

Área: Inovação | **Tema:** Empreendedorismo Inovador

AUTOMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL-DENSÍMETRO DIGITAL

AUTOMATION OF CRAFT BEER PRODUCTION-DIGITAL DENSIMETER

Charles Rech, Simone Ferigolo Venturini e Taís Oliveira Da Silva Alfonso

RESUMO

Sistemas produtivos automáticos geralmente são atrelados a grandes produções e a altos custos de implementação, o que dificulta o controle e monitoramento da qualidade de produtos artesanais em empresas de pequeno porte. Este trabalho apresenta um dispositivo de medição contínua da variação da densidade específica durante a fermentação de bebidas alcoólicas, viabilizando o monitoramento e controle do processo para pequena produção. O sistema de medição é composto por dois sensores de pressão instalados no recipiente de fermentação em níveis diferentes, um conversor analógico/digital, um comunicador com rede sem fio e um programa de processamento e análise dos dados. Os valores de pressão são adquiridos no conversor analógico/digital que por sua vez é responsável pelo processamento dos dados e envio para dispositivos móveis. Os resultados medidos de pressão são convertidos em valores de densidade e teor alcoólico durante todo o processo de fermentação a partir dos princípios básicos da mecânica dos fluidos. O dispositivo propicia aos produtores de bebidas alcoólicas artesanais o acompanhamento contínuo da variação da densidade, o que permite otimizar o período de fermentação. Assim, os benefícios atrelados ao uso da ferramenta incluem a diminuição dos custos de manutenção e operação, além de viabilizar o registro, histórico e controle remoto do processo de fermentação.

Palavras-Chave: Automação da produção, fermentação alcoólica, cerveja artesanal

ABSTRACT

Automatic production systems are often dependent on large productions and high implementation costs, which makes it difficult to control and monitor the quality of handicraft products in small businesses. This work presents a continuous measurement device for specific density variation during the fermentation of alcoholic beverages, enabling the monitoring and control of the process for small production. The measuring system consists of two pressure sensors installed in the fermentation tank at different levels, an analog / digital converter, a wireless communicator and a data processing and analysis program. Pressure values are acquired from the analog / digital converter which in turn is responsible for data processing and sending to mobile devices. The measured pressure results are converted to density and alcohol values throughout the fermentation process from the basic principles of fluid mechanics. The device provides producers of artisanal alcoholic beverages the continuous monitoring of the density variation, which allows to optimize the fermentation period. Thus, the benefits associated with the use of the tool include reduced maintenance and operating costs, as well as enabling the record, history and remote control of the fermentation process.

Keywords: Automation of production, Alcoholic fermentation, Craft beer

AUTOMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL-DENSÍMETRO DIGITAL

1 OBJETIVO

A fabricação de bebidas alcoólicas abrange uma série de etapas que necessitam de acompanhamento e controle para assegurar um produto com qualidade e isento de variações inaceitáveis. A fermentação é uma das etapas mais relevantes no processo de produção, pois é nesta fase que ocorre o metabolismo das leveduras, que produzem álcool, dióxido de carbono (CO₂) e outros subprodutos que agregam características desejáveis ao produto final (KUNZE, 2014). Os parâmetros mais importantes no decurso da fermentação são a temperatura, a densidade, o potencial hidrogeniônico (pH), o oxigênio e o CO₂ (WHITE; ZAINASHEFF, 2010). Além disso, a busca por soluções acessíveis que tornem os processos mais eficientes e garantam a qualidade sensorial do produto final é de grande interesse para os produtores artesanais e microcervejarias.

A metodologia *Design Science Research* busca reduzir o distanciamento entre a teoria e a prática, mantendo o rigor necessário para assegurar a credibilidade dos resultados da pesquisa (LACERDA et al., 2013). Assim, pode ser considerado um método de pesquisa para o progresso da ciência e da tecnologia. Tem como principal objetivo projetar e produzir sistemas que ainda não existem, construindo artefatos que servirão de solução para o referido problema.

Dessa forma, valendo-se de alguns aspectos da metodologia *Design Science Research* (LACERDA et al., 2013), este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de baixo custo que permite medir continuamente os valores de densidade e, por conseguinte, o teor alcoólico, registrando e fornecendo o histórico desses valores. A partir da instrumentação associada a um microcontrolador é possível monitorar, em tempo real e à distância, o processo de fermentação do produto. Dessa forma, é possível otimizar o tempo destinado à etapa de fermentação, diminuindo os custos de manutenção e operação e viabilizando o registro, histórico e controle remoto do processo de fermentação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O número de cervejarias com registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) cresceu 23% em 2018, totalizando 889 estabelecimentos, conforme dados do Anuário da Cerveja no Brasil (MAPA, 2019). O Rio Grande do Sul mantém-se na liderança, com 186 unidades e crescimento de 31% em relação a 2017, seguido de São Paulo, com 165 estabelecimentos, e Minas Gerais, com 115. Nesses estados, houve expansão superior a 30% em relação ao ano anterior. A Região Sul concentra o maior número de cervejarias: 369, seguida do Sudeste, com 328. O presidente da Associação Brasileira de Cerveja Artesanal (ABRACERVA), Carlo Lapolli, ressalta que há grande força do segmento de cervejarias artesanais, além de não ter relação com grupos internacionais, conscientizam o consumidor sobre a degustação da bebida e contribuem para a cultura gastronômica e desenvolvimento local (ABRACERVA, 2018). São criados, portanto, novos hábitos em que os apreciadores da bebida passam a beber em menor quantidade com maior qualidade.

