



## DESENVOLVIMENTO DE UM DENSÍMETRO ELETRÔNICO PARA PRODUÇÃO DE CERVEJA

Guilherme Brasil Pintarelli<sup>1</sup>, Hugo Marcondes<sup>2</sup>

**Resumo:** A fermentação é uma etapa da produção da cerveja que define parte de suas características, por exemplo seu sabor. Os cervejeiros artesanais monitoram o processo de fermentação com método do densímetro de vidro. Esse método apresenta algumas limitações (*e.g.*, depende de operador e desperdiça produto). Nesse trabalho realizou-se desenvolvimento de um densímetro eletrônico para aprimorar o monitoramento da fermentação. Foram utilizados métodos de desenvolvimento de produto (*i.e.*, planejamento do produto, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado) e estudo de viabilidade com protótipo. Foram abordados aspectos de legislação, simulações computacionais e boas práticas em desenvolvimento de *hardware*. O trabalho resultou em projeto de densímetro eletrônico susceptível à produção industrial que pode facilitar a monitoração da fermentação. O equipamento cumpre com aspectos de segurança em alimentos e pode permanecer inserido no fermentador durante todo processo de fermentação. O equipamento é de instalação imediata e usa infraestrutura de Wi-Fi do cliente. O equipamento é automático, com bateria interna, sem fios e disponibiliza dados em servidor *online*.

**Palavras-chave:** Medição de propriedades físicas. Produção de cerveja. Sensor sem fio.

**Abstract:** Fermentation is a step in the production of beer that defines part of its characteristics, for example, its flavour. The brewers observe the fermentation process using the glass hydrometer method. This method has some limitations (*e.g.*, operator-dependent and product waste). In this work, an electronic hydrometer was developed to improve fermentation monitoring. Product development methods (*i.e.*, planning and task clarification, conceptual design, embodiment design and detail design) and prototype feasibility study were used. The legislation, computational simulations and good practices in hardware development were discussed. The work resulted in an electronic hydrometer design susceptible to industrial production that may facilitate the monitoring of fermentation. The equipment complies with safety aspects in food and can remain inserted in the fermenter throughout the fermentation process. The equipment can be immediately installed and uses the client's Wi-Fi infrastructure. The equipment is automatic, has internal battery, has no cables and provides data in an online server.

**Keywords:** Measurement of physical properties. Beer production. Wireless sensor.

<sup>1</sup> Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, IFSC/Florianópolis <guilherme.b.pintarelli@gmail.com>.

<sup>2</sup> Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), IFSC/Florianópolis <hugo.marcondes@ifsc.edu.br>.

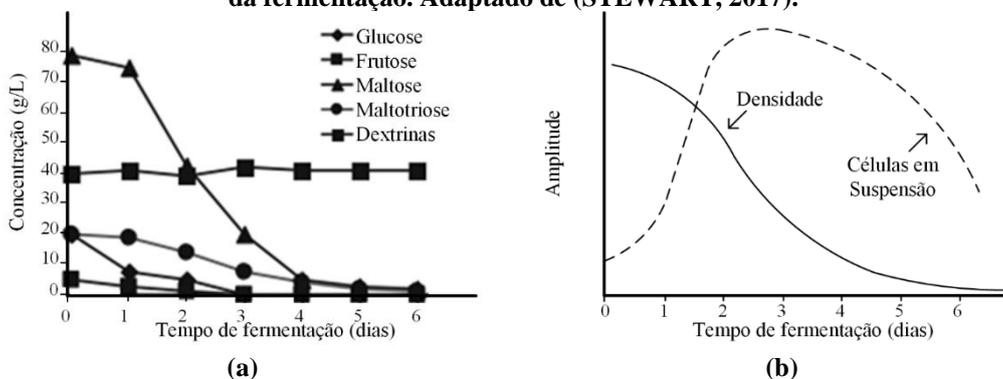
### 1 INTRODUÇÃO

A cerveja é produzida a partir dos seguintes ingredientes mínimos, que são a água, malte (geralmente produzido a partir de geminação interrompida da cevada, aveia ou trigo), lúpulo e leveduras (também chamado de fermento biológico). As leveduras processam açúcares do malte (*e.g.*, glucose, frutose e maltose) e geram subprodutos, esse processo é chamado de fermentação. Os subprodutos gerados na fermentação são álcool, dióxido de carbono e outros compostos que compõem as características organolépticas. Essas características geralmente são definidas por álcoois superiores, ésteres tipo “frutados”, dicetonas vicinais e compostos de enxofre (que provocam sabores ruins) (VERBELEN *et al.*, 2009). A fermentação depende de uma série de fatores, são exemplos a genética, tipo e crescimento da levedura, qualidade de materiais, contaminações, agitação, composição e condições físico-químicas do mosto. Esses fatores podem provocar alterações

morfológicas ou metabólicas nas leveduras que resultarão em sua morte ou sua incapacidade de se dividir e realizar a fermentação de maneira adequada. Qualquer que seja o fenômeno, pode provocar alterações no sabor da cerveja (GIBSON *et al.*, 2007; STEWART, 2017).

Uma das maneiras de se estudar o processo de fermentação é a leitura da quantidade de açúcares ao longo do tempo, conforme indicado na Figura 1(a). Esse método é direto e fornece detalhes do consumo de espectro de açúcares. Porém, esse método requer equipamentos sofisticados e pode não ser de realização imediata. Existem maneiras imediatas para aferir a fermentação, essas são baseadas em medidas indiretas por medição de alteração de massa ou densidade (ELMEHDI; PAGE; SCANLON, 2007), alterações de CO<sub>2</sub> e outros compostos voláteis (DAOUD; SEARLE, 1990), por refração da luz (ŠAVEL *et al.*, 2009) e por sensores de compostos avançados (*electronic nose and tongue*) (BURATTI; BENEDETTI, 2016). A medição de densidade por densímetro é uma maneira usual, manual e econômica da percepção da fermentação. Os açúcares (que são compostos com peso molecular elevado) são consumidos pelas leveduras e em parte são reduzidos a CO<sub>2</sub>. Portanto, a densidade da solução diminui conforme a fermentação ocorrer, esse fenômeno é demonstrado na Figura 1(b). Ressalva-se que o processo da fermentação usualmente é de dinâmica lenta (ordem de horas) e ocorre em período de até 15 dias (STEWART, 2017; WHITE; ZAINASHEFF, 2010).

**Figura 1 – Gráficos (a) do consumo de açúcares do mosto devido fermentação de cultura de leveduras e (b) da relação entre número de leveduras e densidade com o dia da fermentação. Adaptado de (STEWART, 2017).**



Sistemas de monitoramento de processos modernos, como o da fermentação, podem utilizar a tecnologia da Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*). Este é um paradigma de trânsito de informações de diferentes tipos de “coisas” através de redes sem fio. Na indústria alimentícia, o IoT pode ajudar a reduzir desperdícios, custos e riscos, em todas as etapas de produção (WANG; YUE, 2017) e da cadeia alimentar (PANG *et al.*, 2015). Além disso, pode auxiliar no desenvolvimento sustentável e em desafios associados a fome, abastecimento de água e segurança alimentar (BNDES, 2017). O IoT pode ser encarado como parte da próxima revolução industrial, também chamada de indústria 4.0, promovida também pela Internet e impressão 3D (XU; DAVID; KIM, 2018). Alguns autores referem ao IoT voltado a indústria como *Industrial Internet of Things* (IIoT) (MUMTAZ *et al.*, 2017). Em IoT, geralmente usa-se sensores sem fios eletrônicos (GUBBI *et al.*, 2013; IEEE, 2015; WHITMORE; AGARWAL; DA XU, 2015). O aumento no número de dispositivos conectados à Internet é tendência para os próximos anos. Imerso nesse cenário, estima-se que o IoT movimente, em escala global, entre 3,9 e 11,1 trilhões de dólares em 2025. Cerca de 30% desse valor poderá estar concentrado no setor industrial em operação e otimização, e 4% em aplicações residenciais. Estima-se que 40% do montante seja movimentado por economias emergentes (MCKINSEY & COMPANY, 2015). No Brasil estima-se impacto de 50 a 200 bilhões de dólares em 2025 (BNDES, 2017).

O IoT e outras tecnologias utilizadas em indústria cervejeira podem ser utilizadas em menor escala pelos cervejeiros artesanais e microcervejarias, para produção de produtos padronizados e consistentes (BETTS, 2016). Parte das microcervejarias foram iniciadas com produção caseira, e não há indícios na literatura de recuo desse tipo de mercado nos próximos anos. Por exemplo, o número de cervejarias artesanais catarinenses triplicou entre 2013 e 2016 (NSC, 2017). No cenário nacional, ocorreu crescimento de 37,7% no número de cervejarias registradas no Brasil em 2017 (ABRACERVA, 2018). Por causa disso, pode existir demanda por tecnologias voltadas aos cervejeiros artesanais.

