visión electrónica**, v. 14, p. NA, 2020.

HANCKE, T. Ironies of Automation 4.0. **IFAC PAPERSONLINE**, v. 53, n. 2, p. 17463–17468, 2020.

KASWAN, K. S.; SINGH, S. P.; SAGAR, S. **Role Of Arduino In Real World Applications**, 2020.

LOFVING, M. *et al.* **Evaluation of flexible automation for small batch production** (M. Onori et al., Eds.) PROCEEDINGS OF THE 8TH SWEDISH PRODUCTION SYMPOSIUM (SPS 2018). **Anais...** Procedia Manufacturing. AMSTERDAM, NETHERLANDS: ELSEVIER SCIENCE BV, 2018.

LÓPEZ, M. Contaminant Microbiota In Craft Beers. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, v. 9, p. 1181–1186, maio 2020.

MASTANJEVIC, KRISTINA *et al.* Craft brewing - is it really about the sensory revolution? **KVASNY PRUMYSL**, v. 65, n. 1, p. 13–16, 2019.

MORAES, C. C. DE; CASTRUCCI, P. DE L. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

PALMER, J. **How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time**. 3. ed. [s.l.] Boulder-CO: Brewers Publications, 2006.

PATEL, A.; DEVAKI, P. Survey on NodeMCU and Raspberry pi: IoT. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 4, p. 5101–5105, 2019.

SAROIU, S.; WOLMAN, A. **I Am a Sensor, and I Approve This Message**, Proceedings of the Eleventh Workshop on Mobile Computing Systems; Applications. **Anais...**: HotMobile '10. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2010.

SCHUINA, G. L. *et al.* Alternative production of craft lager beers using artichoke (*Cynara scolymus* L.) as a hops substitute. **Food Science and Technology**, v. 40, maio 2019.

SMIL, V. **Making the Modern World: Materials and Dematerialization**. [s.l.] Lulu.com, 2016.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice**. [s.l.] Prentice-Hall New Jersey, 1984.

TOZETTO, L. *et al.* Production and physicochemical characterization of craft beer with ginger (*Zingiber officinale*). **Food Science and Technology**, v. 39, maio 2019.

VIADER, R. P. *et al.* Optimization of beer brewing by monitoring α -amylase and β -amylase activities during mashing. **Beverages**, v. 7, n. 1, 1 mar. 2021.

VIEJO, C. G. *et al.* Development of a low-cost e-nose to assess aroma profiles: An artificial intelligence application to assess beer quality. **Sensors and Actuators B Chemical**, v. 308, jun. 2020.

VILLACRECES, S.; BLANCO, C. A.; CABALLERO, I. Developments and characteristics of craft beer production processes. **Food Bioscience**, v. 45, fev. 2022.

7. APÊNDICE B – PROTÓTIPO DE BANCADA AUTOMATIZADO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA: SISTEMA PRECISO, ESTÁVEL E SUSTENTÁVEL

ARTIGO B – Benacchio A, Padilha Botton J, Arrieche Silva L, Protótipo de Bancada Automatizado para Produção de Cerveja: Sistema Preciso, Estável e Sustentável. Artigo aceito na Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales.

PROTÓTIPO DE BANCADA AUTOMATIZADO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA: SISTEMA
PRECISO, ESTÁVEL E SUSTENTÁVEL

Alcione Benacchio, Janine Padilha Botton, Leonardo Arrieche da Silva

Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-
Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território – PPGIES – Universidade Federal da
Integração Latino-Americana, Brasil.

Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales

2023

RESUMO

Cervejarias de grande porte aprimoram seus métodos produtivos e automatizam suas plantas para equilibrar custos e qualidade, além de se manterem competitivas no mercado. No entanto, implementar as mesmas técnicas de automação e coleta de dados em uma escala reduzida apresenta desafios, sobretudo quando se busca replicar os processos produtivos das grandes cervejarias e considerando a carência de tecnologias específicas para a produção de cerveja em pequena escala. Em busca de soluções, neste estudo, é apresentado um protótipo automatizado que integra Internet das Coisas e a Computação em Nuvem, destinada à produção experimental de cerveja artesanal, em escala de bancada. O sistema é capaz de registrar as operações do processo produtivo, emitir notificações e armazenar dados dos sensores. Esses dados possibilitam o monitoramento e visualização histórica de produção, auxiliando na identificação de técnicas para otimizar o consumo de recursos como insumos, matérias-primas, água e energia. O protótipo é composto por três componentes principais: (i) uma planta que é responsável por realizar o aquecimento da água, mosturação, fervura e resfriamento do mosto cervejeiro; (ii) um módulo de controle baseado em Raspberry Pi B+, que gerencia a recepção de dados de sensores e; (iii) módulo de acionamento para a automatização das operações. O software desenvolvido em Python, é responsável por enviar as instruções programáveis das operações. Por fim, os dados coletados são transmitidos via protocolo MQTT e, posteriormente, armazenados na nuvem. Além dos resultados obtidos durante os experimentos, o seu acúmulo na nuvem, tornou possível a criação de um conjunto de dados, facilitando análises posteriores. Esse conjunto de ações realizadas formaram uma metodologia experimental, capaz de auxiliar, de forma consistente, pesquisadores durante a realização dos experimentos. Os resultados dos testes com a utilização do protótipo e a implementação das funcionalidades de produção, demonstraram que o equipamento é capaz de realizar as tarefas programadas e orientar o responsável pelo experimento durante o roteiro experimental, coletar os dados com precisão, contribuindo para que os erros operacionais sejam evitados e o experimento possui variabilidade de 0,2%, com erro de precisão de 0,1%.

Palavras-Chave: Internet das Coisas, Coleta de dados, Monitoramento de produção, Metodologia experimental, Energia.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria cervejeira, os grandes produtores buscam continuamente aprimorar seus métodos produtivos. O objetivo é otimizar os custos de produção e garantir um produto de qualidade com preço competitivo. Contudo, as cervejarias de menor escala muitas vezes não possuem os mesmos recursos de automação e acabam não conseguindo acompanhar essa competitividade.

Dentre os importantes fatores que envolvem os sistemas produtivos nas cervejarias, a otimização do processo de produção em uma planta cervejeira e a aplicação das melhores práticas de produção são tarefas complexas. Para auxiliar nesse processo, as grandes cervejarias utilizam plantas automatizadas, controladas por sistemas programáveis, e contam com um conjunto de operadores experientes.

Estes profissionais são responsáveis por diversas etapas da produção da cerveja, que garantem o uso adequado dos insumos, energia e água, possibilitando a otimização da produção. No entanto, essa realidade muitas vezes não é replicada em cervejarias de menor escala, que possuem recursos limitados para automação.

Em cervejarias de pequena escala, como a pesquisa realizada por Funck (2022), que produz 21.600 litros por ano, concluiu que estas são menos eficientes na produção e no consumo de recursos. O tratamento e reuso da água, é uma alternativa para otimizar o consumo de recursos hídricos (LOPES, 2022).

Essa mesma tendência é corroborada pelos dados apresentados no relatório de sustentabilidade da Brewers Association (2017) dos Estados Unidos. Segundo o relatório, as cervejarias maiores apresentam maior eficiência no uso de energia elétrica e água quando comparadas às menores. De acordo com a escala do relatório, as cervejarias menores produzem menos de 117.348 litros por ano, enquanto as maiores produzem 100 vezes mais.

Para que as indústrias, independente do seu porte, possam produzir grandes volumes de cerveja, primeiramente precisam testar condições e materiais para que o processo possa ser eficiente e o produto seja de qualidade. É nesta etapa que entram os experimentos laboratoriais, os quais serão determinantes nos processos seguintes, e precisam ser controlados.

A coleta e o gerenciamento de dados de produção, seja em um ambiente experimental de laboratório ou em uma operação em larga escala, são tarefas complexas. Este processo requer considerável tempo de observação, planejamento cuidadoso e o uso de equipamentos especializados para a coleta de dados. Por isso, a contabilização correta desses recursos pode representar um obstáculo significativo para o pesquisador, seja em ambiente acadêmico ou industrial.

Com a finalidade de suprir as demandas experimentais da produção de cerveja, este trabalho, apresenta um protótipo automatizado em escala de bancada. Esse utiliza hardwares e tecnologias para Internet das Coisas e computação em nuvem, registra as operações, histórico de produção e armazena dados sobre consumo de água e energia.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERVEJA

Ao longo da história, diferentes culturas empregaram variadas técnicas e matérias-primas na fabricação de cerveja. A Lei da Pureza (*Reinheitsgebot*), promulgada em 1516 em Ingolstadt, Baviera, estabelecia que cervejas alemãs deveriam ser produzidas exclusivamente com malte de cevada, lúpulo, água (MORADO, 2017).

Essa legislação tornou-se um marco na padronização da fabricação de cerveja. O conhecimento de microbiologia ainda não estava avançado o suficiente para identificar a levedura, por isso ela não foi classificada como ingrediente. Embora atualmente não seja mandatória na Alemanha, a lei destaca a importância dos ingredientes e processos na definição dos estilos cervejeiros (MORADO, 2017).

A seleção dos tipos de maltes, lúpulos e leveduras, a relação entre estes, a temperatura e o tempo das etapas de produção, bem como os métodos de maturação, conservação e embalagem, possibilitam uma ampla variedade de estilos de cerveja (MORADO, 2017).

Compondo até 90% da matéria-prima, a água interage com a química da mostura. Diversos aspectos podem ser considerados na análise da água que será utilizada. Água com baixa alcalinidade é recomendada para cervejas claras e para cervejas mais escuras, com de grãos mais escuros e mais ácidos, uma maior alcalinidade pode ser considerada. O nível de cálcio presente na água também tem influência nos processos de mostura, fermentação e clarificação (PALMER & KAMISNKI, 2013).

O malte é uma matéria-prima desenvolvida a partir de grãos de cevada. O grão passa por um processo chamado maltagem, que facilita a conversão de açúcares durante a mosturação. Diversos grãos podem ser utilizados na produção de cerveja. Além da cevada, grãos como trigo, aveia, arroz e milho também podem ser incorporados na composição (MORADO, 2017).

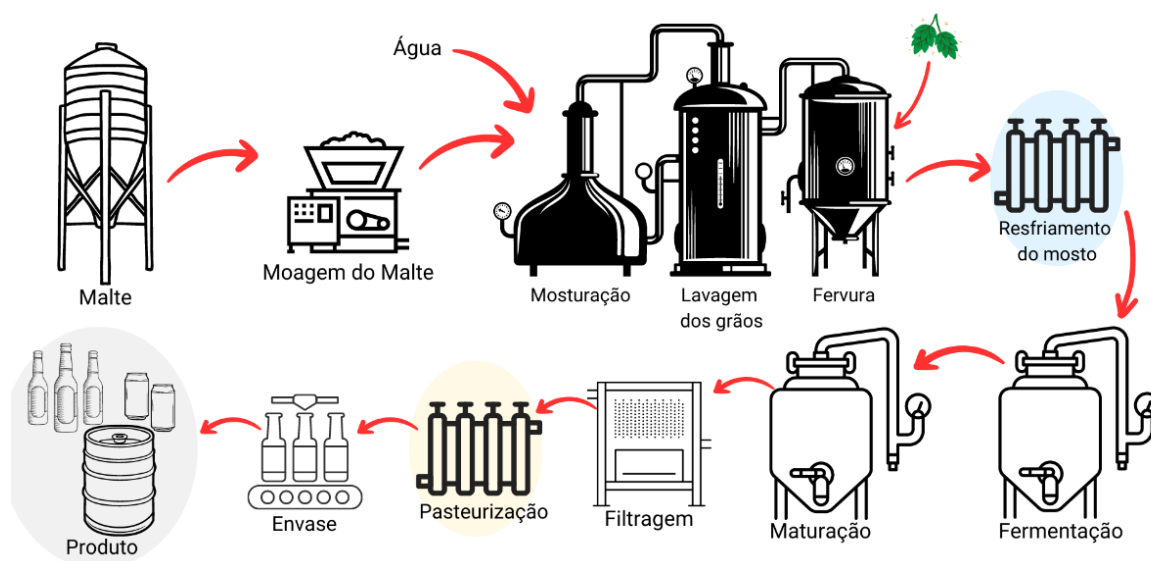
O lúpulo é uma planta trepadeira que possui diversas variedades oriundas de vários lugares do mundo. Esta planta produz cones ricos em resinas, que confere amargor e sabor à cerveja, além de óleos essenciais aromáticos. Para a fabricação de cerveja, são selecionados os cones das plantas femininas, pois possuem mais resinas desejáveis do que as plantas masculinas (MORADO, 2017).