Já o estudo do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) aponta que a maioria dos empresários envolvidos na produção de cerveja artesanal no estado do Paraná possui nível superior completo (62,05%), sendo que 31,25% possuem pós-graduação ou mestrado e 6,25% possuem ensino médio. A maioria (39,06%) dos empresários iniciou a atividade como *hobby* que evoluiu para um negócio, 9,37% viram no setor uma oportunidade e 35,95% queriam investir em um empreendimento (SEBRAE, 2019). Assim,

esses dados indicam um alto índice de escolaridade dos produtores de cerveja artesanal, corroborando para que o empreendimento adote técnicas de ferramentas de gestão e inovação dos processos. Dessa forma, é expressiva a quantidade de estudos e de pesquisas sobre a produção sustentável e eficiente da bebida que emergem para atender à demanda de consumidores que querem produzir em suas próprias residências, do crescente registro de microcervejarias e do aumento do mercado por cervejas diferenciadas (BBC, 2018). Por sua vez, a elaboração de patentes pode ser vista como exemplo de desenvolvimento tecnológico e inovação. Além de assegurar a propriedade do artefato aos inventores, movimenta equipes multidisciplinares para avaliação dos produtos criados (INPI, 2018).

Dentre as cervejarias, algumas seguem o cumprimento da Lei da Pureza da Cerveja Alemã de 1516, a *Reinheitsgebot*, que determina que a cerveja deveria ser fabricada apenas com água, malte de cevada e lúpulo (SEIDL, 2003). No entanto, outras cervejarias, buscando obter produtos diferenciados, criam receitas utilizando insumos locais, agregando identidade ao produto acabado e valorizando a região de origem (SEBRAE, 2018).

A legislação brasileira estabelece que cerveja é a bebida produzida utilizando malte de cevada, água potável, lúpulo (*Humulus lupulus*) e levedura (*Saccharomyces cerevisiae*). O mosto provém da infusão do malte em água e a levedura é responsável pela fermentação alcoólica. O lúpulo é fervido com o mosto proporcionando sabor e aroma à cerveja (BRASIL, 2009). A mesma legislação define mosto cervejeiro como sendo a solução de carboidratos, proteínas, glicídios e sais minerais, resultantes da decomposição realizada pelas enzimas oriundas do malte. Na Figura 1 são ilustrados os passos do processo baseado em informações da literatura (KUNZE, 2014).

Figura 1 - Processo de Fabricação da Cerveja Artesanal.



Fonte: Adaptado Kunze (2014).

A fabricação de cerveja é composta pelas seguintes etapas: a moagem do grão do malte, a mostura, a filtração, a lavagem, a fervura, o resfriamento, a fermentação, a maturação, o armazenamento, a pasteurização, no processo industrial e o envase (BRASIL, 2009).

A produção de cerveja segue o mesmo processo de fabricação, independente da escala de produção. Porém, as cervejas produzidas por microcervejarias e cervejarias artesanais diferem das produzidas por cervejarias de grande porte. Nas produções artesanais, se pretendem características peculiares de aroma e sabor, obtendo bebidas mais elaboradas destinadas a um público apreciador desses produtos. Já a indústria cervejeira produz para atender um público consumidor mais preocupado com o custo-benefício da bebida. Nas cervejarias de grande porte, o processo produtivo pode ser concluído em até dez dias, enquanto que na produção artesanal, o tempo de produção pode ultrapassar os vinte dias (BNDES, 2014). Essa diferença temporal entre a produção artesanal e cervejarias de grande

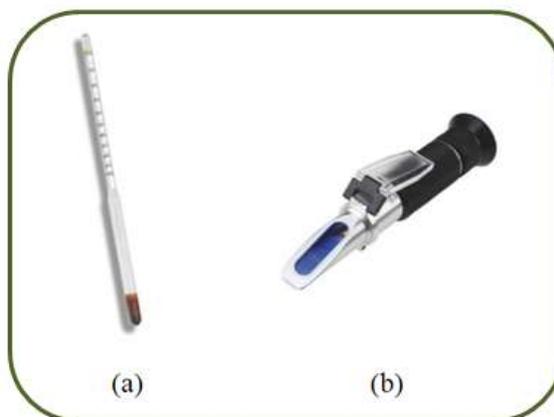
porte é em função de que nestas a receita é padronizada e ocorre adição de conservantes e estabilizantes responsáveis pela conservação da cerveja. Na produção artesanal, isso não ocorre e a conservação da cerveja é garantida pelos insumos utilizados e pelo cuidado no decorrer das etapas do processo.