Os produtores de cerveja artesanais e em microcervejarias geralmente monitoram o processo de fermentação com método do densímetro de vidro. Este método é semelhante ao descrito na ISO 649:1981 (partes 1 e 2) (ISO, 1981) e ABNT NBR 5992:2016 (ABNT, 2016), e é representado na Figura 2. Durante o procedimento de medição de densidade, o usuário deve retirar porção da amostra do fermentador, inserir amostra em proveta de vidro, imergir termômetro e densímetro na amostra e manualmente aplicar cálculo de

fator de correção em função da temperatura. Por causa disso, considera-se que o método usual de medição de densidade é laborioso, limitado temporalmente e desperdiça quantidade do produto (de acordo com o tamanho da proveta, geralmente 250 ml, o que é significativo em pequenas produções de 5 litros).

**Figura 2 – Representação do uso do densímetro em cerveja. Conteúdo dentro de uma proveta de 100 ml.**



Objetiva-se nesse trabalho desenvolvimento de dispositivo eletrônico para facilitar o método de medição de densidade, ou seja, tornar a medição de densidade menos laboriosa, não limitada temporalmente (medições em intervalos de tempos regulares) e sem desperdiçar produto. Idealiza-se dispositivo de baixo custo, que não seja invasivo ao fermentador (não necessite modificações), aproveite a infraestrutura que o usuário possui e possa ser futuramente integrado em sistemas IoT. O dispositivo é destinado a cervejeiros caseiros e microcervejarias.

Nas próximas seções serão detalhados os passos para desenvolvimento do densímetro eletrônico, que são, a metodologia utilizada, investigação e resultados das etapas de desenvolvimento do produto, discussão dos resultados e conclusão do trabalho.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos de desenvolvimento de produto consistem em, pelo menos, quatro etapas primárias: planejamento do produto (ou projeto informacional), projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado (*planning and task clarification, conceptual design, embodiment design e detail design*) (CARPES JR, 2014; PAHL *et al.*, 2007). Nesse trabalho adotou-se esse tipo de divisão. Após as etapas primárias, foi realizado a validação da ideia com um protótipo (ou produto mínimo viável).

Durante o planejamento do produto foi realizado a definição do problema, formulação de proposta de produto, análise de tecnologias correlatas e definição de requisitos e restrições do projeto. A definição do problema e proposta de produto foram executados em função de problemática proveniente de cervejeiros artesanais e discussão e seleção de ideias por métodos de *brainstorm* (executado pelos autores desse trabalho). Observa-se que a ideia de um produto pode surgir a partir de discussões informais (PAHL *et al.*, 2007), que é o caso da ideia do produto desse trabalho. Foi realizado busca por patentes (também conhecido como busca de anterioridade) na plataforma nacional do Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) e na plataforma internacional *Derwent Innovations Index*<sup>®</sup> (Clarivate Analytics, Estados Unidos) com termos em português (busca por qualquer um dos termos “densímetro”, “fermentação cerveja” ou “sensor densidade”) e inglês (busca por operação “*tilt\* AND hydrometer*”) respectivamente. A busca por anterioridade foi realizada dia 15 de abril de 2019. A definição de requisitos e restrições do projeto foi elaborada pelos autores desse trabalho e pelos consumidores, por métodos de *brainstorm*.

A partir de requisitos definidos durante planejamento do produto estudou-se os princípios da solução no projeto conceitual. Essa etapa é feita por abstração e estudo dos problemas essenciais e estabelecendo estruturas funcionais. Nessa etapa foi realizado o diagrama de síntese de funções para definir a função principal do produto e demais funções necessárias para isso (hierarquicamente inferiores). O diagrama de síntese de funções é estratificado até atingir o nível mais baixo possível de funcionalidade. Para cada parte do diagrama uma implementação de função foi definida. As decisões de implementação não refletem nas funções produto. Para cada decisão de implementação foi realizado um estudo de busca por soluções e escolha de um tipo de solução. Durante o estudo de material de invólucro foi pesquisado legislação vigente no Brasil e sua capacidade de fluuabilidade. A capacidade de fluuabilidade foi testada com uso de *software* de simulação SolidWorks 2017 (Dassault Systèmes Corp., França). Se a massa do dispositivo for superior a massa de água deslocada, o dispositivo irá afundar.

No projeto preliminar foi realizado a construção de uma estrutura funcional do produto. Foram abordados aspectos de arquitetura de *hardware* e interface de usuário compatíveis com especificações obtidas nas etapas anteriores.

Durante o projeto detalhado foram realizados diagramas da tecnologia e lista de partes que permitam sua produção. As decisões em *hardware* cumprem com requisitos do produto baseado em informações retiradas das folhas de dados das fabricantes. As escolhas em *hardware* priorizaram soluções comerciais de custos baixos e de rápido desenvolvimento.

A partir do projeto detalhado foram desenvolvidos dois protótipos, um foi calibrado e ambos foram ensaiados. No processo de calibração foi obtido modelo de regressão polinomial que permite representar os valores lidos pelo dispositivo em densidade. Foi utilizado densímetro de vidro comercial modelo Montanha N° 3.701-17 como padrão ouro (ou referência). A calibração foi realizada entre os valores de 1,0 e 1,1 g/ml, com passo de 0,005 g/ml, a  $20 \pm 1$  °C (conforme indicado pelo manual do densímetro de vidro) e repetida três vezes ( $N = 3$ ). Os limites da calibração são mesmos encontrados em densímetros de vidro comerciais. O ajuste de modelo foi realizado com *software* MATLAB R2015a (MathWorks, Estados Unidos). O modelo foi considerado adequado quando o coeficiente de determinação (ou  $R^2$  ajustado) foi superior a 0,99 (ou 99%). O coeficiente de determinação é uma medida estatística que indica se modelo consegue explicar os valores observados. Um modelo ideal possui o  $R^2$  igual a 1 (ou 100%) (OSTERTAGOVÁ, 2012).

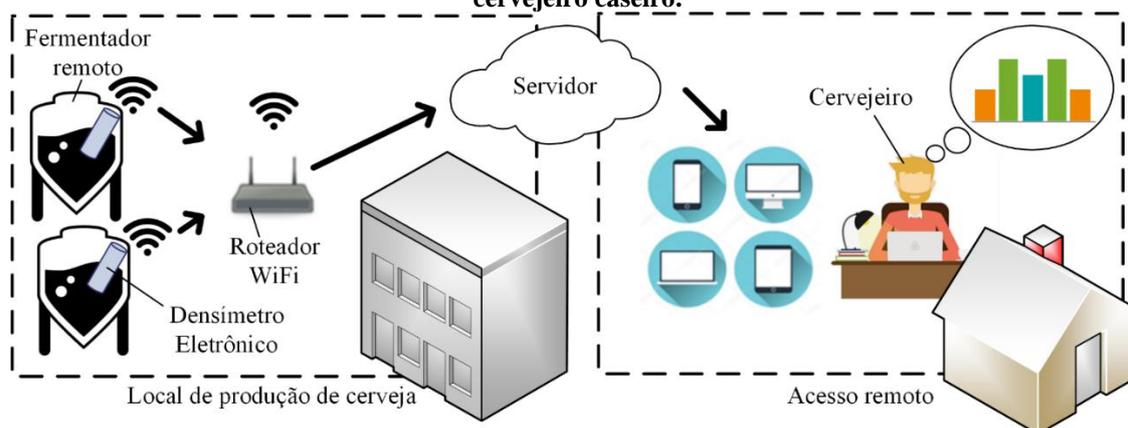
### 3 DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO

#### 3.1 Planejamento do Produto

O método tradicional de medição de densidade para produção de cerveja (por densímetro de vidro) demanda esforços de um operador, não proporciona facilidade na obtenção de dados ao longo do tempo e desperdiça produto durante cada aferição de densidade. Com o densímetro eletrônico, objetiva-se uma leitura superior (facilitada) de densidade. Para isso, ele deverá apresentar recursos de monitoração automática sem extração de materiais do processo de fermentação, deverá demandar mínimos esforços do usuário e ser compatível de maneira minimamente invasiva com diferentes fermentadores.

A proposta do produto densímetro eletrônico consiste em dispositivo que ficará inserido no fermentador e mergulhado no mosto com leveduras inoculadas durante todo processo de fermentação. Durante esse momento o dispositivo transmite valores de densidade (g/ml) e temperatura (°C) para um servidor conectado à Internet. Estas informações deverão ser acessíveis ao usuário em qualquer momento por meio de uso de celular ou computador. Um exemplo de caso de uso é mostrado na Figura 3.

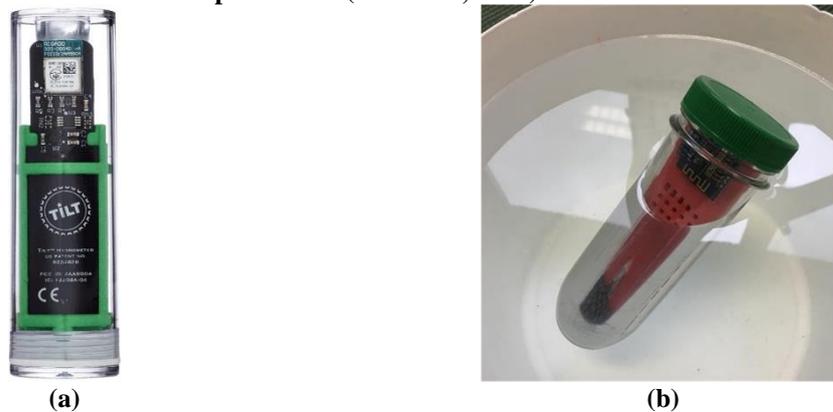
Figura 3 – Exemplo de funcionamento do densímetro eletrônico. Caso de uso por cervejeiro caseiro.