A levedura é responsável por realizar a conversão dos açúcares do mosto em álcool. Existem muitas cepas, no entanto os tipos prevalentes são *Saccharomyces cerevisiae* (cervejas *ale*) e a *Saccharomyces pastorianus* para as (cervejas *lager*) (MORADO, 2017).

A produção de cerveja possui etapas fundamentais, sendo as principais delas a mosturação, fervura, fermentação (KUNZE, 2004). Mas, outras etapas são adicionadas para aperfeiçoar a qualidade do produto.

O processo de produção é realizado conforme mostrado na figura 1. Inicia-se pela moagem do malte, que quebra os grãos, expondo o endosperma às enzimas, processo necessário para realizar a mosturação.

Figura 1 – Processo de Produção de Cerveja



Fonte: o autor, 2023

A mosturação solubiliza os materiais provenientes do malte, podendo ser realizado de várias formas. Alterações nas temperaturas possibilitam a extração e conversão de diferentes açúcares do malte e proporcionando diferentes perfis a cerveja. A lavagem dos grãos é um processo realizado maximizar o processo de produção. Ao final desta etapa, todo o mosto é transferido para o vaso de fervura (PALMER, 2014; KUNZE, 2004).

A fervura, possibilita esterilizar o mosto, coagular proteínas e realizar a isomerização das substâncias do lúpulo. Nesta etapa, qualquer contaminante biológico é eliminado, com tempo variável de estilo para estilo, mas que geralmente é superior a 60 minutos de fervura (PALMER, 2014; MOSHER, 2015).

Após a realização da fervura, o mosto é resfriado a temperatura adequada para o tipo de levedura que será utilizada e transferido para o fermentador. A levedura é inoculada, e o processo ocorre períodos de 7 a 14 dias em temperatura controlada.

Após completada essa fase, pode ser iniciado o processo de maturação, onde subprodutos oriundos da fermentação podem ser consumidos pelas leveduras e outras partículas sólidas são removidas na etapa de filtragem. Após concluída essas etapas é realizada a pasteurização e o envase (PALMER, 2014).

2.2. TECNOLOGIAS

A centralização de serviços especialistas possibilitou o que hoje é chamado de computação em nuvem. Esses recursos computacionais e tecnologias, são fornecidas por empresas como Google, Amazon, IBM e Microsoft.

Serviços conhecidos como e-mail, edição de documentos, planilhas, agenda, armazenamento de arquivos são os mais comuns. No entanto, a gama de serviços vêm sendo ampliada e o banco de dados de tempo real, além do aprendizado de máquina, já fazem parte do escopo de serviços dessas companhias (TAURION, 2009).

Essa disponibilidade de armazenamento e processamento de informações, remotamente, criou uma demanda maior por coleta de dados, que podem ser realizados por sensores, celulares, relógios e outros dispositivos.

A crescente necessidade de coleta e troca de dados entre dispositivos que inicialmente não podiam se comunicar, juntamente com a evolução tecnológica de sensores e dispositivos eletrônicos fez com que o professor Kevin Ashton do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) percebesse a tendência e descrevesse esse padrão de desenvolvimento tecnológico como Internet das Coisas (*Internet of Things*) (SILVA ET AL., 2017).

Dispositivos e outros microprocessadores e microcontroladores se tornaram populares, por possuírem interface e uma sensores que auxiliam a coleta de dados, além de serem equipamentos considerados de baixo custo.

No âmbito dos microprocessadores, o Raspberry Pi 3 Model B+ se destaca por suas especificações técnicas. É alimentado por Broadcom BCM2837B0, com um processador Cortex-A53 (ARMv8) de 64 bits com operação a 1,4GHz. Possui de 1GB de memória RAM LPDDR2, rede LAN e sem fio IEEE 802.11.b/g/n/ac de 2,4GHz e 5GHz. Bluetooth 4.2, BLE, e Ethernet Gigabit via USB 2.0. Possui GPIO estendido de 40 pinos, entrada de vídeo HDMI, quatro portas USB 2.0. Entrada para dispositivo de armazenamento micro SD, utilizado para carregar o sistema operacional e armazenar dados, entre outros recursos (RASPBERRY PI, 2023).

Para a troca de dados, um protocolo que muito utilizado é o MQTT, ou transporte de telemetria de enfileiramento de mensagens (*Message Queuing Telemetry Transport*). Esse, tornou-se um protocolo importante para comunicação entre dispositivos IoT por ser específico para pequenas mensagens e ideal para dados de sensores (SONI & MAKWANA, 2017).

O Broker MQTT é um sistema responsável por receber todas as mensagens enviadas por um aplicativo que publica suas informações referentes a um determinado tópico. Filtra as mensagens e as envia para todos os clientes subscritos no tópico (SONI & MAKWANA, 2017).

O InfluxDB é um banco de dados de séries temporais e armazena dados associados a eventos temporais e métricas. Os dados no InfluxDB são organizados numa estrutura de tabela bidimensional conhecida como métrica. Nesta estrutura, uma coluna é especificamente reservada para os registros de data e hora. As colunas adicionais são classificadas em duas categorias: ou elas são campos ou são etiquetas (BEERMANN ET AL, 2020).

O PostgreSQL é um sistema gerenciador de banco de dados relacional que possibilita a organização dos dados em tabelas, registros e atributos, em que cada atributo possui um domínio específico (FERRARI & PIROZZI, 2020). Neste trabalho foi o sistema utilizado para o armazenamento dos dados históricos de produção.

De acordo com Chakraborty e Kundan (2021), o monitoramento se refere à visão completa de um processo, proporcionando uma percepção sobre o estado de um sistema. Possibilitar aferir se o comportamento realizado está de acordo com o esperado, e em casos de anomalias, notificar os administradores. Dessa maneira, possibilitar a correção de problemas e evitar sua recorrência.

O monitoramento das operações foi realizado utilizando o software gratuito Grafana. Através dele foram criados painéis de controle, mais comumente chamados de *Dashboards*. Uma *Dashboard* é uma composição de vários painéis. Cada painel apresenta um conjunto específico de informações, quando combinados, criam um painel de controle para um determinado ambiente ou processo (CHAKRABORTY & KUNDAN, 2021).

3. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo foi construído com capacidade de executar tarefas programadas para a produção de cerveja em escala de bancada, com volumes entre 4 e 5 litros. O protótipo coletou dados e os armazenou em serviços de nuvem, além de fornecer orientações ao responsável pelos experimentos.

A construção do protótipo foi realizada em três etapas, infraestrutura, hardware (módulo de controle) e software. Para a montagem da infraestrutura planta reduzida, foram utilizados dois barris tipo postmix 19 litros de aço inox, para a confecção do vaso de aquecimento e do vaso principal. Os barris foram redimensionados para acomodar 6,5 litros e fixados com parafusos de 8 mm em colunas de tubos quadrados 20x20 mm de aço inox.

Para realizar a transferência de líquidos entre o vaso de aquecimento e o vaso principal foram feitas conexões utilizando dois espigões macho, dois espigões fêmea de 1/2" e dois tees fêmea 1/2" aço inox. Três válvulas PP bipartida fêmea de 1/2" foram instaladas para gerenciar o fluxo dos líquidos entre os vasos e processos de bombeamento.

Uma válvula na saída do vaso de preaquecimento, uma na saída da bomba alimentícia de 12 VDC 8 W para recirculação e agitação do mosto e uma válvula na saída da cerveja.

Para o sistema de resfriamento, foi utilizado uma serpentina de aço inox de 3/8", a qual foi instalada dentro do vaso principal e conectada por mangueira a um repositório de água de 65 litros. Para recircular a água do repositório pela serpentina e resfriar o mosto, foi utilizada uma bomba de 34 W de potência, frequência 60 Hz, 220 VAC.

Para a instalação do hardware eletrônico prover interface aos dispositivos que seriam acionados via software, foi construído um módulo de controle, em uma caixa 30x30x15 cm, onde foram fixados três relés de estado sólido 30 A para acionar as resistências e bomba do repositório de água.

A resistência utilizada no vaso de preaquecimento foi um ebulidor de 2000 W e no vaso principal de 600 W, ambas 220 VAC. Os três relés SRD-12VDC-SL-C, são utilizados para acionamento da bomba alimentícia de 12 V 8 W e válvula solenoide 12 VDC/NF (normalmente fechada).

Para alimentação das resistências e dos componentes eletrônicos, uma entrada de 220 VAC, fornece energia a uma fonte chaveada de 12 VDC, 5 A e 60 W bivolt, que fornece energia aos dispositivos de 12 VDC. Foi fixada no módulo de controle a placa controladora Raspberry Pi 3 Model B+, que foi plataforma utilizada para automação, gerenciamento das operações e coleta de dados.

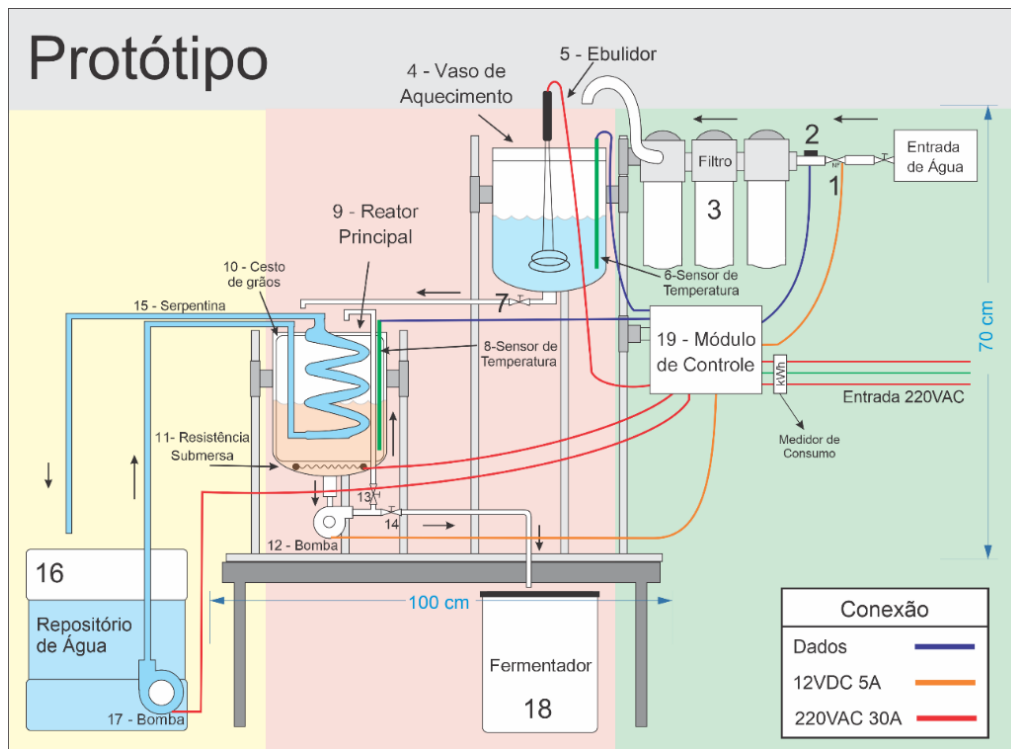
Sobre a placa Raspberry Pi, foi instalado o shield que fornece oito saídas de controle 12 VDC de nível lógico. Também possui duas entradas para sensores com alimentação de 3,3 VDC e cinco entradas para sensores de um fio de comunicação.