A cerveja é classificada dentro de cada estilo de acordo com parâmetros estabelecidos por normas e na bibliografia referente ao assunto (KUNZE, 2014; PALMER, 2017). Os parâmetros são a taxa de atenuação, o amargor e a graduação alcoólica. Para a obtenção desses valores, é necessário conhecer o valor da densidade durante o processo de fermentação. A taxa de atenuação refere-se ao cálculo da conversão dos açúcares fermentáveis em álcool etílico e CO₂ e é determinada pela comparação das densidades original (inicial) e a densidade final da cerveja. O amargor da cerveja é definido pela medida padrão de BU (*Bitterness Units*), que é obtida pelo valor da densidade inicial, a quantidade em gramas de lúpulo e a concentração de iso- α -ácidos presente no lúpulo. A graduação alcoólica - ABV (*Alcohol by Volume*) é obtida pela medida da densidade inicial (*Original Gravity*), realizada após a fervura e antes da inoculação da levedura e da medida da densidade final (*Final Gravity*) realizada após o término da fermentação. A fabricação de outras bebidas alcoólicas tais como vinho e cachaça, seguem o mesmo processo, ou seja, passam pela fermentação que, da mesma forma, deve ser acompanhada e registrada (PEREIRA, 1998).

O densímetro convencional e o refratômetro são os instrumentos mais utilizados para verificação de densidade. O hidrômetro convencional é um instrumento que mede a densidade relativa de fluidos. É composto de um tubo de vidro oco fechado, onde a base contém chumbo granulado preso por uma resina e uma haste estreita com uma escala graduada em gramas por mililitros. O hidrômetro faz uso do Princípio de Arquimedes, ou seja, um sólido suspenso em um fluido é balizado por uma força igual ao peso do fluido deslocado pela parte submersa do sólido suspenso. O líquido a testar é vertido em um cilindro graduado, e o hidrômetro é suavemente introduzido no líquido até que flutue livremente. O ponto no qual a superfície do líquido toca a haste do hidrômetro correlaciona-se com a densidade relativa. Os hidrômetros são calibrados para uso a 20 °C (KUNZE, 2014) e, portanto, no caso de o fluido estar em outra temperatura, a correção do valor medido deve ser feita.

O refratômetro portátil determina o valor específico de um fluido com base na leitura do índice de refração do fluido, determinando a concentração de açúcar das soluções líquidas. O refratômetro consiste de uma placa com tampa, um conjunto de prisma, parafuso de calibração, ajuste de foco e ocular. A escala é graduada em Brix. A escala Brix corresponde a um grama de açúcar (sacarose) em 100 g de solução (água) de acordo com Viginoski (2013). Para medir a densidade relativa, algumas gotas da amostra líquida são colocadas no prisma, em seguida é fechado para garantir que a amostra se espalhe por toda a superfície do prisma, sem formar bolhas de ar ou pontos secos. Após 30 s, já estabilizado, a leitura é feita. O refratômetro é calibrado para uso a 20 °C e, portanto, no caso de o fluido estar em outra temperatura, a correção do valor medido deve ser feita. Além disso, o refratômetro apresenta uma distorção na leitura do mosto fermentado, ou seja, na presença de etanol e CO₂. Faz-se necessário, portanto, a correção dos valores obtidos a medida em que estes componentes são formados. A Figura 2 traz os instrumentos citados.

Figura 2 - Densímetro convencional (a) e refratômetro (b).



Fonte: autores.

O presente trabalho dedica-se a propor um método de medição em tempo real e contínuo da densidade durante a etapa de fermentação da cerveja artesanal. Isso se justifica em função da necessidade de acompanhar esse parâmetro e, por consequência, a evolução da fermentação. O tempo de fermentação deve ser controlado para que não ocorra o contato prolongado da levedura inativada, fato que pode gerar subprodutos indesejáveis ao final do processo (KUNZE, 2014). A taxa de atenuação e graduação alcoólica-ABV (*Alcohol by Volume*), descreve a conversão dos açúcares fermentáveis, pela ação das leveduras, em álcool etílico e CO₂ e é determinada pela comparação das densidades original (*Original Gravity*) e a densidade final (*Final Gravity*). A graduação alcoólica - ABV (*Alcohol by Volume*) é conhecida usando a medida da densidade inicial, realizada após a fervura e antes da inoculação da levedura e da medida da densidade final realizada após o término da fermentação (PALMER, 2017). Faz-se necessário, portanto, o monitoramento contínuo da densidade durante o processo de fermentação de bebidas alcoólicas, para poder obter informações sobre o progresso da fermentação e determinar quando o processo está completo. Para calcular o ABV, a Equação 1 é usualmente utilizada (Brewer's Friend, 2011).

$$ABV = (OG - FG)131.25 \quad (1)$$

em que OG representa a densidade inicial (densidade específica medida antes da fermentação) e FG representa a densidade final (densidade específica medida após o processo de fermentação estar completo).