### 3.1.1 Tecnologias Correlatas

A busca de anterioridade não detectou patentes relacionadas com o produto desse trabalho no Brasil. Em nível internacional, foram encontradas patentes depositadas (e concedida B2) nos Estados Unidos pela empresa “Baron Brew Equipment, LLC” (Santa Rosa, CA, Estados Unidos) (números US2014260607-A1 e US9234828-B2). A patente US9234828B2, que foi publicada em 2016, descreve o mecanismo para calcular a densidade em função da inclinação de um aparato para fermentados. Esse método é relacionado com o dispositivo proposto nesse trabalho. Apesar disso, a empresa não realizou depósito no Brasil ou via Tratado de Cooperação de Patentes (PCT). Por causa disso, no Brasil não se aplica o direito de exclusividade (que seria garantido pela patente) e produto semelhante pode ser comercializado no Brasil. Adverte-se que uma vez que ao método de medição está registrado na US9234828-B2, este não pode ser patenteado. Essa patente não pode mais ser depositada no Brasil, uma vez o prazo do pedido de solicitação foi expirado (pedido de prioridade). O dispositivo vendido pela Baron Brew Equipment, LLC é o TILT™, conforme Figura 4(a). O preço do dispositivo é de US\$ 135,00 (ou R\$ 546,76, considerando preço do dólar em R\$ 4,05 e desconsiderando frete e impostos – cotação de abril de 2019).

**Figura 4 – (a) Dispositivo comercial TILT™. Imagem e catálogo disponível em (BARON BREW EQUIPMENT, 2019). (b) Dispositivo do projeto iSpindel. Imagem disponível em (GITHUB, 2019).**



Em busca na Internet foi encontrado projeto *open source* semelhante nomeado iSpindel, apresentando na Figura 4(b). Este utiliza o método descrito na US9234828B2 (de aferir densidade em função da inclinação).

A tecnologia concorrente, que é utilizada pela maioria dos produtores de cerveja é o densímetro de vidro, que foi abordado na introdução. O intervalo de amplitude de medição normalmente encontrada em um densímetro de vidro comercial é de 1,0 até 1,1 g/ml (WHITE; ZAINASHEFF, 2010). Esta faixa foi utilizada como referência dos limites de medição do produto proposto.

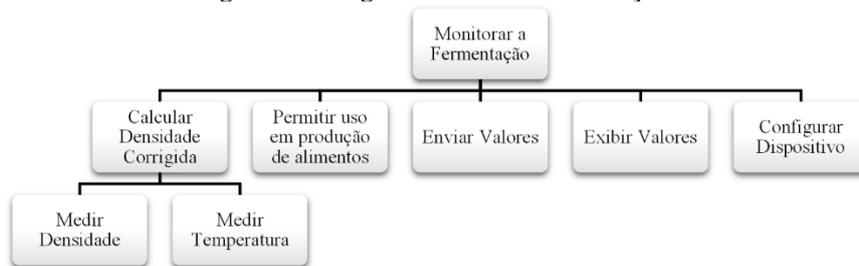
### 3.1.2 Requisitos e Restrições do Projeto

Foram listados os seguintes requisitos funcionais do produto:

- leitura da densidade de líquidos (cerveja) não invasiva ao fermentador (entre 1,0 e 1,1 g/ml);
- encapsulamento compatível ao padrão da indústria alimentícia, conforme normas e legislações vigentes no Brasil;
- enviar dados usando infraestrutura de Wi-Fi a cada 60 minutos;
- exibir dados em uma plataforma *online*;
- autonomia da bateria (recarregável) suficiente para análise de toda etapa de fermentação (15 dias).

### 3.2 Projeto Conceitual

O diagrama da síntese de funções do densímetro eletrônico é conforme a Figura 5. Este define a principal função do produto, que é “monitorar a fermentação”. São necessários cinco sub funções para implementar a função principal, que são “calcular densidade corrigida”, “permitir uso em produção de alimentos”, “enviar valores”, “exibir valores” e “configurar o dispositivo”. A sub função “calcular densidade corrigida” necessita de outras duas sub funções, uma vez que a densidade é em função também da temperatura (OECD, 2012).

**Figura 5 – Diagrama da síntese de funções.**

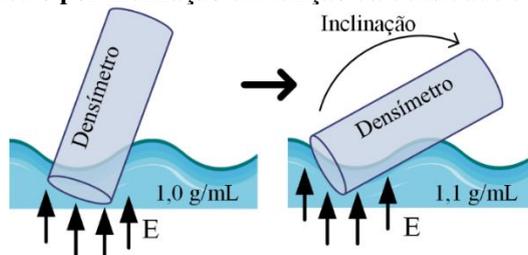
### 3.2.1 Cálculo da Densidade em Líquidos

O estudo da fermentação em ambientes cervejeiros geralmente é realizado a partir da alteração da densidade, conforme exposto na introdução. A densidade (g/ml) é a relação entre a massa e o volume de um material, a uma dada pressão e temperatura. Ressalva-se que existem diversos métodos para medição de densidade de materiais em líquidos (*e.g.*, densímetro de flutuação, balança hidrostática, método do corpo imerso, picnômetro, e densímetro oscilante). A medição de densidade por métodos de flutuação é adequada para líquidos com viscosidade até 5 Pa/s, como no caso da cerveja, que possui viscosidade na ordem de mPa/s (OECD, 2012).

Um equipamento densímetro deve flutuar de maneira conhecida em função da densidade. Ele flutua quando apenas as forças peso ( $P$ ) e empuxo ( $E$ ) atuam de maneira que o peso e empuxo se igualem. Nesse momento a massa do densímetro é igual à massa do fluido que ele desloca. A alteração da densidade da solução irá alterar a quantidade de massa do fluido deslocado, e, conseqüentemente sua flutuabilidade (OLIVEIRA; MELO FILHO; AFONSO, 2013).

A alteração da flutuação pode ser na vertical (como no densímetro de vidro) ou por inclinação (método do TILT™ e iSpindel). Foi escolhida a leitura da densidade em função da inclinação devido facilidade nesse tipo da leitura com uso de sensor acelerômetro. A inclinação ocorre devido ao centro de massa ser deslocado do centro de flutuação. O modo de flutuação (inclinação) de regime permanente é quando esses dois pontos estão em mesmo eixo vertical. O centro de massa pode ser ajustado com posicionamento de maior parte da massa no fundo do dispositivo, após isso ele será intrínseco e imutável. O centro de flutuação é de acordo com formato do dispositivo e densidade da solução. Pode comparar-se esse fenômeno como se um fluido de densidade superior ejetasse o densímetro para fora, semelhante ao representado pela Figura 6. Essa abordagem não necessita modificações no fermentador. Não foram encontrados justificativas para uso de outro tipo de método de leitura.

**Figura 6 – Representação da condição de flutuabilidade (alteração da inclinação) de densímetro por inclinação em função da densidade do fluido.**

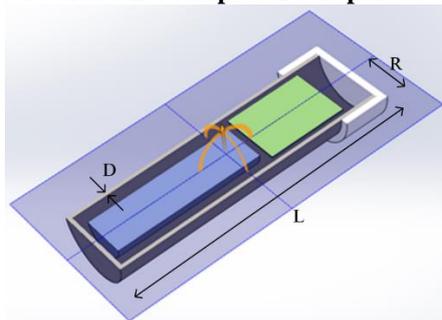


### 3.2.2 Invólucro Compatível com Alimentos

Compete ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) fiscalizar instalações de indústrias alimentícias. Os equipamentos nesses ambientes devem seguir a instrução normativa MAPA IN N° 5/2000, ou seja, esta é aplicável ao cervejeiro que deseje comercializar sua cerveja. A MAPA IN N° 5/2000 solicita que os equipamentos envolvidos na produção não deverão constituir um risco para a saúde e que esses devem ser constituídos de “materiais que não transmitam substâncias tóxicas, odores nem sabores, e sejam impermeabilizados, bem como resistentes à corrosão e a repetidas operações de limpeza e desinfecção, e as superfícies deverão ser lisas e isentas de imperfeições” (MAPA, 2000). Mais informações sobre a construção de equipamentos para indústria alimentícia disponível em (SCHMIDT; ERICKSON, 2017). Para cumprir com requisito de encapsulamento compatível ao padrão da indústria alimentícia, recomenda-se utilizar material inerte, não tóxico e com acabamento sanitário. Esses materiais são especificados por resolução N° 91/2001 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (ANVISA, 2001). Foram considerados aço inoxidável polido (*e.g.*, AISI 304) e plásticos *food grade* (*e.g.*, PET, HDPE, PEAD e PP).