Um micro ventilador 40x40x20 mm 12 VDC foi fixado na caixa para refrigerar os componentes eletrônicos. Para a leitura de dados, 3 cabos de 3 vias e 2 metros de comprimento foram utilizados para instalação dos sensores de temperatura DS18B20 e fluxo de água YF-S201.

O sensor de fluxo de água YF-S201 de 1/2" opera em temperatura entre -20 e 80 °C, faixa de tensão de trabalho 5 ~ 18 VDC, com intervalos de fluxo de 1 a 30 L/min, e pressão $\leq 1,75$ MPa. O sensor de temperatura DS18B20 atua em voltagens de 3 até 5,5 VDC, com faixa de atuação entre -55 e 125 °C, precisão de +/- 0,5 °C de -10 a 85 °C, interface de um fio.

A figura 2 apresenta a planta para a produção de cerveja artesanal em escala experimental e está dividida em três áreas. Na área verde da figura 1, a entrada da água é acionada por uma válvula solenoide (1), um sensor de fluxo de água (2) é utilizado para medir a água utilizada e que passa por um filtro de três estágios (3).

Figura 2 – Projeto do Protótipo



Fonte: o autor, 2023

A área vermelha da figura 2 apresenta o vaso destinado ao preaquecimento da água. O vaso de preaquecimento (4) e o vaso principal (9) possuem capacidade de armazenamento de 6,5 litros e possibilitou o protótipo a produzir entre 4 litros e 5 litros de cerveja.

No vaso de preaquecimento (4) foi instalado o sensor de temperatura DS18B20 (6) e o ebulidor fixado ao centro (5). Na base do vaso de aquecimento foi instalado válvula (7) que o sistema notifica o pesquisador o momento de abrir ou fechar de acordo com a programação.

O vaso principal (9) possui um cesto de grãos (10) utilizado para separar os grãos do mosto após a conclusão da mostura e lavagem de grãos. Ligadas ao módulo de controle, no fundo do vaso principal, está instalado uma resistência de 600 W (11) e uma bomba alimentícia de 12 VDC 8 W (12). Na bomba (12) estão instaladas duas válvulas, uma válvula (13) é utilizada para regular o fluxo de retorno para o vaso e a outra válvula (14) regula a saída da cerveja para o fermentador.

Algumas partes móveis precisam ser ajustadas durante o processo. Na figura 2 após a conclusão da mostura e lavagem dos grãos, o cesto de grãos (10) deve ser removido para o processo de fervura. Finalizada à fervura, a parte móvel serpentina ou trocador de calor (15) deve ser instalada no vaso principal (9) para resfriar o mosto.

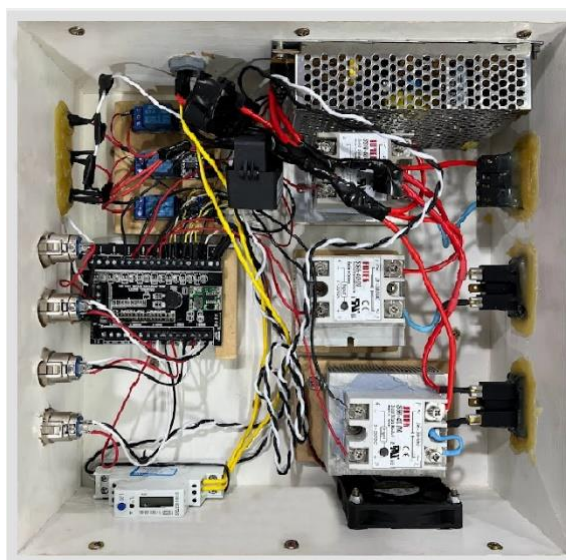
Na área amarela da figura 2 foi instalado um repositório de água (16) de 65 litros, utilizada para resfriar o mosto, que (17) bombeia água através de uma serpentina de aço inox de 3/8"

(15) que é instalada dentro do vaso principal (9) e utilizado como trocador de calor. Ao atingir a temperatura desejada, o mosto é transferido para o fermentador (18) na área vermelha.

O controle das operações e coleta de dados, realizado pelo módulo de controle (19), apresentado na figura 2, foi responsável por monitorar os dados de temperatura nos vasos, consumo água, energia elétrica.

O módulo de controle, que acomoda os componentes eletrônicos, auxiliou na execução dos procedimentos programados, gerenciou e notificou as operações executadas pelo pesquisador. O consumo de energia foi registrado por um medidor de energia WiFi 220 VCA 100 A. Detalhes sobre sua implementação podem ser vistos na figura 3.

Figura 3 – Módulo de Controle



Fonte: o autor, 2023

Para separar os grãos do mosto, o cesto apresentado na figura 4, é instalado dentro do vaso principal, com um fundo falso malha de 40 micra, onde o malte é depositado para mostura. Após a conclusão da mostura e lavagem dos grãos, o cesto é retirado para que seja realizada a fervura do mosto no mesmo vaso.

Figura 4 – Vaso Principal, Cesto de grãos e Trocador de Calor



Fonte: o autor, 2023

Esse processo é realizado através do bombeamento da água armazenada na bombona de 65 litros. Toda água utilizada para resfriamento do mosto pode ser reutilizada para um

próximo experimento. De acordo com as especificações do projeto apresentado na figura 2, a infraestrutura construída é apresentada na figura 5, foi fixada sobre uma base móvel e pode ser realocada para outra bancada.

Figura 5 – Planta



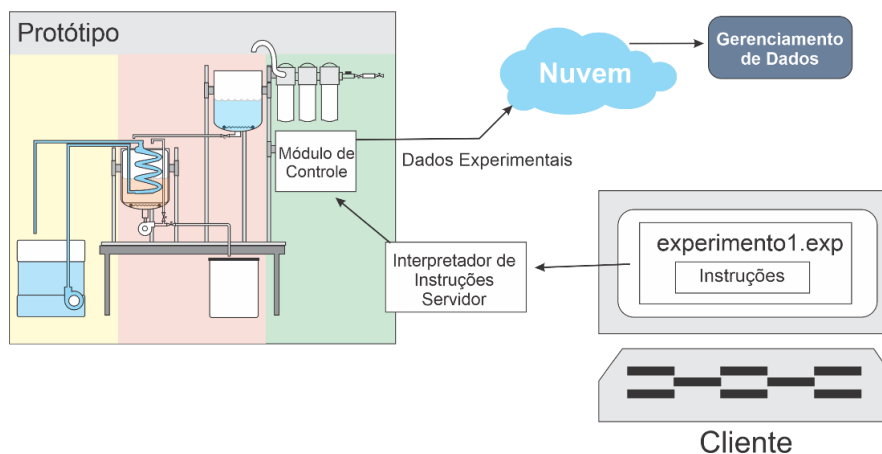
Fonte: o autor, 2023

Para o processo de automação, gerenciamento das operações e a coleta de dados, foi utilizado um Raspberry Pi 3 Model B+ juntamente com um software que foi desenvolvido em Python, em arquitetura cliente e servidor utilizando sockets, especificamente para atender as demandas do projeto.

Instalado no Raspberry PI, a função do servidor é controlar as etapas de produção, como adição e medição de água, abertura de válvula solenoide, aquecimento e controle de temperatura das operações a serem realizadas.

O cliente, instalado no computador que controla o sistema é responsável por enviar e solicitar a realização das operações. Estas são descritas em um arquivo através de um conjunto de instruções que o servidor foi programado para interpretar, como mostra na figura 6.

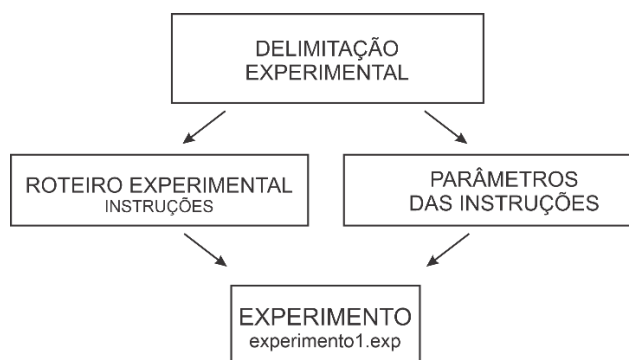
Figura 6 - Comunicação de Dados



Fonte: o autor, 2023

Para criar um arquivo de instruções, o indivíduo que controla o sistema irá realizar a delimitação experimental, onde define o que precisa ser feito e como, definido pelas instruções que o protótipo pode executar. Também é necessário definir os parâmetros que cada instrução irá receber, conforme mostrado na figura 7.

Figura 7 – Elaboração de Experimentos



Fonte: o autor, 2023

Abaixo as instruções realizadas pelo protótipo e as operações que elas realizam.

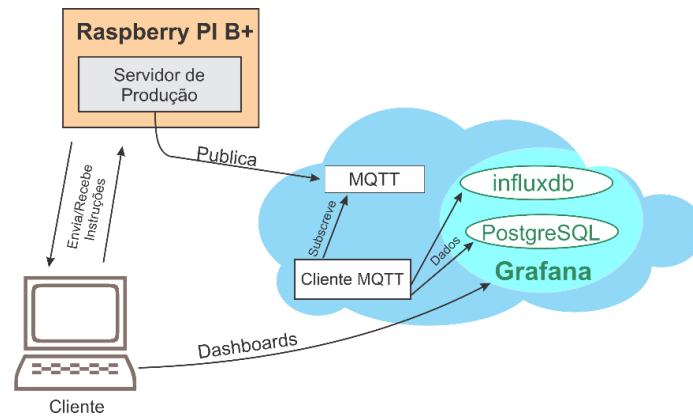
Elas podem ser combinadas de acordo com as necessidades da pesquisa e os objetivos experimentais:

- **startbrew()**: Iniciar brassagem (Sinal Sonoro Triplo).
- **addwater(3500)**: Adicionar água no vaso de preaquecimento, parâmetro em mL.
- **preheat(66)**: Acionar resistência do vaso de preaquecimento, parâmetro em °C.
- **notification('Mensagem')**: Notificar e orientar o indivíduo durante o processo experimental.
- **ramp(66, 75, 1)**: Acionar a resistência, parâmetros, temperatura °C, tempo (min), bomba de recirculação(0-Inativa, 1-Ativada).
- **basketsuspension(2)**: Notificar indivíduo para realizar a suspensão do cesto de grãos, parâmetro tempo (min).
- **cooling(35)**: Ativa bomba do trocador de calor ligada ao repositório de água para resfriar o mosto, parâmetro tempo (min).
- **wortout(1)**: Notifica o indivíduo de que o processo acabou e orienta a transferência para o fermentador, parâmetro tempo (min).
- **endbrew()**: Fim da produção.

Durante as etapas de produção, as instruções programadas executaram as operações e os dados foram registrados e enviados utilizando o protocolo MQTT para um broker na nuvem. As operações realizadas nos ensaios experimentais foram monitoradas através das Dashboards desenvolvidas no Grafana, com os dados armazenados no InfluxDB e PostgreSQL.

Para que os dados fossem exibidos no Grafana, um cliente MQTT desenvolvido em Python, coletou as publicações dos tópicos do broker MQTT e as enviou para o InfluxDB. Após a conclusão da produção experimental os dados são armazenados para registro histórico no PostgreSQL, como mostra a figura 8.