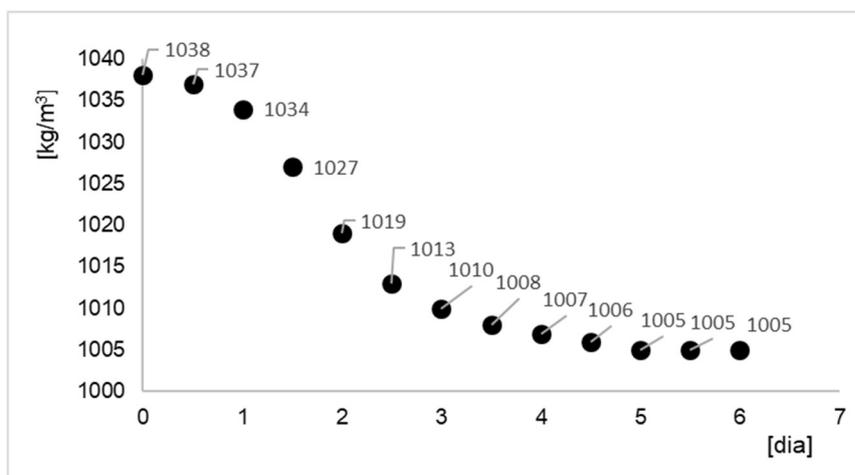
A Equação (2) estabelece a definição do Princípio de Pascal (ÇENGEL; CIMBALA, 2015), na qual estabelece a diferença de pressão estática entre dois pontos na direção vertical devido ao peso específico do fluido.

$$\Delta P = \rho gh \quad (2)$$

em que ΔP representa a pressão estática, ρ a densidade do fluido, g a aceleração gravitacional e h a distância vertical entre as duas tomadas de pressão.

Os sensores de pressão instalados nos fermentadores registram continuamente a pressão e estes valores são convertidos em densidade e teor alcoólico a partir das Equações (1) e (2). Os resultados esperados estão representados na Figura 3 (KUNZE, 2014).

Figura 3. Exemplo da variação da densidade durante a fermentação.



Fonte: Adaptado Kunze (2014).

Verifica-se, conforme Figura 3, que a densidade varia ao longo do tempo e tem maior taxa nos 4 primeiros dias. O tempo de fermentação e o comportamento da densidade podem variar dependendo do tipo de fermentação e de outros parâmetros relacionados ao estilo da cerveja que está sendo produzida, contudo seguem uma tendência conforme Figura 3.

A medição da densidade utiliza métodos convencionais, sendo o densímetro o instrumento mais utilizado para esta medição. Para realizar a medição é necessário coletar, diariamente, em torno de 250 ml de líquido do fermentador e assim obter a leitura de densidade. Ao final do período de fermentação perde-se uma quantidade considerável de produto. Para realizar a referida coleta abre-se a válvula de dreno dos fermentadores, e caso não ocorra a devida sanitização, pode acontecer contaminação e arruinar cerveja. A contaminação pode se dar por ação de bactérias ou fungos, muitas vezes gerando aromas e sabores indesejáveis no produto final. O consumo de energia do refrigerador também tem impacto na eficiência energética do processo, devido a abertura diária e prolongada para realizar as medições. A coleta de dados em tempo contínuo torna a metodologia mais eficaz e com menor custo energético visto que informa em tempo real o andamento do processo, podendo ser concluído no momento em que a fermentação já está completa. Para tal, o equipamento é também conectado à internet, para armazenamento de dados nas nuvens e tomada de decisão a distância.

A tecnologia proposta pretende contribuir científica e tecnologicamente para o controle efetivo do processo de fermentação, visto não se ter um produto com essas características no mercado de produção de bebidas alcoólicas tais como cervejas, vinhos e cachaças. Pela medição contínua da densidade é possível otimizar o período de fermentação e obter parâmetros confiáveis para os cálculos necessários de teor alcoólico e minimizar o consumo energético do processo.