O dimensionamento do invólucro foi baseado em resultados de simulações conforme o modelo da Figura 7 e parâmetros de materiais da Tabela 1. O aço inoxidável possui massa específica cerca de oito vezes superior aos materiais plásticos. Invólucros comerciais em aço inoxidável afundam nas dimensões estudadas ( $L \leq 200$  mm,  $R \leq 21,08$  mm e  $D \leq 1,65$  mm) e seriam necessários dispositivos com volume maior para flutuação. Nas dimensões estudadas, o material do invólucro deve ser de baixa densidade para flutuação, como materiais plásticos, e apresentar tamanhos próximos a  $L = 120$  mm,  $R = 16,7$  mm e  $D = 1,65$  mm para melhores resultados. Estas dimensões apresentam maior diferença entre os centros de flutuabilidade quanto mergulhados em fluidos de densidades de 1,0 e 1,1 g/ml, por causa disso, irão apresentar maiores diferenças na flutuabilidade (inclinação). O cálculo da inclinação exata do dispositivo é complexo e não foi realizado nesse trabalho (MARTINS, 2010).

**Figura 7 – Modelo do densímetro no SolidWorks. Onde L é o comprimento do tubo, R é o raio do tubo e D é a espessura da parede do tubo.**



**Tabela 1 – Lista de materiais.**

Parte	Material	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Fonte
Invólucro tipo 1	Aço Inox AISI 304	8.000	SolidWorks
Invólucro tipo 2	Plástico genérico	1000 (típico)	SolidWorks
Tampa	Plástico genérico	1000 (típico)	SolidWorks
Bateria	Diversos	2.600	Datasheet <sup>1</sup>
PCB	Diversos	2.400	Datasheet <sup>2</sup>

Observa-se que os metais de diferentes naturezas podem reagir entre si (*e.g.*, corrosão galvânica), não foram realizados estudos quanto a isto nesse trabalho. Os materiais usados nas tecnologias correlatas são plásticos. Não há informação disponível do plástico usado no TILT<sup>TM</sup>. O plástico usado no iSpindel é o polietileno tereftalato (PET).

### 3.2.3 Envio de Dados

O densímetro eletrônico deve possuir capacidade de transmissão sem fio (não confinada) para não ser invasivo ao fermentador. A capacidade de transmissão deve ser no mínimo unidirecional, uma vez que não há nenhum atuador no dispositivo (somente sensoriamento). O *payload* será mínimo e na ordem de dezenas de bytes a serem enviados a cada uma hora, ou seja, *data rate* pode ser na ordem de kbps. O *payload* será somente os valores de densidade, temperatura, número da amostra e valor de carga da bateria.

As tecnologias Bluetooth, LoRa, ZigBee e NFC foram desconsideradas devido necessitarem de *gateway* compatível externo ao fermentador. As tecnologias LoRaWAN (protocolo de comunicação que usa o *layer* físico LoRa), Sigfox e telefonia celular (*e.g.*, 2G, 3G e 4G) não necessitam de *gateway* pois usam infraestruturas comerciais. LoRaWAN e Sigfox ainda não estão disponíveis em algumas cidades, e por isso foram descartadas (infraestruturas para essas tecnologias geralmente só são disponíveis em centros urbanos ou instaladas em função de aplicações pontuais, o mapa de cobertura é disponível em (SIGFOX, 2019; THE THINKS NETWORK, 2019)). Apesar disso, é de conhecimento que esses serviços são voltados à IoT (baixo consumo, baixo *data rate*, boa performance *indoor* e *outdoor*, baixo custo e procedimento de cobrança adequado ao IoT) e estão sendo expandidos. LoRaWAN e Sigfox poderão ser opção em projetos futuros (assim como LTE CAT-M1 e NB-IoT, que estão sendo implementadas no Brasil). A tecnologia celular possui consumo de potência que muitas vezes não é compatível com IoT e não apresenta cobertura adequada quando

<sup>1</sup> Equivalente Samsung INR18650-25R de massa de 45g.

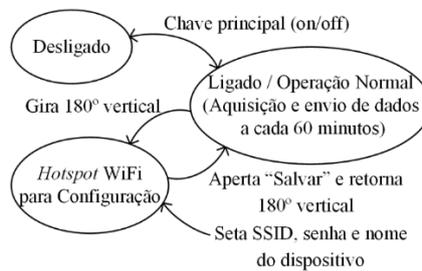
<sup>2</sup> Equivalente de material FR-4 é 1.850 kg/m<sup>3</sup>. Foi acrescentado 30% nesse valor para representar os componentes.

usada *indoor* (em *indoor* o 2G falha em 40% das situações, enquanto Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT falham em menos de 5% (VEJLGAARD *et al.*, 2017)), por isso, foi descartada. A infraestrutura Wi-Fi (IEEE 802.11) já é normalmente encontrada em ambientes de produção de cervejeiros caseiros, e, portanto, não é necessário nenhum outro dispositivo externo. Devido ao objetivo de aproveitar a infraestrutura do usuário, foi escolhido o padrão Wi-Fi para o envio de dados. Observa-se que a tecnologia Wi-Fi é superdimensionada em vários os aspectos (capacidade de transmissão bidirecional e *data rate* na ordem de dezenas a centenas de Mbps).

### 3.2.4 Interface com Usuário e Exibição de Dados

A configuração necessária para operação do densímetro eletrônico é somente o ajuste dos parâmetros da rede Wi-Fi (SSID e senha) e nome do dispositivo. Foi adotado procedimento que aproveita o acelerômetro para entrar no modo de configuração do dispositivo. O procedimento é o seguinte: se dispositivo for ligado em posição vertical invertida (“de cabeça para baixo”) o dispositivo entra em modo de configuração. Nesse momento o densímetro eletrônico cria um *hotspot* Wi-Fi que pode ser acessado por senha padrão por qualquer dispositivo com navegador. Após término de configuração o dispositivo conecta-se automaticamente na rede Wi-Fi fornecida e pode ser inserido no fermentador. O diagrama de modos é apresentado na Figura 8. Os dados acessíveis pelo usuário em plataforma *online* são a densidade, temperatura e porcentagem de carga do dispositivo, todos em função do tempo.

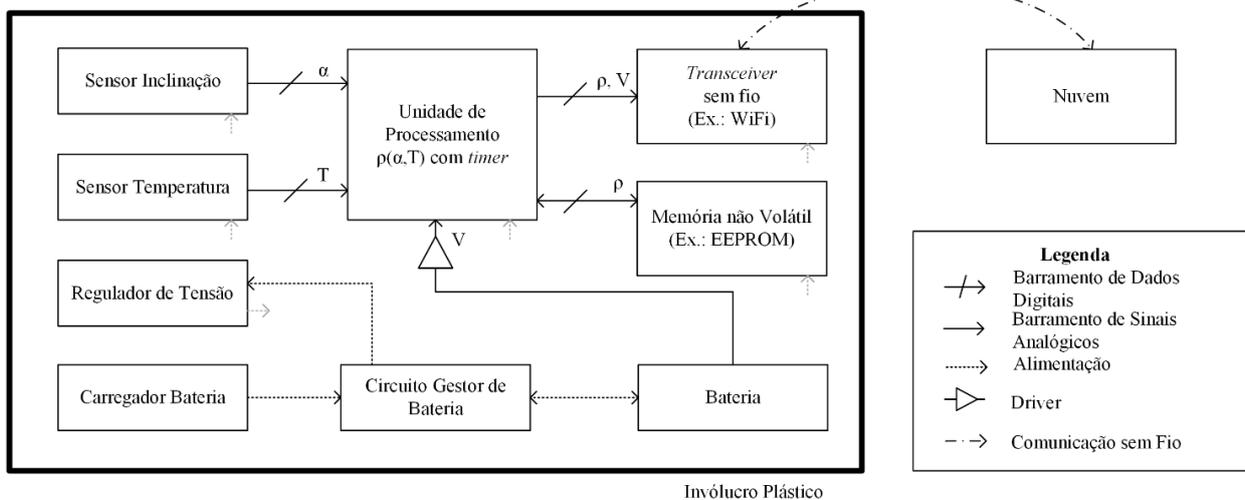
**Figura 8 – Diagrama de modos.**



### 3.3 Projeto Preliminar

O projeto funcional do densímetro eletrônico é dado pela Figura 9. O sistema é gerido por uma unidade de processamento que recebe as informações do sensor de inclinação (ângulo  $\alpha$ ), temperatura ( $T$ ) e tensão na bateria ( $V$ ); deve possuir *timer* para coleta de informações em tempos bem definidos (60 minutos) e transmissão por comunicação sem fio (com *transceiver* sem fio). Caso a unidade de processamento não consiga transmitir algum valor por falha de conexão, ela armazena o valor em uma memória não volátil e o transmite junto com a próxima coleta. As informações ficam dispostas para o usuário na nuvem.