Figura 8 – Arquitetura do Sistema



Fonte: o autor, 2023

Para realizar o monitoramento dos ensaios, foram criadas *dashboards*, configuráveis para período de atualização de dados e exibição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar a precisão e a variabilidade experimental, foram conduzidos quatro ensaios utilizando o protótipo desenvolvido. Esses ensaios foram projetados para avaliar a consistência dos dados coletados, bem como identificar a precisão e a variabilidade dos resultados obtidos.

Durante os ensaios, foram monitoradas as variáveis de saída gravidade original, produtividade (medido em mL) e o consumo de energia elétrica (medido em kWh).

4.1. Materiais

Nos ensaios realizados para a produção de 4 litros de cerveja, cada ensaio utilizou proporção de 1 kg de malte para 3,5 litros de água na mosturação, e 3 litros de água para lavagem dos grãos, totalizando 6,5 litros de água. Para o amargor, foram utilizadas 7 g de lúpulo Saaz.

4.2. Métodos

Cada ensaio utilizou 1 kg de malte e 3,5 litros de água para a mosturação, que foi realizada a uma temperatura de 66°C durante 75 minutos. Após a mosturação, ocorreu a recirculação e a lavagem dos grãos com 3,0 litros de água aquecida a 78°C. O mosto resultante foi então fervido. Durante a fervura, 7 g de lúpulo Saaz foram adicionados. Após 60 minutos de fervura, o mosto foi resfriado até a temperatura de 35°C. No quadro 1, as instruções programáveis necessárias para executar as operações descritas:

Quadro 1 – Instruções Experimentais

```

startbrew()
addwater(3500)
preheat(66)
notification('Abrir a válvula 1.')
notification('Iniciar a transferência da água pré-aquecida.')
notification('Adicionar o malte ao cesto de grãos do vaso principal.')
notification('A mosturação será realizada em uma rampa de temperatura de 66°C')
notification('Bomba de recirculação ativada, por um período de 75 minutos.')
ramp(66, 75, 1)
notification('Finalização da mosturação.')
notification('Iniciar a rampa de temperatura para o mash out a 78°C.')
ramp(78, 1, 1)?S
basketsuspension(2)
notification('Suspender cesto de grãos.')
notification('Realizar lavagem de grãos.')
addwater(3000)
preheat(78)
transfill(0.5)
notification('Realizar fervura, adicionar o lúpulo.')
ramp(100, 60, 0)
notification('Instalar trocador de calor no vaso principal.')
cooling(35)
notification('Transferir mosto para o fermentador.')
wortout(1)
endbrew()

```

Fonte: o autor, 2023

Essas operações foram então armazenadas em arquivo tipo texto, mas com a extensão exp. O aplicativo cliente, enviou os dados das instruções para o servidor no módulo de controle que realizou as tarefas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de tempo real foram exibidos através de uma *dashboard* chamada Vasos. Esta apresenta apenas os dados de temperatura do vaso principal, vaso de preaquecimento e o período em que as resistências ficaram acionadas, como mostra a figura 9.

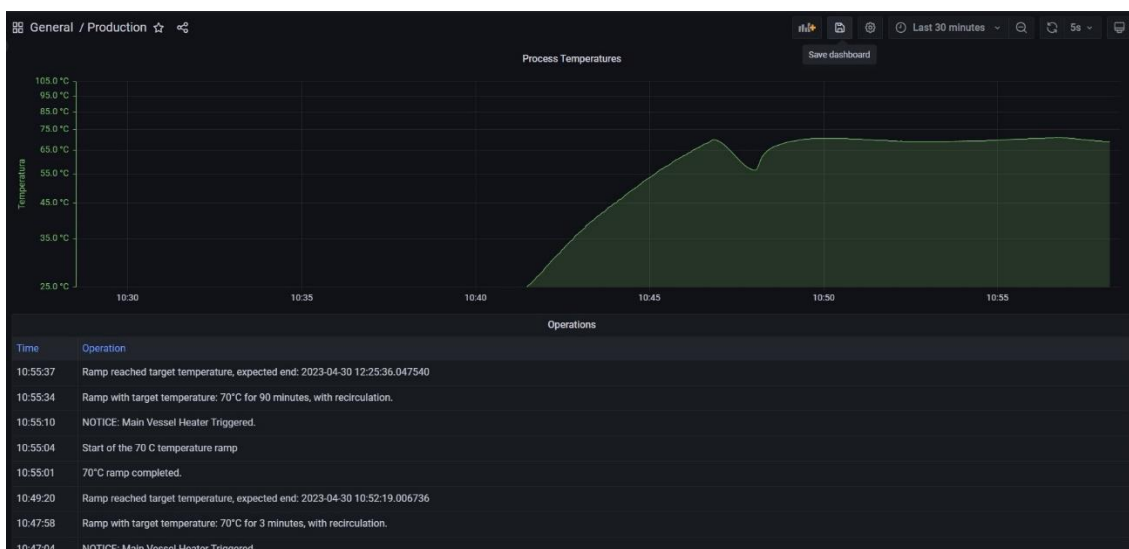
Figura 9 – Dashboard Vaso



Fonte: o autor, 2023

Os dados que abordam as etapas do processo produtivo foram apresentados na dashboard chamada Produção. Esta dashboard foi projetada para oferecer uma visualização da temperatura atual do mosto, e os processos que estão sendo realizados pela programação, como pode ser visto na figura 10.

Figura 10 – Dashboard Produção



Fonte: o autor, 2023

Todas as operações realizadas nesse processo são apresentadas em uma tabela de operações, com data e hora, e os parâmetros especificados para cada processo. E pode ser acompanhado pelo operador do experimento com os dados em tempo real.

Nas quatro provas realizadas foram tomadas medidas de gravidade original, que apresentaram os resultados 1,045, 1,043, 1,045 e 1,044. O coeficiente de variação foi de 0,2%, com erro de precisão de 0,1%. Estes resultados indicam que os ensaios demonstraram boa precisão e baixa variabilidade.

Em relação ao consumo elétrico, observou-se que a média para cada ensaio foi de 1,56 kWh para a produção e 0,61 kWh para a sanitização do equipamento, totalizando 2,17 kWh por ensaio e um total de 8,68 kWh para os quatro ensaios. Isso indica um consumo de energia de 0,55 kWh por litro de cerveja produzida.

Os resultados obtidos mostram que cada ensaio consumiu um total de 18,5 litros de água, sendo 6,5 litros destinados diretamente à produção e 12 litros em operações de sanitização do equipamento. Que resulta em uma proporção de 4,6 litros de água consumida por litro de cerveja produzida.

As pequenas cervejarias apresentam um consumo de quase 18 litros de água e um consumo elétrico de 6,41 kWh, para cada litro de cerveja produzida. Enquanto as grandes cervejarias,

mostram uma maior eficiência, e consomem 4,89 litros de água e um consumo elétrico de 0,55 kWh, para produzir um litro de cerveja (BREWERS ASSOCIATION, 2017).

Para o resfriamento do mosto, é comum o desperdício de água, tanto em ambiente experimental quanto em produções de menores escalas. Utiliza-se água da rede pública de abastecimento para resfriar o mosto e em seguida a água é descartada. Por isso, o uso do repositório de água para resfriamento do mosto, que pode ser reutilizado diversas vezes contribui para que experimentos não desperdicem água.

Esses resultados destacam o consumo de recursos envolvidos no processo de fabricação de cerveja e salientam a importância de considerar esses fatores ao se buscar a otimização da produção.

A forma de programação do protótipo possibilita a criação de planos experimentais complexos, com diversas etapas, rampas de temperatura e volumes de água diferentes. As alterações desses parâmetros podem auxiliar a identificar uma direção para otimização de recursos, com relação à gravidade original, consumo de energia elétrica e água.

6. CONCLUSÃO

A produção de cerveja, independente da sua escala, é um processo complexo e necessita de total controle, tanto para que seja obtido um produto de qualidade, quanto para que o processo seja eficiente e sustentável.

Portanto, o protótipo construído possibilitou realizar os ensaios e coletar os dados, pois o sistema foi desenvolvido para realizar tarefas programadas e registrar dados com consistência e mínima variação. Esses resultados corroboram a eficiência do protótipo automatizado na produção de cerveja em escala de bancada e indicam bons resultados de replicabilidade de experimentos.

A automação de processos e coleta de dados utilizando recursos das tecnologias de IoT podem auxiliar microcervejarias e experimentadores de novos produtos ou até mesmo melhorados, a partir da obtenção de mais informações sobre seus processos e buscar formas de aprimorá-los. Mesmo que todos os recursos ou operações não sejam automatizadas, a coleta de dados automatizada é fundamental para qualquer ambiente de monitoria e aprimoramento de produção.

Com os dados de produção no ambiente experimental, o protótipo possibilita prospectar técnicas mais eficientes do ponto de vista energético, conversão de açúcares e produtividade, contribuindo desta maneira com a eficiência energética e a sustentabilidade.

7. REFERÊNCIAS

BEERMANN, T. *et al.* Implementation of ATLAS Distributed Computing monitoring dashboards using InfluxDB and Grafana. **EPJ Web Conf.**, v. 245, p. 3031, 2020.

BREWERS ASSOCIATION. 2017 Sustainability Benchmarking Report. [s.l: s.n.].

CHAKRABORTY, M.; KUNDAN, A. P. **Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software**. Berkeley: Apress, 2021.

FERRARI, L.; PIROZZI, E. **Learn PostgreSQL: Build and manage high-performance database solutions using PostgreSQL 12 and 13**. Birmingham: Packt Publishing, 2020.

FUNCK, V. M.; OTHERS. Análise do uso de recursos naturais e alternativas para aumentar a eficiência de produção em cervejarias de pequena escala: um estudo de caso. Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2022.

KUNZE, W.; PRATT, S.; MANGER, H. J. **Technology Brewing and Malting**. Berlin: VLB, 2004.

LOPES, S. R. A utilização do reuso de efluente industrial: uma análise do impacto no consumo de água na cervejaria no Brasil. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Pesca). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MORADO, R. **Larousse da cerveja: A história e as curiosidades de uma das bebidas mais populares do mundo**. São Paulo: Alaúde Editorial, 2017.

MOSHER, R. **Mastering Homebrew: The Complete Guide to Brewing Delicious Beer**. San Francisco: Chronicle Books LLC, 2015.

PALMER, J. J. **How to Brew: Everything you need to know to brew beer right the first time** (4rd ed.). Brewers Publications, 2014.

PALMER, J.; KAMINSKI, C. **Water: a comprehensive guide for brewers**. Kristi Switzer, 2013.

RASPBERRY PI. disponível em <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-1-model-b-plus/>, acesso em 22 de agosto de 2023.

SILVA, R. A. DE *et al.* **Aplicando Internet das Coisas na Educação: Tecnologia, Cenários e Projeções**, 2017.

SONI, D.; MAKWANA, A. a Survey on Mqtt: v. Vol. 20, n. April, p. 173–177, 2017.

TAURION, C. **Cloud computing-computação em nuvem**. Rio de Janeiro: Brasport, 2009.

8. APÊNDICE C – OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E FUNÇÕES DE DESEJABILIDADE

ARTIGO C – Benacchio A, Padilha Botton J, Arrieche Silva L, Otimização na Produção de Cerveja utilizando Superfície de Resposta e Funções de Desejabilidade. Artigo em revisão para submissão, com previsão de submissão para a Revista Holos.

OTIMIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CERVEJA UTILIZANDO SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E
FUNÇÕES DE DESEJABILIDADE

Alcione Benacchio, Janine Padilha Botton, Leonardo Arrieche da Silva

Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-
Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território – PPGIES – Universidade Federal da
Integração Latino-Americana, Brasil.