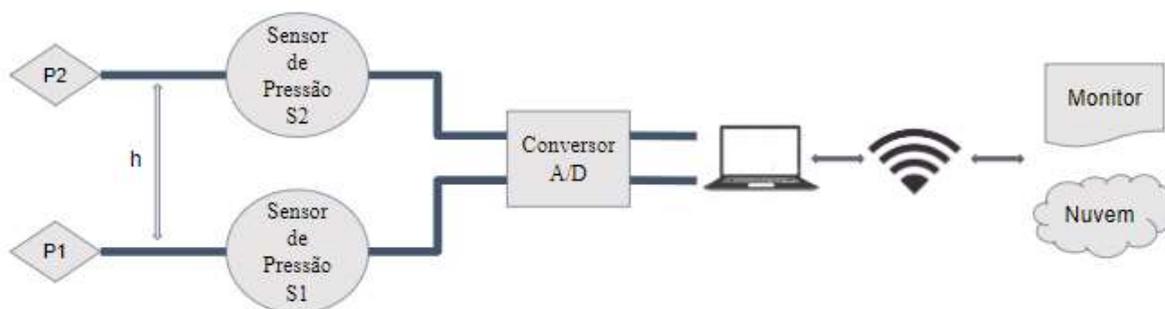
3 METODOLOGIA

A solução proposta neste artigo enquadra-se como um artefato conforme a definição da metodologia de pesquisa Design Science Research (LACERDA et al., 2013). Um artefato pode ser definido como um objeto, físico ou abstrato, destinado a resolver um problema prático. As etapas para construção do artefato, conforme Manson (2006) são: Proposta,

Tentativa, Artefato, Medidas de Desempenho e Resultados. As etapas Proposta e Tentativa incluem as atividades de conscientização do problema e sugestão de artefatos para sua solução. Nesse caso, o problema a ser resolvido é a falta de controle na produção artesanal de bebidas alcoólicas, para o qual se propôs o artefato do densímetro.

A etapa Artefato refere-se ao desenvolvimento do densímetro propriamente dito. O densímetro digital é composto por dois sensores de pressão, um conversor analógico/digital, um comunicador com rede sem fio e um programa de processamento e análise dos dados. Os valores de pressão são adquiridos no conversor analógico/digital que por sua vez é responsável pelo processamento dos dados a partir do programa desenvolvido, que utiliza princípios básicos da mecânica dos fluidos para estabelecer a relação entre pressão hidrostática, densidade e teor alcoólico. As informações resultantes do processamento são disponibilizadas localmente no dispositivo e na internet por meio do comunicador com rede sem fio, que permite, além do monitoramento, tomadas de decisões, tais como atuar no controle do processo de fermentação. Na Figura 4 é ilustrado o funcionamento do densímetro digital, em que P_1 e P_2 são as tomadas de medida de pressão e h é a distância vertical entre os sensores.

Figura 4. Desenho esquemático do funcionamento do densímetro digital.



Fonte: autores.

No quadro 1 estão descritos as características dos componentes utilizados no densímetro digital.

Quadro 1 – Componentes do densímetro digital.

Descrição	Modelo
Sensor de pressão (S1/S2)	JF 302 - 0-10 kPa
Conversor A/D	ADS 1115
Módulo Wi-Fi	ESP 32

Fonte: autores.

Após, na etapa de Medidas de Desempenho, o instrumento foi validado. Para isso, oito valores medidos no densímetro digital foram utilizados de referência. Estas amostras foram preparadas utilizando misturas de etanol e água e estão apresentadas na Tabela (1). O valor de cada amostra foi obtido a partir da divisão da massa, medida em uma balança de resolução de 0,1 g, pelo volume medido em uma bureta de resolução de 0,1 mm. Posteriormente estas amostras foram inseridas, uma por vez, no densímetro digital e adquirido os valores medidos. Na Tabela (1) são apresentados os valores de referência e os valores medidos no densímetro

digital. Ambos os resultados foram obtidos a partir média aritmética de cinco valores do mesmo mensurando.

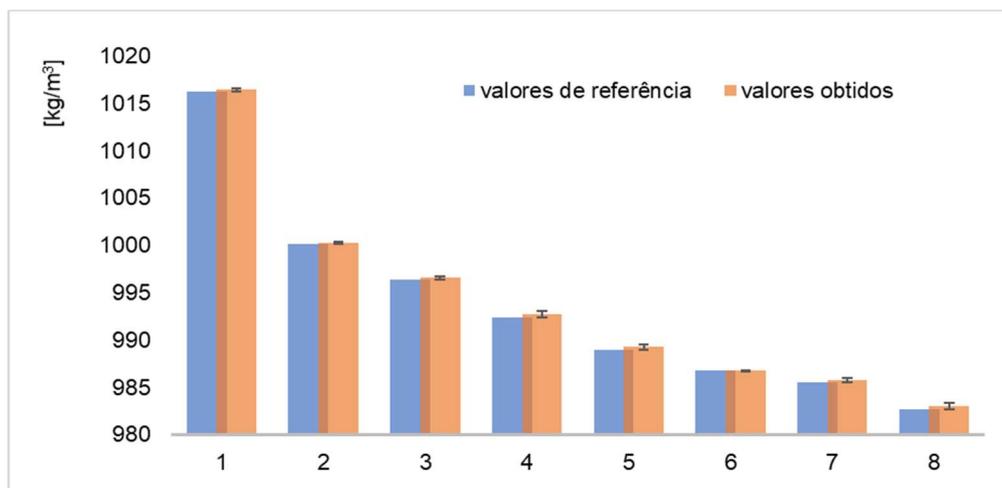
Tabela 1. Comparação entre os valores de referência e os valores obtidos no densímetro digital.