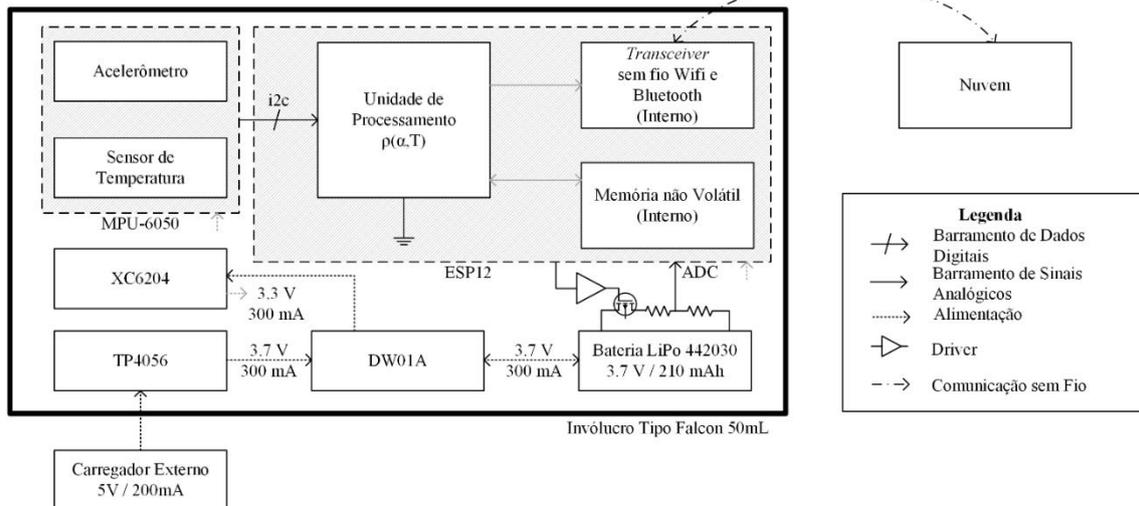
**Figura 9 – Projeto funcional do densímetro eletrônico.**



### 3.4 Projeto Detalhado

As escolhas dos componentes individuais foram listadas em subseções. A montagem de periféricos aos componentes principais é de acordo com recomendação de suas fabricantes (*datasheets*) e não são expostas nesse trabalho. O diagrama simplificado é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Projeto arquitetural do densímetro eletrônico.



### 3.4.1 Sensor MPU-6050 (InvenSense)

Para obter o valor da densidade da solução é necessário conhecimento do ângulo de aceleração da gravidade (de 1 G) em pelo menos um dos eixos, temperatura para correção da densidade (entre 10 e 40 °C) e tempos de aquisição na ordem de horas (a fermentação, e, conseqüentemente variação do ângulo do dispositivo é um processo lento). O MPU-6050 possui acelerômetro de capacidade de configuração em  $\pm 2$  G (configuração de máxima precisão para o range desse trabalho), três eixos de medição (x, y e z) com resolução de 16 bits, sensor de temperatura interno ( $-40$  a  $85$  °C) e *data rate* configurável entre 4 Hz e 1 kHz. O MPU-6050 cumpre com todas as especificações, e, portanto, é adequado para o projeto. Apesar de superdimensionado, esse sensor possui grande quantidade de documentação, que diminui o tempo de desenvolvimento da aplicação.

A interface do MPU-6050 é digital padrão I<sup>2</sup>C, que é compatível com a maioria dos microcontroladores. A alimentação é de 3,3 V (2,375 a 3,46 V). O consumo é de 500  $\mu$ A operando somente com acelerômetro e possibilidade configuração de baixo consumo (10  $\mu$ A). O acelerômetro é calibrado de fábrica e tolera variações de tensão de alimentação.

Para minimizar erros de leitura devido ruídos elétricos ou mecânicos, foi adotado leitura de média de 30 amostras do MPU-6050. Os valores de 10, 20, 30, 40, 50 e 100 foram testados. O que se mostrou suficiente e adequado para atenuar os ruídos foi a média de 30 leituras. O superdimensionamento desse tipo de filtragem acarreta consumo de bateria.

### 3.4.2 Microcontrolador ESP-12F/ESP8266MOD (Ai-Thinker)

O ESP-12F é um módulo integrado com microcontrolador da Espressif Systems ESP8266 e *transceiver* Wi-Fi (protocolo IEEE 802.11 b/g/n). O módulo possui barramento I<sup>2</sup>C adequado ao sensor MPU-6050, conversor Analógico Digital (ADC) de 10 bits (que será utilizado para monitoramento da tensão da bateria), oscilador interno (*timer*) e 4 MB de memória Flash. O ESP-12F pode ser alimentado com 3,3 V (3,0 a 3,6 V). O consumo é de 170 mA quando transmitindo informações pela Wi-Fi, 80 mA quando não transmitindo (somente CPU em 80 MHz) e 10  $\mu$ A no modo *deep sleep* (somente *timer* operando).

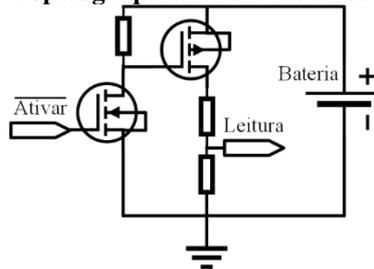
O ESP-12F é compatível com a aplicação e apesar do processamento ser superdimensionado (CPU de 80 MHz), a escolha do processador se deu em função aos periféricos embarcados (memória e *transceiver* Wi-Fi) e preço de US\$ 2,45 (cotação em LCSC, China, em abril de 2019). Outra vantagem desse tipo de solução é que o módulo utilizado é homologado pela ANATEL (N° 07254-17-10174). Esse procedimento pode facilitar ou poupar custos de homologação do produto final.

### 3.4.3 Alimentação

A bateria de lítio (e suas variantes) é bem difundida e está na maioria das aplicações em eletrônicos. Ela possui vantagens de ter o nível de carga facilmente previsível (basta ler a tensão da bateria) e grande densidade energética por volume e peso (REDDY; LINDEN, 2011). Por esses motivos, foi optado pelo uso dessa tecnologia. A bateria escolhida para o projeto é a de íons de lítio tipo prismática 442030 (capacidade máxima de 210 mAh e típica de 147 mAh). O uso de baterias de íons de lítio requer alguns cuidados. Para isso, foi escolhido um circuito de gestão de bateria (*Battery Management System* – BMS) com proteções de subtensão, sobretensão e sobrecorrente. O BMS é composto por arranjo de TP4056, DW01A e FS8205A, conforme recomendações das fabricantes Fortune Semiconductor e NanJing Top Power ASIC.

A leitura da tensão da bateria é feita no ADC do ESP-12F. Este ADC opera entre 0 e 1 V e tensão máxima da célula é de 4,2 V, por causa disso é necessário o uso de um divisor resistivo com razão 4,2:1. Para dimensionamento dos resistores, deve-se considerar que a impedância da porta do ADC do ESP-12F é na ordem de centenas de quiloohms, por causa disso é recomendado que o divisor resistivo possua ordem de grandeza menor que isso (pelo menos quiloohms). O uso de divisor resistivo na ordem de quiloohms iria impactar no consumo de bateria (que seria na ordem de miliamperes), o que não é ideal em dispositivos operando com bateria. Para resolver isso, foi adotado circuito para desligar o divisor resistivo conforme Figura 11. Esse circuito é o driver indicado na Figura 10. O circuito deve ser habilitado com nível digital “0” em “(Ativar)” (possui lógica inversa). Ressalva-se que o uso único do P-MOS não é recomendado, pois os níveis de tensão de saída do microcontrolador (0 ou 3,3 V) são incompatíveis para operação do transistor (seria necessário que a referência do microcontrolador fosse a mesma do *gate* do transistor). O uso único de N-MOS poderia disponibilizar níveis de tensão elevados em “Leitura”, o que danificaria o microcontrolador.

Figura 11 – Topologia para leitura da tensão da bateria.



A regulagem de tensão da bateria (para baterias lithium-ion, normalmente a curva de tensão está entre 4,2 e 3,3 V) para o circuito em 3,3 V (MPU-6050 e ESP-12F) será realizada pelo XC6204. Esse CI é um regulador linear (tipo *low dropout regulator*, LDO) que suporta tensões de saída de até 6 V, e tensões de entrada de 2 a 10 V. Esse CI é vantajoso pois possui queda de tensão de 200 mV quando suprindo 100 mA. O popular LM1117 possui queda de 1,20 V quando suprindo a mesma corrente. Devido a faixa de regulagem ser estreita, quanto menor a queda de tensão, melhor se aproveita a capacidade da bateria. É esperado que o circuito opere com a bateria até seu limiar de descarga recomendado de 3,3 V (REDDY; LINDEN, 2011). Nessa situação a saída do regulador será de 3,2 V (valor suficiente para operar o ESP-12 e o MPU-6050). O XC6204 possui capacidade máxima de corrente de 300 mA (tipos E ao H), valor suficiente para o projeto (são esperados picos de 170 mA durante a transmissão). O dispositivo possui consumo interno típico de 70  $\mu$ A (corrente de polarização).

Nesse trabalho poderia ser utilizado uma fonte do tipo chaveada. O LDO foi escolhido por ser de mais fácil implementação, necessitar menos componentes, poder ocupar menor área de placa, ser pouco ruidoso (menos problemas de compatibilidade eletromagnética) e possuir eficiência em ampla faixa de consumo. O dispositivo desse trabalho opera por curtos períodos de tempos em potência nominal (segundos de aquisição e transmissão) e na maior parte do tempo permanece em *deep sleep* com consumo na ordem de dezenas de microamperes.