RESUMO

Ao considerar o panorama da sustentabilidade, cervejarias, especialmente as artesanais, enfrentam o desafio de conciliar um consumo energético eficiente com o uso adequado das matérias-primas, reduzindo o impacto ambiental sem sacrificar a produtividade. Neste contexto, avaliar a eficiência produtiva considerando múltiplas variáveis de resposta é desafiador, especialmente quando a sustentabilidade está entre os objetivos. Este trabalho buscou maximizar a produtividade e a gravidade original, ao mesmo tempo em que minimizou o consumo energético na produção de cerveja. Para isso, foi utilizada a metodologia de superfície de resposta e funções de desejabilidade, em um planejamento composto central rotacional de 2^3 , com 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, através dos fatores relação água/malte, rampa de temperatura e tempo de mosturação, para analisar as variáveis de resposta consumo energético, gravidade original e a produtividade. O modelo preditivo desenvolvido determinou um ponto de otimização de relação água/malte de 3950 mL por kg de grist de malte, temperatura de mostura a 60°C, por um período de 60 minutos. Esses dados foram validados por experimentos posteriores com uma variação inferior a 5%, obtendo uma produtividade média de 4113 mL, consumo de energia de 1,57 kWh e uma gravidade original de 1,0455. A partir dessas observações, conclui-se a possibilidade de otimizar a produção de cerveja considerando múltiplas variáveis de resposta no ambiente experimental, buscando alinhar produtividade e sustentabilidade.

Palavras-Chave: Modelo preditivo, Produtividade, Rendimento, Energia, Sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A produção de cerveja é uma atividade que tem acompanhado o desenvolvimento da humanidade desde o período pré-histórico. Historiadores especulam que seu surgimento possa ter ocorrido acidentalmente, quando a humanidade deixou de ser nômade, caçador-coletor, e passou a viver da agricultura e do cultivo de cereais (MORADO, 2017).

Com o avanço da indústria, a produção cervejeira evoluiu consideravelmente graças ao desenvolvimento de máquinas e técnicas mais eficientes. No entanto, esse progresso trouxe consequências. A indústria cervejeira, incluindo as cervejarias artesanais, gera impactos negativos ao meio ambiente devido ao alto consumo de água e energia, bem como à produção de efluentes e resíduos sólidos (BAIANO, 2021).

O aprimoramento das técnicas de produção e otimização de recursos é essencial para que as cervejarias possam atuar de forma mais sustentável e diminuam os impactos ambientais, sem afetar o custo do produto (ALBANESE et al., 2017).

Muitos fatores podem influenciar o processo produtivo e a análise de eficiência pode ser feita considerando diversas variáveis. Neste contexto, é importante que a produção não seja apenas eficiente, mas também que o uso dos recursos naturais seja levado em conta para garantir uma atividade mais sustentável.

Para otimizar a produção é necessário analisar os processos e identificar quais variáveis controláveis podem contribuir para o aumento da produtividade e a redução do consumo de recursos. A metodologia de superfície de resposta disponibiliza um conjunto de técnicas estatísticas e matemáticas destinadas ao desenvolvimento, melhoria e otimização desses processos. Também pode ser aplicada ao aprimoramento e desenvolvimento de novos produtos (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Essa metodologia é amplamente utilizada na indústria, especialmente quando diversas variáveis de entrada podem afetar uma medida de desempenho ou qualidade de um produto ou processo. Nesse caso, a medida é chamada de resposta, e é comum que a metodologia de superfície de resposta aborde mais de uma resposta simultaneamente (MYERS, MONTGOMERY & ANDERSON-COOK, 2009).

Com o objetivo de otimizar múltiplas respostas, Derringer e Suich (1980) apresentaram uma abordagem de transformação de respostas em funções de desejabilidade. Essa técnica permite aplicar critérios distintos para adequar cada resposta a parâmetros individuais de desejabilidade. Posteriormente, essas funções são combinadas para otimizar uma resposta global.

Este trabalho aborda o uso dessas técnicas para analisar a hipótese de que, dada uma composição específica de maltes, existe uma combinação ideal de tempo, temperatura e relação água/grist de malte na etapa de mosturação. Essa combinação maximiza a produtividade e a gravidade original, ao mesmo tempo que minimiza o consumo de energia elétrica na produção de cerveja.

2. MÉTODOS E MATERIAIS

2.1. MATERIAIS

Para a realização dos experimentos, utilizou-se água proveniente da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). A água foi coletada diretamente da rede pública de distribuição e filtrada através de um filtro triplo. Este é composto por um pré-filtro de sedimentos de polipropileno de 9.3/4" e 15 micras, com o objetivo de remover partículas sólidas maiores, como areia, barro e outras impurezas. Passa em sequência por mais dois filtros, ambos de 9.3/4" e 5 micras de carvão ativado, para remover possíveis substâncias orgânicas, cloro, odores e sabores indesejáveis da água.

Existe uma grande variedade de maltes comercialmente produzidos no mercado. Cada um deles possui características distintas. Ao combinar diferentes proporções de maltes é possível produzir cervejas de diferentes perfis, Silva Neto et al., (2016).

A seleção de maltes foi realizada conforme definido pelo *Beer Judge Certification Program* (BJCP, 2023), para características correspondentes ao estilo Munich Helles. A mistura utilizada no grist compõe 70% de Malte Pilsen da Agrária, 20% de Malte Munique da Agrária e 10%

de Malte Carapils da Weynerman. A moagem do grist foi realizada com um moinho motorizado de 3 rolos, com distância entre os rolos de 1,3 mm.

O lúpulo utilizado foi o Saaz, pellet T90, safra 2021, lote 21-779, do fabricante Barth Haas, proveniente da República Tcheca, produzido em janeiro de 2022 e com validade até janeiro de 2025. Apresenta alfa ácido de 3,80% e beta-ácidos entre 4,5% e 8,0%. Possui cohumulona entre 23% e 26% dos alfa-ácidos, óleos totais entre 0,4 mL/100g e 1,0 mL/100g, mircenos entre 25% e 40% dos óleos totais, humuleno entre 15% e 25% dos óleos totais, cariofileno entre 10% e 12% dos óleos totais e farneseno entre 14% e 20% dos óleos totais.

Para a fermentação foi utilizada a cepa de levedura Kveik Voss (LALLEMAND, 2023), do fabricante Lallemand. De acordo com as especificações técnicas descritas no datasheet do fabricante, esta levedura pode ser utilizada em fermentações em temperaturas que podem variar entre 25 e 40°C, sendo a faixa ótima entre 35 e 40°C para obter fermentações com atenuação total entre 2 e 3 dias.

2.2. MÉTODOS

A mosturação pode ser realizada em tempos e temperaturas diferentes para obter diferentes tipos de açúcares fermentáveis. Considerando esses aspectos e os fatores controláveis do processo de mosturação, na tabela 1, estão os fatores utilizados no planejamento experimental.

Tabela 1 – Fatores

Fator	Descrição
Água	Proporção de água utilizada no processo de mostura para 1 kg de grist de malte.
Rampa	Temperatura da rampa principal utilizada na mostura.
Tempo	Tempo de duração da rampa principal em minutos.

Fonte: o autor, 2023

Utilizando informações da bibliografia, foram identificados parâmetros para os fatores. Para a proporção de água e malte entre 3.000 mL e 4.000 mL para cada 1 kg do *grist* de maltes, utilizando rampas ideais de temperatura 62°C β -amilase e 70°C α -amilase, por períodos entre 60 e 90 minutos (EVANS et al., 2005 E PALMER, 2014), apresentados na tabela 2. Para Rampas de temperatura Muxel (2022) apresenta limites mínimos de 60°C para β -amilase e máximo de 75°C para α -amilase. Obtendo as variáveis de resposta, produtividade (mL), conversão de açúcares (O.G.), e consumo energético (kWh).

Tabela 2 – Variáveis de Entrada

Fator	Descrição	Unidade de Medida	Mínimo	Máximo
Água	Relação água/malte usada na mostura	mL	3.000	4.000
Rampa	Temperatura de realização da mostura	°C	62	70
Tempo	Tempo realização da mostura	MIN	60	90

Fonte: o autor, 2023

Com o objetivo de realizar inferência com confiabilidade estatística e economia na experimentação, evitando o desperdício de recursos, a metodologia adotada para a modelagem experimental foi a técnica de superfície de resposta (RSM). Após a definição dos fatores e variáveis de resposta, foi utilizado um delineamento experimental composto central rotacional de 2^3 . A este modelo foram adicionados 4 pontos centrais e 6 pontos axiais, resultando em uma matriz de 18 experimentos.

A análise estatística deste estudo foi realizada utilizando a linguagem de programação R 4.3.0. Na análise das respostas, utilizou-se o método de funções de desejabilidade, transformando múltiplas respostas em uma única função objetivo otimizável. Complementarmente, foi construído um modelo de previsão, que permite estimar resultados futuros com base em parâmetros específicos de entrada.

Para a realização dos experimentos foi utilizado um protótipo automatizado desenvolvido para produção de cerveja em escala de 4 a 5 litros que, por meio de um conjunto de instruções programáveis realizou as operações dos procedimentos experimentais. O sistema registrou informações referentes ao consumo de energia elétrica, consumo de água, processos realizados e o controle de temperatura.

O processo de produção foi iniciado com a adição de água no vaso de pré-aquecimento para elevar a temperatura da água até a temperatura de mostura, de acordo com o plano experimental. A água foi transferida para o vaso principal, onde o grist de malte foi adicionado e realizado o *mash in* (início da mosturação).

O processo de mostura foi mantido em recirculação constante, por tempo e temperatura definidos pelo planejamento experimental. Após o término da mostura, iniciou-se o *mash out* (inativação de enzimas), com temperatura de 78°C , por um minuto.

Após a conclusão dessa fase, foi realizada a suspensão do cesto de grãos para escoamento do mosto. No vaso de pré-aquecimento foi adicionado o restante da água para completar 6,5 L e aquecido até 78°C , então, o cesto de grãos foi colocado no vaso de pré-aquecimento para realizar o processo de lavagem de grãos.

O conteúdo foi transferido para o vaso principal, junto com mosto inicial. Então, iniciado o aquecimento para fervura, por 60 minutos. Ao iniciar a fervura 8g de lúpulo foram adicionados ao mosto.

Ao concluir a fervura, foi instalado no vaso principal uma serpentina de aço inox, conectada a um repositório de água reciclável para resfriar o mosto até 35°C . Ao resfriar o mosto, foi realizada a transferência para um balde de polietileno de 7 L, utilizado como fermentador, onde foi inoculada a levedura. A fermentação ocorreu em temperatura constante de $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 5 dias.

O processo de envase da cerveja foi realizado em garrafas de 600 mL. Para a carbonatação, foi utilizado *priming* de 4,1 g de açúcar cristal por garrafa, para uma produção estimada de 2,5 volumes de CO₂ (PALMER, 2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a elaboração da matriz experimental que descreve as variáveis independentes codificadas, decodificadas e as variáveis de resposta, como mostra a tabela 3. Foram realizados os modelos de regressão para as respostas, kWh, O.G. e mL.

Tabela 3 – Matriz com variáveis codificadas, decodificadas e respostas

N	Codificadas			Decodificadas			Respostas		
	x1	x2	x3	Água	Rampa	Tempo	kWh	O.G.	mL
1	-1	-1	-1	3000	62	60	1,47	1,039	4171
2	1	-1	-1	4000	62	60	1,50	1,044	4142
3	-1	1	-1	3000	70	60	1,49	1,041	4120
4	1	1	-1	4000	70	60	1,58	1,043	4069
5	-1	-1	1	3000	62	90	1,54	1,041	4048
6	1	-1	1	4000	62	90	1,61	1,045	4088
7	-1	1	1	3000	70	90	1,60	1,043	4017
8	1	1	1	4000	70	90	1,68	1,044	4060
9	-1,68179	0	0	2659	66	75	1,52	1,038	4079
10	1,68179	0	0	4340	66	75	1,56	1,045	4038
11	0	-1,68179	0	3500	59	75	1,55	1,044	4101
12	0	1,68179	0	3500	72	75	1,57	1,044	4037
13	0	0	-1,68179	3500	66	49	1,51	1,040	4207
14	0	0	1,68179	3500	66	100	1,63	1,044	4049
15	0	0	0	3500	66	75	1,58	1,045	4090
16	0	0	0	3500	66	75	1,55	1,045	4082
17	0	0	0	3500	66	75	1,59	1,043	4098
18	0	0	0	3500	66	75	1,53	1,044	4091

Fonte: o autor, 2023

Para a variável de resposta kWh, foi realizada uma regressão utilizando termos de primeira ordem, interação dupla e quadráticos. Os coeficientes da regressão que não apresentaram significância estatística até 5% do teste F e do seu respectivo Valor p foram excluídos.