Amostra	Valores de referência	Valores obtidos	% variação relativa
1	1016.15	1016.36	-0.020
2	1000.06	1000.21	-0.014
3	996.35	996.52	-0.018
4	992.38	992.68	-0.029
5	988.96	989.23	-0.028
6	986.78	986.73	0.005
7	985.46	985.50	-0.024
8	982.63	982.56	-0.034

Fonte: autores.

Na Figura 5 é apresentado a comparação entre os valores de referência e os valores obtidos no densímetro digital.

Figura 5. Comparação entre os valores de referência e os valores obtidos no densímetro digital.



Fonte: autores.

Após a validação do dispositivo proposto, foi realizada a medida da variação de densidade durante a fermentação de uma cerveja *lager* do estilo *Dopplebock*, por um período de 12 dias, o que corresponde a etapa de Resultados. Esta etapa é descrita na seção a seguir.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos utilizando o densímetro digital foram comparados com os resultados de dois instrumentos comumente usados pelos cervejeiros, um hidrômetro convencional e um refratômetro (KUNZE, 2014; VIGINOSKI, 2013). A Tabela 2 traz os instrumentos utilizados nas medições.

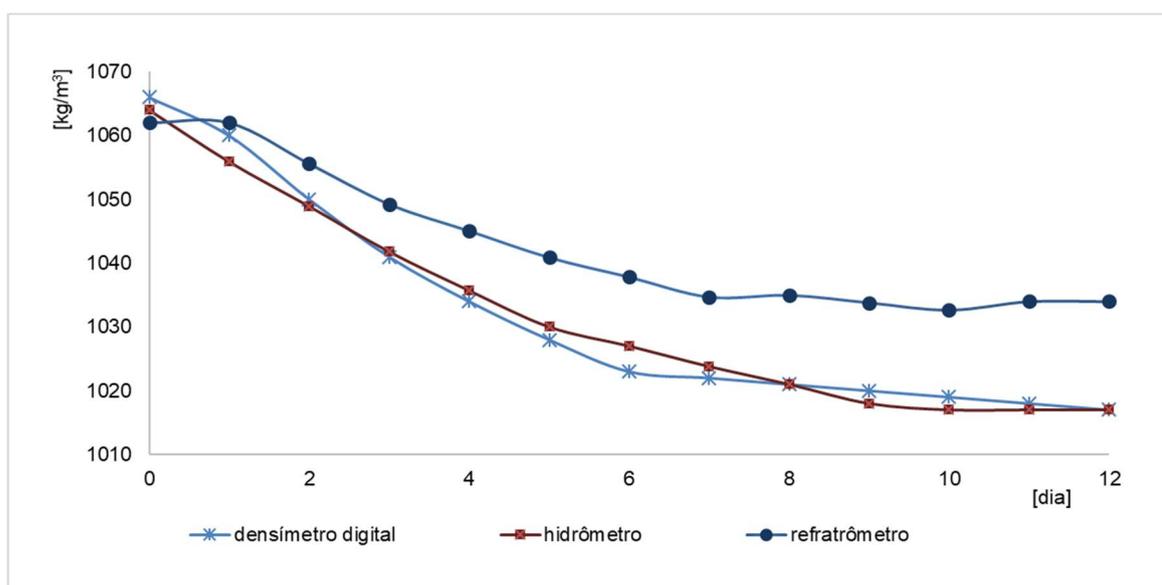
Tabela 2. Lista de instrumentos de medição.

Descrição	Modelo	Faixa de operação	Incerteza
Hidrômetro	Incoterm	1.000 - 1.100 g/ml	± 1 g/ml
Refratômetro	ATC	0 - 32 % Brix	± 0.2 Brix
Termômetro	Salvi	0 - 120°C	$\pm 0.5^\circ\text{C}$

Fonte: autores.

Durante a fermentação da cerveja em análise, o mosto foi mantido na faixa de 8 a 12 °C por um período de 12 dias. As medidas de temperatura e densidade foram realizadas diariamente e registradas em uma planilha. Na Figura 6 é mostrado os resultados de três métodos aplicados para medir a densidade do mosto. É possível observar que a tendência do hidrômetro digital proposto é próxima à apresentada no hidrômetro convencional, o que é suficiente para validar a metodologia utilizada. Contudo, o refratômetro apresentou maior dispersão, pois apresenta uma deficiência na medida da densidade do mosto na presença de álcool e CO₂, segundo Kunze (2014).