Quanto a autonomia do protótipo, o pior caso de consumo é durante transmissão da informação via Wi-Fi. Os valores de consumo são listados na Tabela 2. O consumo dos dispositivos durante transmissão é de 171,6 mA ( $i_t$ ). Nos momentos de aquisição e processamento (sem transmissão) o consumo dos dispositivos é de 81,6 mA ( $i_{op}$ ). Em modo de espera, ou seja, com componentes em modo *low power (sleep)*, o dispositivo deverá consumir cerca de 102  $\mu$ A ( $i_{lp}$ ).

Tabela 2 – Consumo de corrente durante operação e em modo de espera.

	Em operação sem transmissão Wi-Fi	Em operação com transmissão Wi-Fi	Em modo de espera
<b>MPU-6050</b>	500 $\mu$ A	500 $\mu$ A	10 $\mu$ A
<b>ESP-12F</b>	80 mA	170 mA	10 $\mu$ A
<b>Circuito de leitura da bateria</b>	1 mA	1 mA	2 $\mu$ A
<b>Corrente de polarização XC6204</b>	70 $\mu$ A	70 $\mu$ A	70 $\mu$ A
<b>Corrente de fuga bateria</b>	10 $\mu$ A	10 $\mu$ A	10 $\mu$ A
<b>Total</b>	~81,6 mA	~170,6 mA	~102 $\mu$ A

Para estimar autonomia, foram estimados tempos de transmissão e processamento. Esses tempos podem variar no cenário real. Estima-se que o dispositivo permaneça acordado por cinco segundos ( $t_{op}$ ). A maior parte deste tempo é para gestão da conexão com a Wi-Fi e leitura dos sensores, com corrente  $i_{op}$ . Estima-se  $i_t$  com duração de centenas de milissegundos ( $t_t = 100\text{ ms}$ ), uma vez que os pacotes transmitidos são mínimos. O procedimento de ativação do dispositivo ocorre a cada uma hora, ou seja, vinte quatro vezes ao dia. No restante do tempo o dispositivo estará em modo *low power* ( $t_{lp}$ ) consumindo  $i_{lp}$ . O consumo médio ( $i_m$ ) obtido com a Equação 1 é de  $220\text{ }\mu\text{A}$ . Pela Equação 2, estima-se autonomia de 27 dias se utilizada uma bateria com capacidade ( $C_{bateria}$ ) de 210 mAh (conforme Figura 10 e de valor típico de 147 mAh) (CASALS *et al.*, 2017).

$$i_m = \frac{i_t \cdot t_t + i_{op} \cdot t_{op} + i_{lp} \cdot t_{lp}}{t_t + t_{op} + t_{lp}} \quad (1)$$

$$Autonomia = \frac{C_{bateria}}{i_m} \quad (2)$$

#### 3.4.4 Invólucro

O invólucro escolhido é comercial tipo tubo Falcon 50 ml. O invólucro escolhido possui as seguintes dimensões: 116,6 mm (comprimento), 14,3 mm (raio) e 1,00 mm (espessura). Os valores dimensionais são aproximados. Esse foi o invólucro que mais se assemelhou ao melhor resultado de simulação vistas na seção 3.2.2. O material do invólucro é de plástico polipropileno (PP) que pode ser utilizado em contato com alimentos conforme resolução da ANVISA (ANVISA, 2001). A escolha do tubo Falcon apresenta outros aspectos positivos: esse é padrão comercial facilmente encontrado em lojas de materiais de laboratório; possui baixo custo (aproximadamente R\$ 0,50 por tubo); e possui tampa com vedação interna. O tubo utilizado no projeto iSpindel não é facilmente encontrado, e, portanto, foi desconsiderado.

#### 3.4.5 Protótipo

Para estudar se as soluções são suficientes para atender aos objetivos do Densímetro Eletrônico, foram confeccionados dois protótipos com *kits* de desenvolvimento (Wemos D1 mini com ESP-12F e GY-521 com MPU-6050) e bateria lithium-ion tipo cilíndrica 18350. O protótipo é apresentado na Figura 12. O *firmware* dos protótipos foi construído com a IDE Arduino. O *software* que recebe os dados foi desenvolvido em JavaScript com Google Apps Script (servidor na nuvem de *parse data*). Os dados são salvos pelo *software* na plataforma Google Docs. Todos os dados permanecem na nuvem (Google Docs).

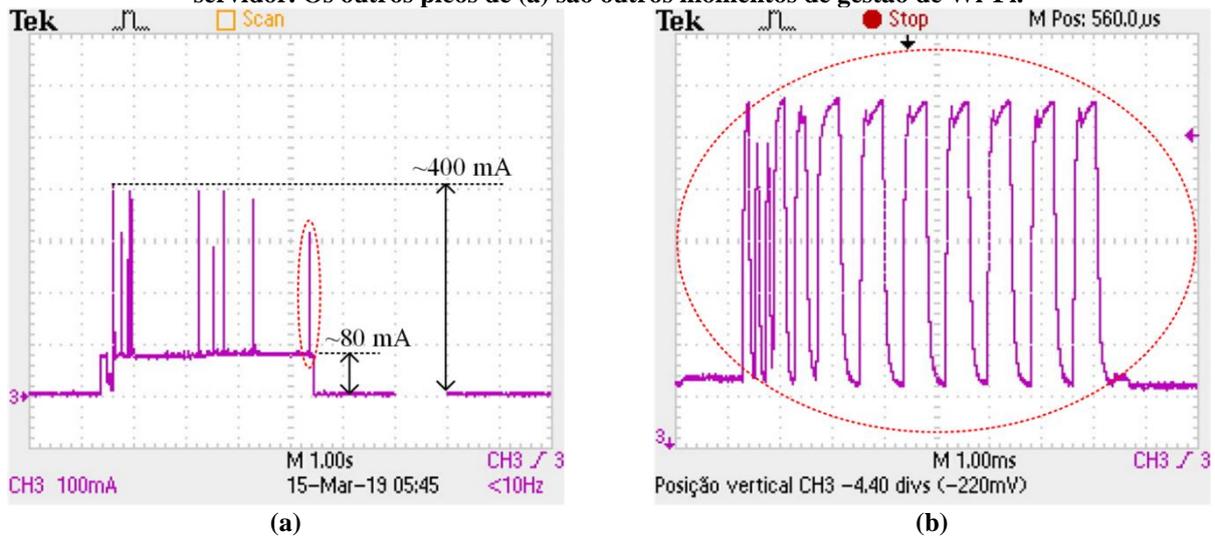
**Figura 12 – Protótipo desenvolvido.**



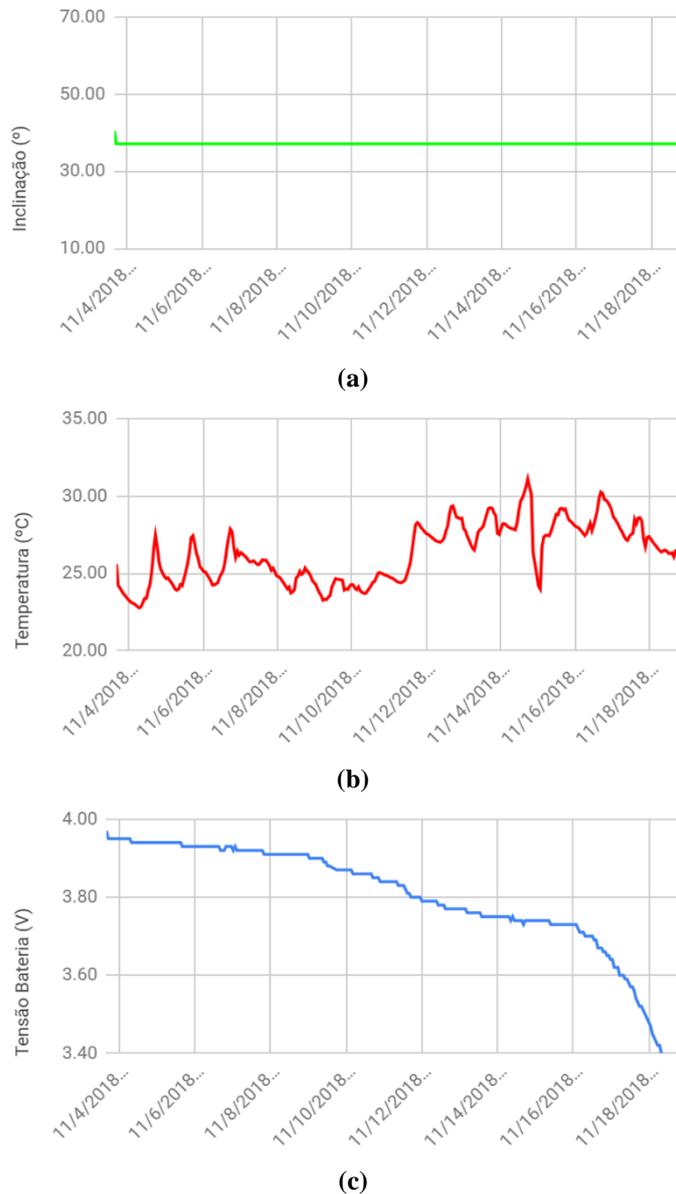
O perfil de corrente do protótipo foi estudado com osciloscópio (modelo Tektronix TDS2004C). O perfil de consumo é apresentado na Figura 13(a), e tem duração de acordo com o valor esperado (aproximadamente cinco segundos). O consumo sem transmissão condiz com o valor esperado (aproximadamente 80 mA). Os picos de corrente divergem do esperado de 171,6 mA (Figura 13(b)).