O modelo de regressão da variável de resposta kWh, foi ajustado em função dos termos de primeira ordem que apresentaram significância x1, x2 e x3, demonstrado conforme a equação 1.

$$k = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$$

(Equação 1)

Para a variável de resposta O.G., o modelo apresentou significância apenas para x_1 e x_3 nos termos de primeira ordem, no entanto, x_2 foi mantido porque um termo de interação dupla com significância depende deste termo. A função relacionada a variável resposta O.G., está representada na equação 2.

$$g = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4(x_1 x_2) + \beta_5 x_1^2 + \beta_6 x_3^2 + \varepsilon \quad (\text{Equação 2})$$

No modelo de regressão para mL, apenas x_2 e x_3 foram significativos nos termos de primeira ordem. Embora x_1 não tenha mostrado significância, foi preservado no modelo devido à sua dependência nos termos de interação dupla significativo e puramente quadrático. Ignorando os outros termos, efetuou-se uma regressão ajustada. A equação 3 apresenta a função associada à variável resposta mL.

$$m = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4(x_1 x_3) + \beta_5(x_2 x_3) + \beta_6 x_1^2 + \beta_7 x_2^2 + \beta_8 x_3^2 + \varepsilon \quad (\text{Equação 3})$$

Os valores calculados para a regressão para a variável de resposta kWh são apresentados nas tabelas 4, demonstram que os Valores p dos termos utilizados na regressão são significativos, portanto, é um preditor adequado.

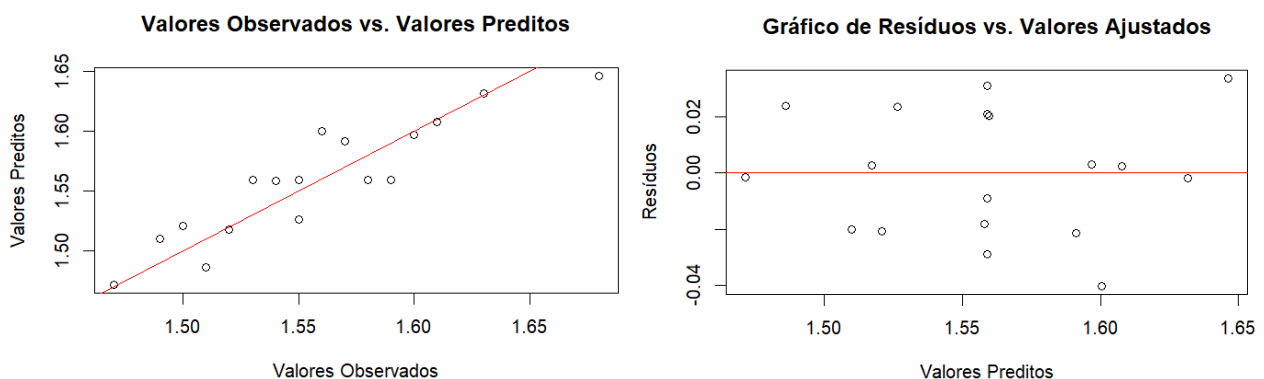
Tabela 4 – Regressão do modelo da variável de resposta kWh

Variável	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	Valor p
Intercepto	15,589	0,0057	271,4158	< 2,2e-16
Água (x1)	0,0247	0,0066	3,7453	0,002173
Rampa (x2)	0,0193	0,0066	2,9276	0,011024
Tempo (x3)	0,0433	0,0066	6,5720	1,245e-05
R ²		0,8245	R ² ajustado	
			0,7869	
Estatística F	21,93	Graus de Liberdade		3
				Valor p
				1,48e-05

Fonte: o autor, 2023

A estatística F do modelo calculada foi 21,93 com 3 graus de liberdade. O Valor p de 1,48e-05, indica que o modelo é estatisticamente significativo, com variabilidade de resposta R² do modelo de 0,8245 ou 82,45%. O R² ajustado de 0,7869 ou 78,69% da variação na variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes do modelo, como mostra a figura 1.

Figura 1 – Valores observados e valores preditos/Valores preditos e resíduos: kWh



Fonte: o autor, 2023

Os valores de regressão para resposta O.G. descritos na tabela 5, indicam significância da regressão nos valores p dos termos utilizados, o que o torna um preditor apropriado.

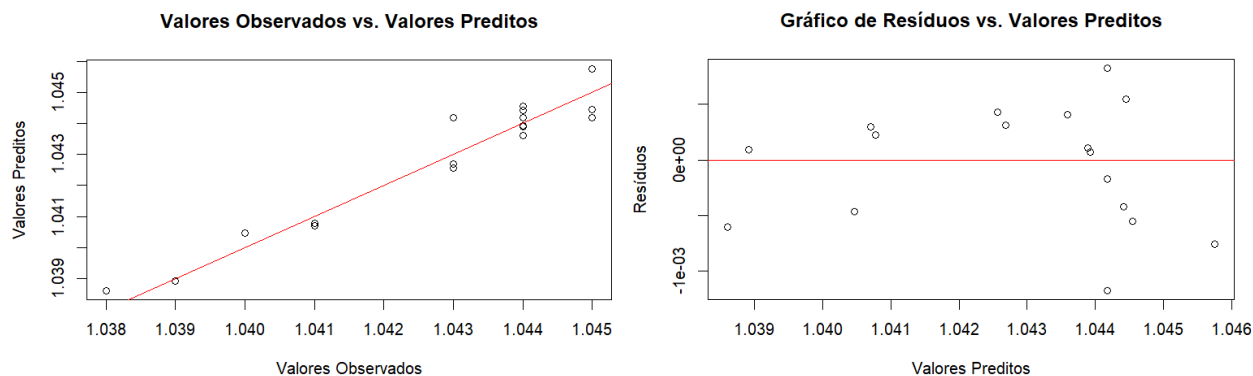
Tabela 5 – Regressão do modelo da variável de resposta O.G.

Variável	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	Valor p
Intercepto	1,04417446	0,00027575	3786,7135	< 2,2e-16
Água (x1)	0,00174070	0,00018793	9,2627	1,58e-06
Rampa (x2)	0,00014645	0,00018793	0,7793	0,4522566
Tempo (x3)	0,00093193	0,00018793	4,9590	0,0004295
Água (x1):Rampa (x2)	-0,00075000	0,00024554	-3,0545	0,0109586
Água ² (x1 ²)	-0,00093559	0,00019094	-4,9000	0,0004716
Tempo ² (x3 ²)	-0,00075881	0,00019094	-3,9741	0,0021806
R ²	0,9335	R ² ajustado	0,8972	
Estatística F	25,73	Graus de Liberdade	6	Valor p
				7,282e-06

Fonte: o autor, 2023

Os valores calculados para a estatística F do modelo foi de 25,73 e 6 graus de liberdade. O Valor p de 7,282e-06, mostra que o modelo é significativo, apresentando uma variabilidade de resposta R² de 0,9335 o que representa 93,35% e um R² ajustado de 0,8972, ou seja, 89,72% da variação no modelo para a variável de resposta é explicada pelas variáveis independentes, conforme pode ser visto na figura 2.

Figura 2 – Valores observados e valores preditos/Valores preditos e resíduos: O.G.



Fonte: o autor, 2023

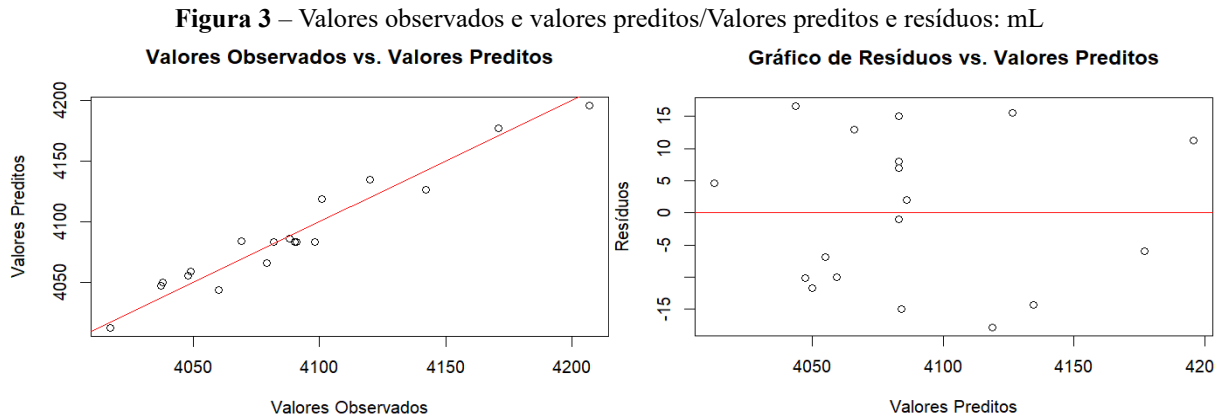
Na tabela 6, são apresentados os valores de regressão para a variável de resposta mL, demonstrando a significância dos valores p dos termos utilizados, o que confirma sua adequação como preditor.

Tabela 6 – Regressão do modelo da variável de resposta mL

Variável	Estimativa	Erro Padrão	Valor t	Valor p
Intercepto	4082,9964	5,8005	703,9079	< 2,2e-16
Água (x1)	-4,8293	3,9531	-1,2217	0,2473749
Rampa (x2)	-21,2812	3,9531	-5,3834	0,0002222
Tempo (x3)	-40,6187	3,9531	-10,2751	5,633e-07
Água (x1):Tempo (x3)	20,3750	5,1650	3,9448	0,0022930
Água ² (x1 ²)	-8,8787	4,0165	-2,2106	0,0491686
Tempo ² (x3 ²)	15,6932	4,0165	3,9072	0,0024461
R ²	0,941	R ² ajustado	0,9088	
Estatística F	29,25	Graus de Liberdade	6	Valor p
				3,818e-06

Fonte: o autor, 2023

O modelo apresentou uma estatística F de 29,255 com 6 graus de liberdade. Com um Valor p de 3,818e-06, mostrando-se significativo. Com variabilidade de resposta R^2 de 0,941, o que corresponde a 94,10%, e um R^2 ajustado de 0,9088, indicando que 90,88% da variação na variável resposta é atribuída às variáveis independentes, conforme ilustrado na figura 3.



Fonte: o autor, 2023

O teste de Shapiro Wilk (1965) foi aplicado às regressões para avaliar a normalidade na distribuição dos resíduos. Os valores obtidos e apresentados estão descritos na tabela 7, indicam que não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de que os resíduos seguem uma distribuição normal.

Tabela 7 – Teste de Shapiro Wilk

Regressão	Valor W	Valor P
kWh	0,94951	0,4174
O.G.	0,95903	0,583
mL	0,92103	0,1348

Fonte: o autor, 2023

Para verificar se os resíduos dos modelos de regressão têm variância constante, foi utilizado o teste de Breusch-Pagan (1979). Os valores p obtidos nos testes não foram significativos, sugerindo homoscedasticidade, e não há evidências estatisticamente significativas para rejeitar essa hipótese. Esses valores são demonstrados na tabela 8.