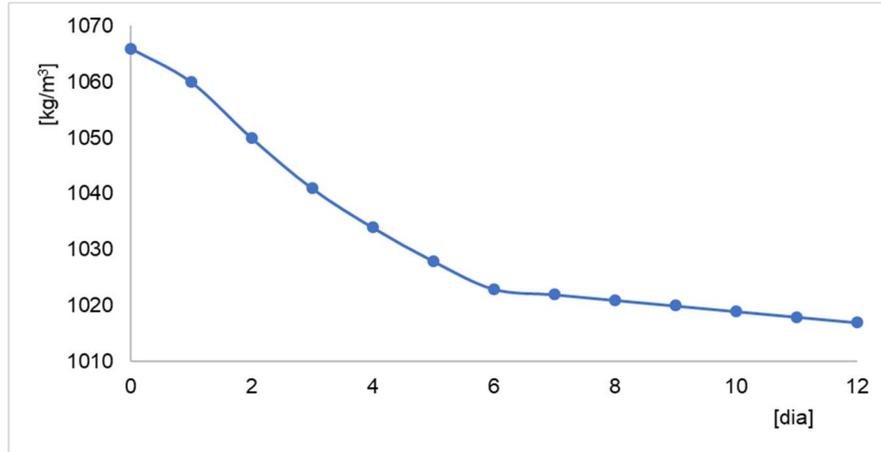
Figura 6. Resultados das medições de densidade obtidos com os três métodos.



Fonte: autores.

Na Figura 7 é apresentado o comportamento da variação da densidade em um período de 12 dias. Verifica-se que a tendência média apresenta boa aproximação com a curva proposta por Kunze (2014) e tem concordância com a curva média com o hidrômetro convencional apresentado na Figura 3.

Figura 7. Variação da densidade medida com o densímetro digital.



Fonte: autores.

A medição de pressão é quase-estática visto que a variação ao longo do tempo é pequena e os dados são coletados em períodos de tempo predeterminados. A determinação da densidade apresentada na Eq. (2) depende da aceleração gravitacional local, da distância vertical entre os dois sensores de pressão e da diferença de pressão medida entre os dois sensores. Cada valor medido tem sua incerteza e para estimar a incerteza geral, assume-se que cada incerteza é pequena o suficiente de acordo com a expansão de Taylor de primeira ordem. Sob esta aproximação, a incerteza total é uma função linear das variáveis independentes e esta abordagem foi estabelecida por S. J. Kline e F. A. McClintock em 1953 (BECKWITH et al., 1993).

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} u_n\right)^2} \quad (3)$$

em que u_y é a incerteza em y , y é o resultado calculado, x é a variável independente medida e u é a incerteza de cada valor medido.

Aplicando a Equação (3) na Equação (2), tem-se:

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial p} \Delta p\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial g} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial h} \Delta h\right)^2} \quad (4)$$

e,

$$\Delta\rho = \sqrt{\left(\frac{1}{gh} \Delta p\right)^2 + \left(-\frac{p}{g^2 h} \Delta g\right)^2 + \left(-\frac{p}{gh^2} \Delta h\right)^2} \quad (5)$$

A medição de pressão foi realizada usando um sensor que opera dentro da faixa de 0 – 10 kPa em um conversor A/D de 14 bits, ou seja, resolução de 1/16348 divisões e faixa de medição de 0 a 5V, resultando em uma resolução da medição de pressão 0,61 Pa. Considerando $h = 1 \text{ m} \pm 1 \text{ mm}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2 \pm 0,01 \text{ m/s}^2$ e $p = 10000 \text{ Pa} \pm 0,61 \text{ Pa}$, a incerteza total da densidade, conforme Eq. (5) é 0,15% fs.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, um dispositivo é proposto para medir a densidade do mosto de maneira contínua e em tempo real. A avaliação do dispositivo foi realizada medindo-se a densidade do mosto durante todo o processo de fermentação de uma cerveja artesanal estilo *Doppelbock*. A variação da densidade foi monitorada por 12 dias e foi identificado uma variação de 0,048 na densidade relativa, o que resulta em 6,3% da ABV e é consistente com o estilo de cerveja utilizada. Os resultados obtidos utilizando o hidrômetro digital proposto foram comparados com outros instrumentos comumente utilizados pelas cervejarias para medir a densidade do mosto durante o processo de fermentação. O dispositivo proposto apresentou bom desempenho, obtendo resultados próximos aos medidos com o hidrômetro convencional, com desvio máximo de 0,37% durante o processo. Os resultados mostram que a implementação da solução proposta por cervejarias artesanais e comerciais é viável, uma vez que permite o monitoramento contínuo da fermentação, a otimização do tempo de processo e o histórico dos dados medidos. Além disso, possibilita a diminuição dos custos de produção devido a redução do tempo de fermentação e consequente disponibilização antecipada dos recursos (fermentadores/refrigerador) utilizados nesta etapa. Outro benefício é a total eliminação de riscos por contaminação devido ao manuseio dos fermentadores durante o procedimento de medição da densidade.