O primeiro teste consistiu em deixar o dispositivo ligado (de maneira estática) para estudo da consistência de transmissão, circuitos e bateria. Como o dispositivo permaneceu estático o valor de ângulo lido não variou (Figura 14(a)). A temperatura lida corresponde a temperatura da sala em que o dispositivo permaneceu condicionado (Figura 14(b)). A bateria teve tensão inicial de 3,95 V e o dispositivo operou até a tensão de 3,4 V (Figura 14(c)). A duração total da bateria (cilíndrica 18350) foi de 15 dias. A capacidade da bateria foi investigada. O valor encontrado foi de 142 mAh, em descarga com corrente constante de 100 mA (com equipamento SkyRC iMAX B6). A autonomia teórica para esse valor de capacidade é de 26 dias.

**Figura 13 – (a) perfil de corrente do Densímetro Eletrônico e (b) vista detalhada da curva circulado em vermelho na figura (a), corresponde à transmissão dos dados para servidor. Os outros picos de (a) são outros momentos de gestão de Wi-Fi.**



**Figura 14 – Primeira etapa de testes: (a) nível de inclinação, (b) temperatura e (c) tensão da bateria. O eixo da horizontal corresponde ao tempo.**



O segundo teste visou testar a capacidade de transmissão dentro de fermentador de 2.000 litros industrial de aço inox (Figura 15). O teste de comunicação foi bem-sucedido com o fermentador lacrado (paredes e tampa de aço inox). Nesse momento os locais menos susceptíveis a atenuar o sinal Wi-Fi são as borrachas de vedação do fermentador. A distância entre roteador Wi-Fi e o fermentador foi de até 15 metros (sem obstáculos). Verificou-se nesse teste que, para aplicação do densímetro na produção industrial de cerveja, seria necessário sanitização interna do tubo Falcon 50 ml e grau de proteção IP no produto.

**Figura 15 – Fermentadores industriais em aço inox utilizados em etapa de testes de comunicação (CERVEJARIA KAIRÓS, 2019).**

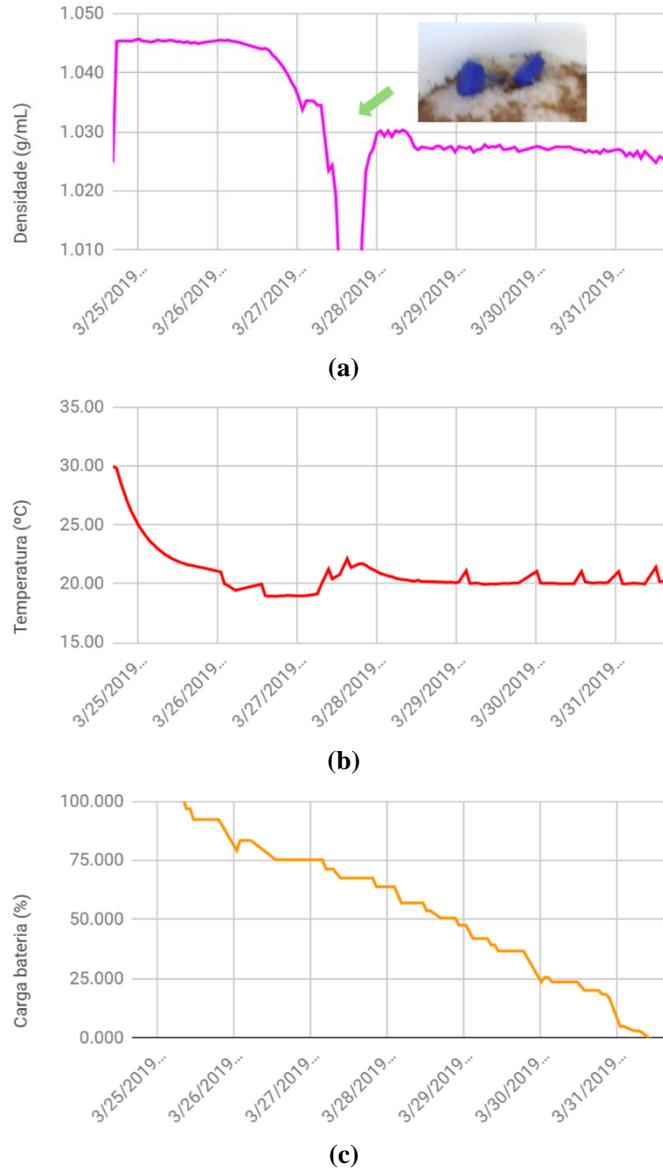


O terceiro teste foi conduzido em produção caseira. Os dois protótipos foram inseridos no fermentador conforme apresentado na Figura 16. A leitura de densidade obtida nesse ensaio é dada pela Figura 17(a). A seta em verde indica erro de leitura que foi provocado devido a interferência entre os dois protótipos inseridos (os protótipos ficaram sobrepostos e foram separados manualmente). A temperatura lida corresponde à temperatura do fermentador, que foi ajustado em 20 °C (Figura 17(b)). A curva de descarga da bateria em porcentagem é dada pela Figura 17(c). Os modelos utilizados para obter as curvas de densidade e carga da bateria em porcentagem serão detalhados na subsecção a seguir.

**Figura 16 – Terceiro ensaio: dois protótipos inseridos em produção de cerveja artesanal em fermentador plástico.**



**Figura 17 – Terceira etapa de testes: (a) Densidade calculada com a Equação 3, (b) temperatura e (c) porcentagem de carga restante na bateria calculada com a Equação 4. O eixo da horizontal corresponde ao tempo. Em (a) há indicação por seta verde e imagem de momento que os dois protótipos ficaram sobrepostos (o que causou um erro de leitura), os protótipos forma separados manualmente para continuação desse ensaio.**



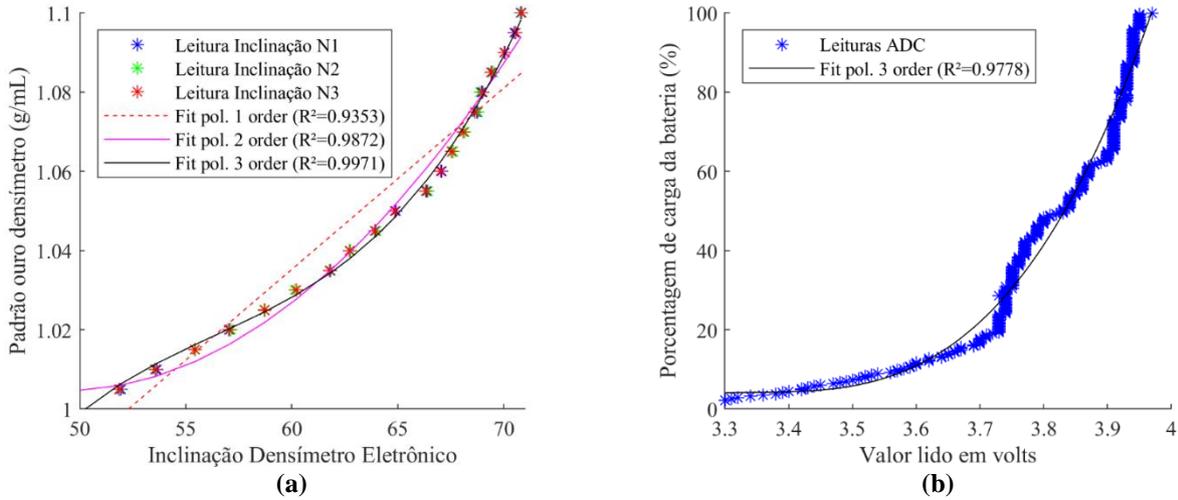
### 3.4.6 Calibração

O modelo polinomial investigado que melhor representa ( $R^2 > 0,99$ ) os valores lidos pelo densímetro eletrônico (que é a inclinação em graus), ou seja, que converte o valor “*tilt*” lido pelo acelerômetro (em graus) em valor de densidade (em g/ml), é o de terceira ordem (Equação 3). Os modelos polinomiais investigados (primeira, segunda e terceira ordem) e os pontos de calibração (padrão ouro lido pelo densímetro) são dados na Figura 18(a). Esse modelo de calibração foi utilizado no terceiro ensaio (com produção artesanal, conforme Figura 17(a)). Nesse ensaio a densidade foi monitorada com método de densímetro de vidro (antes e depois da fermentação). O valor encontrado com densímetro de vidro no início da fermentação foi de 1,044 g/ml, sendo que o valor lido com o densímetro eletrônico foi 1,045 g/ml. O valor encontrado com densímetro eletrônico no término da fermentação foi de 1,028 g/ml, sendo que o valor lido com o densímetro eletrônico foi de 1,027 g/ml.