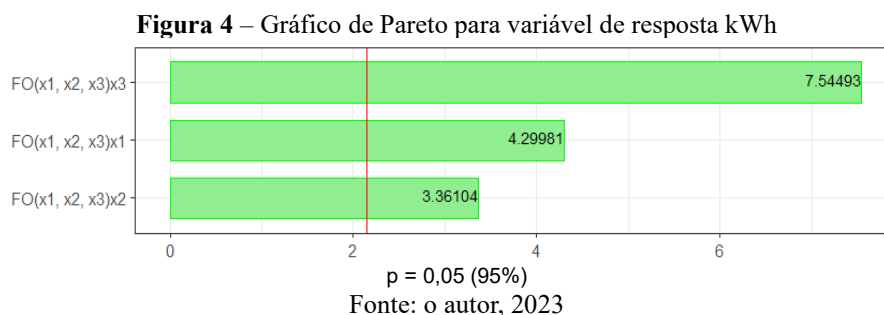
Tabela 8 – Teste de Breusch-Pagan

Regressão	Teste BP	Graus de Liberdade	Valor P
kWh	6,6683	3	0,08326
O.G.	3,4382	6	0,7522
mL	2,6339	6	0,8532

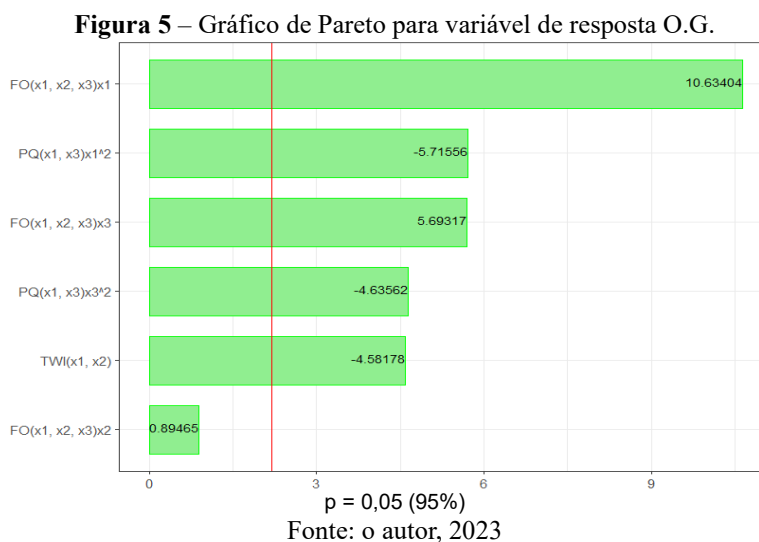
Fonte: o autor, 2023

A partir do gráfico de Pareto é possível aferir quais variáveis do modelo são estatisticamente significativas, com confiança superior a 95% e se os termos exercem influência positiva ou negativa.

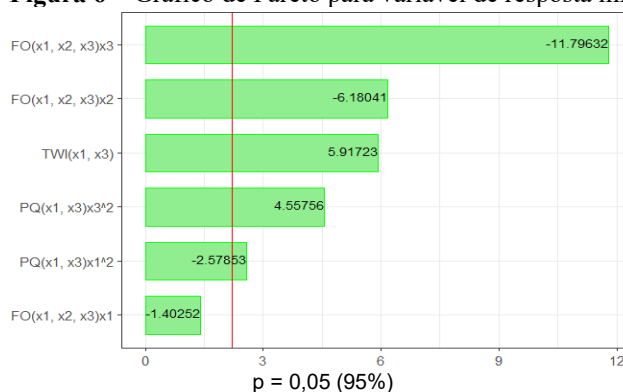
Conforme mostrado na figura 4, todos os termos do modelo de regressão relacionados à variável de resposta kWh são significativos, sugerindo um impacto positivo no consumo de energia durante a mosturação.



Para a resposta O.G., os termos do modelo apresentam significância estatística, com exceção do termo de primeira ordem x_2 , como pode ser visto na figura 5. Demonstrando influência positiva para os termos de primeira ordem, os termos de interação dupla e quadráticos apresentaram influência negativa.



No gráfico de Pareto exibido na figura 6, observa-se que, à exceção do termo de primeira ordem x_1 , todos os demais termos são significativos e exercem influência positiva ou negativa.

Figura 6 – Gráfico de Pareto para variável de resposta mL

A análise de variância (ANOVA), apresentada na tabela 9, mostra que os modelos são estatisticamente significativos e os fatores das regressões contribuem para a variabilidade das respostas kWh, O.G e mL.

Tabela 9 – ANOVA dos modelos de regressão

Modelo	Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor F	Valor p
kWh	Efeito Principal (x1, x2, x3)	3	0,03907	0,013021	219,296	1,48e-05
	Resíduos	14	0,00831	0,000594	-	-
	Falta de Ajuste	11	0,00604	0,000549	0,7238	0,7003
	Erro Puro	3	0,00228	0,000758	-	-
O.G.	Efeito Principal (x1, x2, x3)	3	5,3535e-05	1,7845e-05	36,9988	4,854e-06
	Interação dupla (x1, x2)	1	4,5000e-06	4,5000e-06	9,3301	0,0109586
	Puramente Quadráticos (x1, x3)	2	1,6438e-05	8,2189e-06	17,0406	0,0004272
	Resíduos	11	5,3050e-06	4,8230e-07	-	-
	Falta de Ajuste	8	2,5550e-06	3,1940e-07	0,3485	0,8963563
	Erro Puro	3	2,7500e-06	9,1670e-07	-	-
mL	Efeito Principal (x1, x2, x3)	3	29035,7	9678,6	45,3503	1,75e-06
	Interação dupla (x1, x2)	1	3321,1	3321,1	15,5616	0,002293
	Puramente Quadráticos (x1, x3)	2	5092,1	2546,0	11,9298	0,001757
	Resíduos	11	2347,6	213,4	-	-
	Falta de Ajuste	8	2218,8	277,4	6,4627	0,076287
	Erro Puro	3	128,8	42,9	-	-

Fonte: o autor, 2023

Os resultados para a falta de ajuste, com o Valores p superiores a 0,05, indicam a ausência de falta de ajuste nos modelos, e são adequados para descrever a relação entre os fatores e as variáveis de resposta.

A análise da superfície de resposta, conduzida com base nos dados experimentais, possibilitou determinar a direção de maior inclinação relacionada à variável de resposta kWh. Além disso, foram identificados os pontos estacionários para as respostas O.G. e mL. Na tabela 10, são apresentados esses dados em variáveis decodificadas.

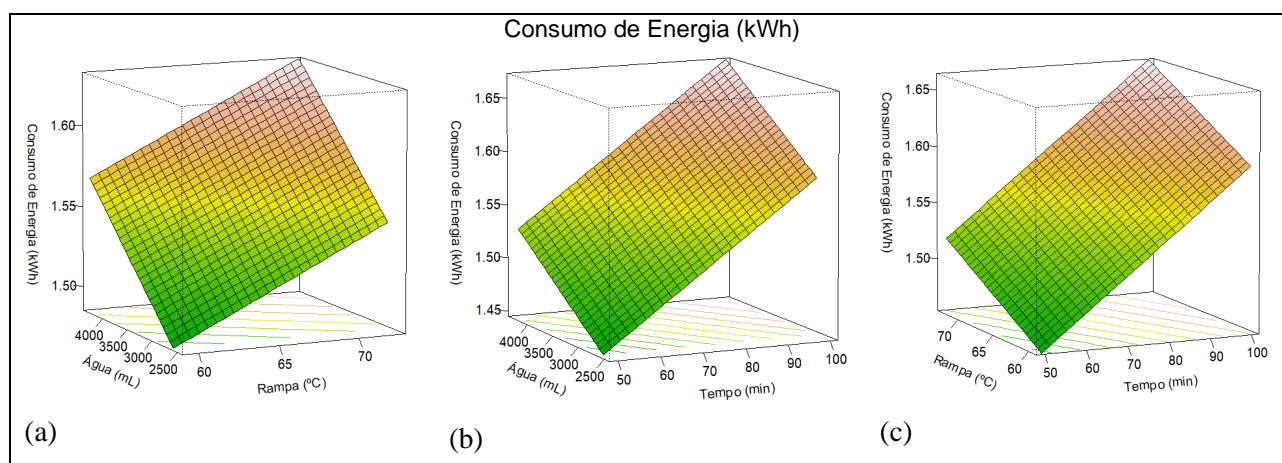
Tabela 10 – Pontos estacionários

Resposta	Água (mL)	Rampa (°C)	Tempo (min)
O.G.	3.597	73°C	84
mL	3.847	66°C	87

Fonte: o autor, 2023

No gráfico de superfície é possível identificar que os principais fatores de maior influência no consumo de energia são a relação água/grist de malte usada na mosturação e o tempo em que ela é realizada. Também, um aumento no consumo de energia à medida que esses fatores proporcionalmente são elevados.

Por outro lado, as interações entre o tempo e a temperatura da rampa, bem como a relação água/grist de malte com a temperatura, não são tão íngremes quanto a interação entre Água e Rampa. Essas relações apresentam impactos similares, como pode ser observado na figura 7a-c.

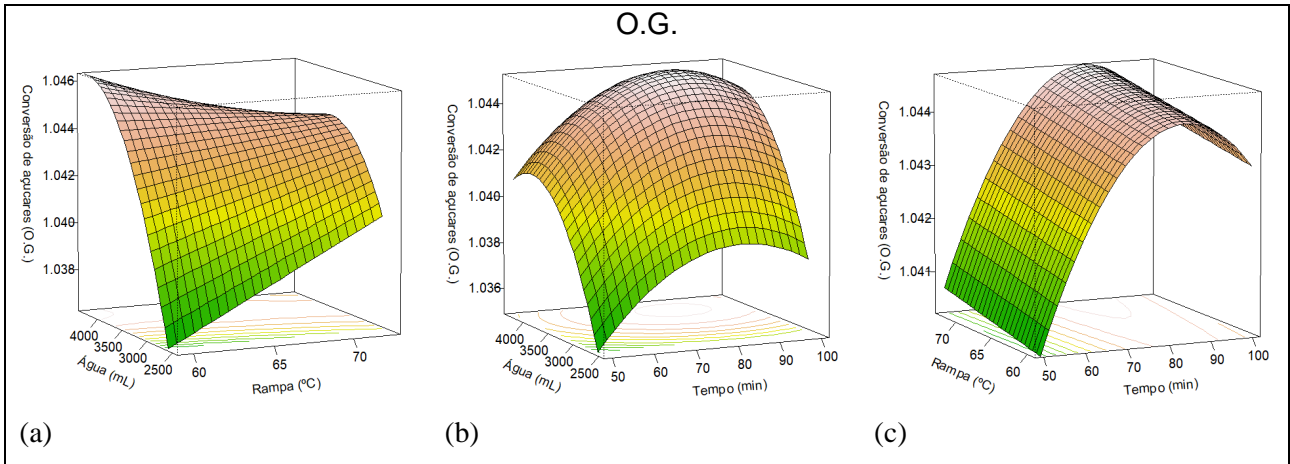
Figura 7 – Superfície de resposta: kWh

Fonte: o autor, 2023

Para a variável de resposta O.G., os resultados indicam que a gravidade original é amplificada ao se utilizar uma relação água/grist de malte de 4.000 mL durante mosturação por períodos mais extensos.

Ao considerar as variáveis independentes Água e Rampa, as relações água/grist de malte entre 3.500 mL e 3.600 mL se aproximam da área de maximização. A influência das variáveis Tempo e Rampa é evidente, mas sua relevância diminui após 84 minutos, conforme ilustrado na figura 8a-c.