6 LIMITAÇÕES

O densímetro digital proposto é dependente de energia elétrica e internet disponíveis para funcionamento em tempo real. Faz-se necessário, portanto, inserir um armazenamento local em cartão SD para o caso de indisponibilidade de rede *Wi-Fi* e uma bateria recarregável para o caso de falta temporária de energia elétrica. Estes dispositivos são facilmente implementáveis e garante o funcionamento contínuo do densímetro digital.

7 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDO

Avaliar o comportamento da variação da densidade em função da temperatura, ou seja, implementar em *hardware* a medição contínua da temperatura e fazer a correção da densidade em função desta, via *software* em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACERVA. Associação Brasileira de Cerveja Artesanal. Brasília, 16 fev. 2018. Número de cervejarias artesanais no Brasil cresce 37,7% em 2017. Disponível em: <<http://abracerva.com.br/numero-de-cervejarias-artesanais-no-brasil-cresce-377-em-2017/>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

BBC Brasil. São Paulo, 9 mar. 2018. Do bar para o laboratório, como a cerveja passou a ser estudada em universidades no Brasil. Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/brasil-43324823>>. Acesso em: 07 ago. 2018.

BECKWITH, T.G.; MARANGONI, R.D.; LEINHARD, J.H. **Mechanical Measurements**. Reading: Addison-Wesley, 5. ed. 1993.

BNDES. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social. Rio de Janeiro, set. 2014. O setor de bebidas no Brasil. Disponível em:

<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3462/1/BS%2040%20O%20setor%20de%20bebidas%20no%20Brasil_P.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2019.

BRASIL. Decreto nº 6871, de 04 de junho de 2009. Regulamenta a Lei no 8.918, de 14 de julho de 1994, que dispõe sobre a padronização, a classificação, o registro, a inspeção, a produção e a fiscalização de bebidas. Brasília. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/decreto/d6871.htm>. Acesso em: 05 ago. 2019.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH. 3. ed. 2015.

Brewer's Friend. 16 jun. 2011. Alcohol By Volume Calculator Updated. Disponível em: <https://www.brewersfriend.com/2011/06/16/alcohol-by-volume-calculator-updated/>. Acesso em: 05 ago. 2019.

KUNZE, W., **Technology of Malting and Brewing**. Berlim, Alemanha, 2014. 9. ed. 726 p.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial (Brasília, BR). Charles Rech, Paulo Smith Schneider, Simone Ferigolo Venturini. Dispositivo de medição da densidade para acompanhamento do processo de fermentação de bebidas alcoólicas. BR 10 2018 069756 0, 27 set. 2018.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: Método de Pesquisa para a Engenharia de Produção. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

MANSON, N. J. Is operations research really research? **Orion**, v. 22, n. 2, p. 155-180, 2006. <http://dx.doi.org/10.5784/22-2-40>.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, 28 jan. 2019. A cada dois dias uma nova cervejaria abre as portas no Brasil. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/noticias/a-cada-dois-dias-uma-nova-cervejaria-abre-as-portas-no-brasil>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

PALMER, J.J., **How to Brew: Everything you need to know to brew great beer every time**. Brewers Publications, 4. ed. 2017. 582 p.

PEREIRA, A. J.M. Medição em tempo real da densidade em fermentações alcoólicas com sensores inteligentes da densidade. 1998. Dissertação (Mestrado)-Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Porto, 1998.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Paraná, 06 mai. 2019. Estudo mapeia o cenário das cervejarias artesanais do Paraná. Disponível em: <<http://www.agenciasebrae.com.br/sites/asn/uf/NA/estudo-mapeia-o-cenario-das-cervejarias-artesanais-do-parana,c8be90451c38a610VgnVCM1000004c00210aRCRD>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Microcervejarias. Disponível em: <[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/\\$File/7503.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8818d2954be64fcda8628defef1f70f8/$File/7503.pdf)>. Acesso em: 05 ago. 2019.

SEIDL, Conrad. **O catecismo da cerveja**. São Paulo: Senac, 2003. 385 p.

VIGINOSKI, C. L. F. Sistema utilizando vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade de um líquido. 2013. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Setor de Sistema Eletrônico, Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Curitiba, 2013.

WHITE, C., ZAINASHEFF, J. **Yeast**: the practical guide to beer fermentation. Colorado: Brewers Publications, 2010.