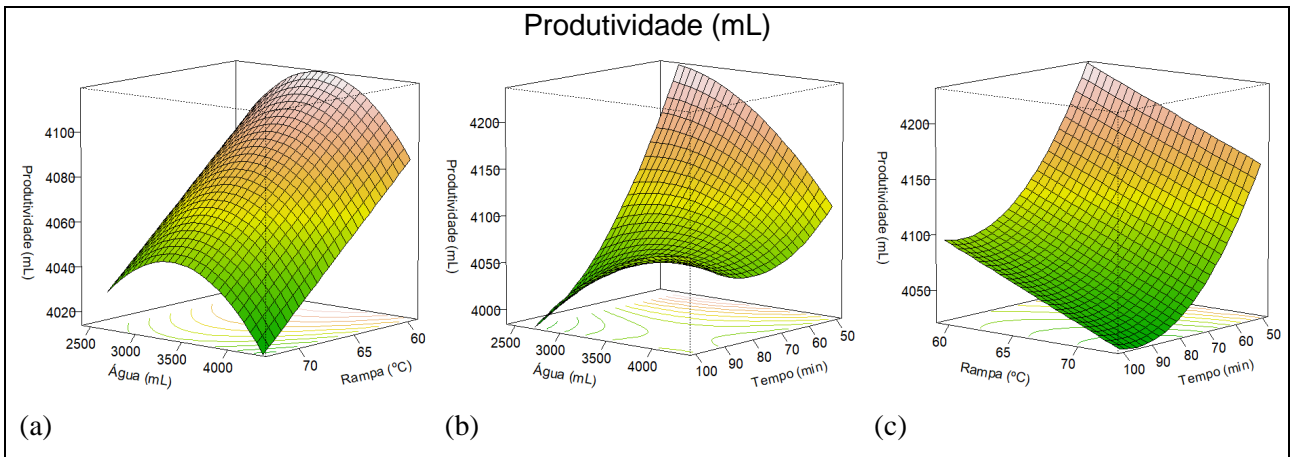
Figura 8 – Superfície de resposta: O.G.



Fonte: o autor, 2023

Para a produtividade, o gráfico de superfície apresenta um aumento de eficiência com mosturações em rampas de temperatura mais baixas, com relação água/grist de malte a 3.847 mL. Mosturas por períodos mais curtos e temperatura mais baixa também apresentaram produtividade mais elevada, como pode ser visto na figura 9a-c.

Figura 9 - Superfície de resposta: mL



Fonte: o autor, 2023

Com base nos dados experimentais e os seus respectivos modelos de regressão para as respostas kWh, O.G. e mL, foi calculada a média, mínimo e máximo para as respostas, como pode ser visto na tabela 11. A partir desses dados, foi criado um conjunto expandido de dados, contendo um total de 26.026 registros. Utilizando esses dados foi possível gerar previsões a partir dos modelos de regressão das respostas.

Tabela 11 – Valores de média, mínimo e máximo das variáveis de resposta

Resposta	Média	Mínimo	Máximo
kWh	1,56	1,47	1,68
O.G.	1,043	1,038	1,045
mL	4,088	4,017	4,207

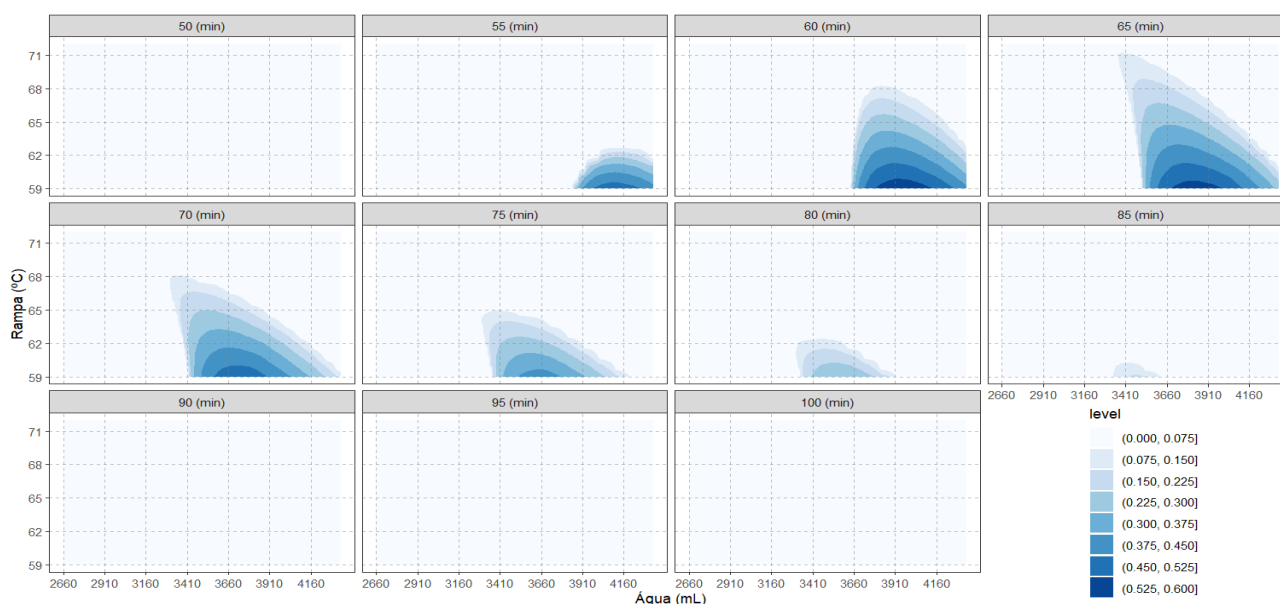
Fonte: o autor, 2023

Para otimizar respostas múltiplas foi utilizada a técnica de otimização simultânea de Derringer e Suich (1980). Utilizando as funções de desejabilidade (D) para as repostas kWh, O.G. e mL foi especificada uma função de desejabilidade individual. Seguindo essa abordagem, foram utilizados os seguintes critérios:

1. Consumo energético inferior à média de 1,56 kWh, D1.
2. Gravidade original superior à média de 1,043, D2.
3. Produtividade superior à média de 4.088 mL, D3.

De acordo com esses critérios, determinou-se o valor de D otimizado em equilíbrio entre os três critérios estabelecidos. Isso possibilitou estabelecer um novo ponto estacionário e a elaboração do gráfico de áreas de desejabilidade, ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Áreas de desejabilidade, Água por Rampa e Tempo



Fonte: o autor, 2023

Nos períodos de mosturação entre 80 e 100 minutos não foram observadas nenhuma região possível para otimização, por temperatura ou quantidade de água utilizada na mosturação, o mesmo pode ser dito do tempo de mosturação em 50 minutos. Entre 60 e 65 minutos foram determinadas as áreas de otimização mais adequadas para o equilíbrio entre produtividade, consumo de energia e conversão dos amidos em açúcares. Na tabela 12, são apresentados os valores otimizados considerando a variável D composta por D1, D2 e D3.

Tabela 12 – Previsão de otimização encontrada pelo modelo

Variáveis de Entrada			Variáveis de Saída		
Água (mL)	Rampa (°C)	Tempo (min)	O.G.	kWh	mL
3950	59	60	1,0442	1,504	4147

Fonte: o autor, 2023

No entanto, a rampa de temperatura da mosturação estaria além da faixa considerada mínima pela literatura para a atuação enzimática. Ajustado ao valor mais próximo, 60°C e preservando os demais valores foi produzida a tabela 9 de previsão dos dados.

Tabela 9 – Previsão de otimização ajustada as condições de mosturação

Variáveis de Entrada			Variáveis de Saída		
Água (mL)	Rampa (°C)	Tempo (min)	O.G.	kWh	mL
3950	60	60	1,0441	1,509	4141

Fonte: o autor, 2023

Utilizando os dados como parâmetros de produção descritos na tabela 13, foram realizados dois experimentos para validar os resultados inferidos pelo modelo de previsão. Os resultados desses experimentos estão descritos na tabela 14.

Tabela 14 – Experimentos de validação da otimização

Resposta	Otimização Teste 1	Precisão Teste 1	Otimização Teste 2	Precisão Teste 2	Média de Precisão
kWh	1,58	105,44%	1,56	103,45%	104,04%
O.G.	1,046	100,18%	1,045	100,09%	100,13%
mL	4105	99,06%	4121	99,44%	99,32%

Fonte: o autor, 2023

Ao analisar os resultados de média de precisão apresentados na tabela 14, é possível constatar que o consumo energético (kWh), gravidade original (O.G.) e a produtividade medida (mL), estão dentro de uma taxa de variação inferior a 5%.

4. CONCLUSÃO

Este estudo destaca a viabilidade de conciliar produtividade e sustentabilidade no setor cervejeiro, com ênfase em cervejarias artesanais. Utilizando a metodologia de superfície de resposta juntamente com as funções de desejabilidade, foi descoberto um ponto de otimização para objetivos de diferentes escalas, considerando múltiplas variáveis de resposta, sem comprometimento da eficiência energética.

Adicionalmente, a construção de um modelo preditivo revelou áreas de desejabilidade que podem favorecer a eficiência energética, preservando tanto o perfil de mosturação desejado quanto a obtenção de valores mais elevados para a gravidade original. A estratégia abordada destaca a relevância de um conhecimento mais profundo das relações entre matérias-primas e o processo produtivo, possibilitando práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

5. REFERÊNCIAS

ALBANESE, L. *et al.* Innovative beer-brewing of typical, old and healthy wheat varieties to boost their spreading. bioRxiv, p. 114157, maio 2017.

BAIANO, A. Craft beer: An overview. **Comprehensive Reviews In Food Science And Food Safety**, v. 20, n. 2, p. 1829–1856, mar. 2021.

BJCP. disponível em <https://www.bjcp.org/style/2015/4/4A/munich-helles/>, acesso em 22 de agosto de 2023.

BREUSCH, T. S.; PAGAN, A. R. A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. **Econometrica: Journal of the econometric society**, p. 1287–1294, 1979.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of quality technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

EVANS, D. E. *et al.* **Assessing the impact of the level of diastatic power enzymes and their thermostability on the hydrolysis of starch during wort production to predict malt fermentability**, Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2005.

LALLEMAND. **Technical Data Sheet Voss Kveik Ale Yeast**. Disponível em https://www.lallemandbrewing.com/wp-content/uploads/2019/12/TDS_LPS_BREWINGYEAST_VOSS_ENG_8.5x11.pdf, acesso em 25 de setembro de 2023.

MORADO, R. **Larousse da cerveja: A história e as curiosidades de uma das bebidas mais populares do mundo**. São Paulo: Alaúde Editorial, 2017.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments**. [s.l.] Wiley, 2009.

PALMER, J. J. **How to brew: everything you need to know to brew great beer every time**. Brewers Publications, 2014.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SILVA NETO, E. S. *et al.* **A produção de malte em pequena escala--uma alternativa aos cervejeiros artesanais**. XXV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos. FAURGS. Gramado-RS, 2016.

9. ANEXO 1 – REGISTRO DE SOFTWARE



INPI
Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512023002844-4**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 10/01/2023, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: LabBrew Assistant

Data de criação: 10/01/2023

Titular(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

Autor(es): ALCIONE BENACCHIO; LEONARDO DA SILVA ARRIECHE; JANINE PADILHA BOTTON

Linguagem: PYTHON; POSTGREE SQL; JSON

Campo de aplicação: AD-06; ED-04; EN-01; IF-07

Tipo de programa: AT-06; TC-01; TI-03

Algoritmo hash: SHA-512

Resumo digital hash:

591cdd7997890490b33e93e0cb1a97fb43c55a76f7bcefad0e4d86e573fd73c41e9de6789ab9bbef49594ceafeaee1b5bd07ad4fa3c2c5bf79cab0833aaacd3c

Expedido em: 26/09/2023

15 de Novembro
REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
de 1889

Aprovado por:
Carlos Alexandre Fernandes Silva
Chefe da DIPTO