$$d_{20^{\circ}C} \left[ \frac{g}{ml} \right] = 1,473 \cdot 10^{-5} \cdot Tilt^3 - 2,492 \cdot 10^{-3} \cdot Tilt^2 + 0,1430 \cdot Tilt - 1,762 \quad (3)$$

$$Bat [\%] = 396,1 \cdot Bat_{ADC}^3 - 3,979 \cdot 10^3 \cdot Bat_{ADC}^2 + 1,332 \cdot 10^4 \cdot Bat_{ADC} - 1,487 \cdot 10^4 \quad (4)$$

**Figura 18 – (a) Calibração da leitura de densidade do densímetro eletrônico. Os pontos dos três ensaios N1, N2 e N3 são muito próximos e sobrepostos nos gráficos. (b) Modelo para converter a leitura da bateria em volts para valor em porcentagem.**



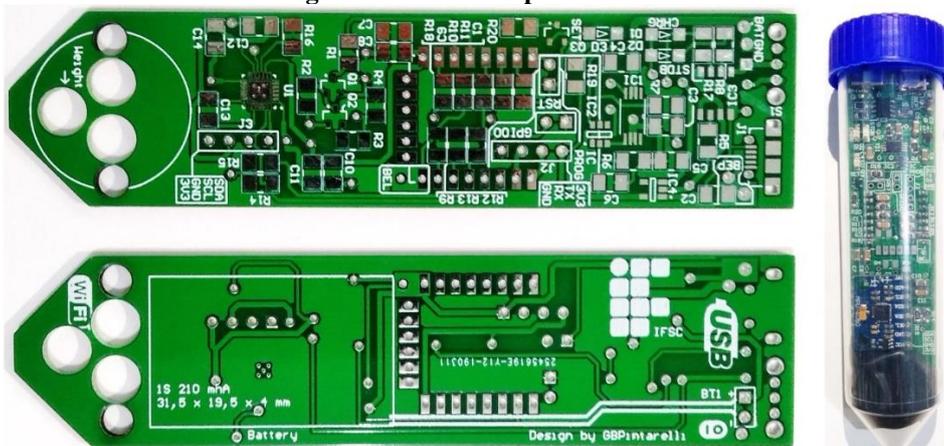
O valor da bateria em porcentagem foi ajustado de acordo com a leitura “ $Bat_{ADC}$ ” no ADC em volts. Para obtenção da porcentagem da bateria não é necessário critério de exatidão. Foi escolhido modelo polinomial de terceira ordem para esse tipo de conversão. A leitura em porcentagem é conveniente para o usuário. Os pontos usados para calibração (300 pontos) e curva de calibração é dada pela Figura 18(b). Esse ensaio foi realizado sem repetições e com a própria operação normal do dispositivo. A equação obtida é apresentada na Equação 4. Esse modelo de calibração foi utilizado no terceiro ensaio (Figura 17(c)). O modelo representa a descarga da bateria de maneira próxima a linear, o que é prático para informar o usuário da situação (porcentagem de carga) da bateria.

A correção da densidade em função da temperatura, pode ser feita com uso de equação para correção, igual ao utilizado para correção da densidade com método do densímetro de vidro. Essa equação pode ser encontrada na ABNT NBR 5992:2016 (ABNT, 2016). O cálculo da temperatura é conforme procedimentos do fabricante do MPU-6050. A leitura da temperatura mostrou resultados condizentes em ambos os testes experimentais (Figura 14(b) e Figura 17(b)).

### 3.4.7 Placa do Produto Final

A placa de circuito impresso (PCI) do produto final foi desenvolvida pelos autores do trabalho e é apresentada na Figura 19. As dimensões são compatíveis com o tubo Falcon 50 ml (com folgas de 0,5 mm em todas as laterais). Foram aplicadas boas práticas de desenvolvimento de PCI, principalmente nos aspectos de redução de custo de produção e mitigação de problemas de compatibilidade eletromagnética.

**Figura 19 – Placa do produto final.**



Para poupar custos de produção, todos os componentes foram posicionados do lado inferior (*bottom layer*), com exceção do ESP-12F. Dessa maneira, não é necessário uso de cola de componentes durante soldagem (se uso de *pick and place* e *reflow*). Todos os componentes são do tipo *surface-mount technology*

(SMT) de tamanhos de fácil manipulação (*e.g.*, tipo 1206), com exceção do MPU-6050 que somente é disponível em encapsulamento QFN. Além de reduzir custos, isso possibilita manutenções fáceis e prototipação manual. Há espaçamentos na periferia do componente QFN para sua soldagem manual ou *reflow*. Os únicos componentes tipo *pin through hole* (PTH) são o conector da bateria e a chave principal. Os componentes utilizados no projeto são encontrados no mercado nacional (exceto o MPU-6050). A placa desenvolvida é de simples produção, pois possui somente duas camadas e é tipo FR-4.

Para mitigar problemas com compatibilidade eletromagnética, foram utilizados pares de trilhas simétricas (ou bifilares) de alimentação e *ground* independente para cada carga ( $V_{SS}$  e GND). Foram aplicados capacitores de desacoplamento em todas as cargas. Não há áreas de *loop*, e as malhas de GND são somente conectadas em ponto único (próximo à referência da bateria).

É acessível ao usuário (ao abrir a tampa do tubo) o conector USB (para recarregar bateria) e chave principal; não é necessário remover a PCI para operação. Na PCI há espaços para colar a bateria, passagem do cabo da bateria e há também, local para posicionar o peso necessário para flutuação (com parafuso ou cola).

Na PCI há barramento um I<sup>2</sup>C que pode ser utilizada para expansão do projeto (acréscimo de outros sensores I<sup>2</sup>C). Esse barramento também pode ser utilizado para conexão do *kit* de desenvolvimento MPU-6050, caso não seja possível solda do componente durante prototipação.

#### 4 DISCUSSÃO

Existem discussões sobre a definição de IoT. Nesse trabalho definiu-se IoT como uma tecnologia que possibilita trânsito de informações de diferentes tipos de “coisas” através da Internet e redes sem fio. Atualmente, os dispositivos IoT podem ser desde sistemas pequenos, localizados e simples até um grande sistema global distribuído e complexo. A arquitetura da tecnologia de dispositivos IoT também está sendo estudada. A arquitetura tradicional do IoT contém três níveis, que são de sensoriamento, rede e comunicação de dados e aplicação (IEEE, 2015). O tipo de conexão (com ou sem fios) que um dispositivo apresenta não o caracteriza IoT. Por exemplo, sensoriamento remoto não necessariamente caracteriza IoT. Porém, a disponibilidade da informação de um sensor a uma plataforma ou outro equipamento caracteriza IoT (GUBBI *et al.*, 2013). Por causa desse motivo, acredita-se que o produto apresentado nesse trabalho possui tecnologia IoT. Ainda assim, o dispositivo proposto pode ser integrado com novas plataformas e equipamentos com mínimo investimento. Por exemplo, ele pode ser integrado com sistemas automáticos de produção de cerveja.

Alguns aspectos não foram abordados nesse trabalho e podem ser abordados em trabalhos futuros. O planejamento de um produto pode conter mais etapas (*i.e.*, ciclo de vida do produto, método de vendas e objetivos da empresa) (PAHL *et al.*, 2007). Pode ser investigado autonomia da bateria e interface do produto por requisitos do consumidor (CR). Pode-se investigar o protocolo mais adequado para o dispositivo. No protótipo foi utilizado o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). É de conhecimento que o HTTP utiliza mais recursos de *hardware* e muitas vezes não é recomendado para IoT. Apesar disso, o protótipo cumpriu com os requisitos solicitados. Caso seja optado por *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) será necessário infraestrutura adicional (*broker* MQTT). Pode-se também desenvolver plataforma *online* otimizada para a aplicação. Recomenda-se uso de plataforma que seja operada via navegador. Isso possibilita acesso por diferentes dispositivos (PC, *tablet* ou celular). O uso da plataforma Google Docs no protótipo não se mostrou como uma limitação. A plataforma é gratuita, de fácil uso e muito semelhante ao Microsoft Excel. Os dados podem ser extraídos da plataforma em formatos “.csv”, “.xls” ou simplesmente visualizados em gráficos.

Na Tabela 2, a maior parte do consumo são perdas internas do regulador linear (LDO) durante o modo de espera. É possível desligar o LDO por *hardware* para redução do consumo de todo circuito para 0,1  $\mu$ A. Esse procedimento pode dobrar a autonomia da bateria. Porém, será necessário um *timer* externo (*e.g.*, Texas Instrumentes TPL5010). Ainda assim, haverá fugas internas na bateria. Caso se deseje operar esse dispositivo por longos períodos (meses ou anos) deve-se utilizar uma bateria de longa duração. Devido ao projeto atender ao requisito de autonomia de 15 dias, não foi necessária implementação de nenhum desses procedimentos. Nesse trabalho somente foi necessária a implementação de boas práticas simples para poupar a bateria. No microcontrolador e sensor foram implementados *deep sleep*. O circuito para ler a bateria pode ser desligado (com o circuito de custo mínimo da Figura 11).

Há diferenças entre os valores de autonomia teóricos e práticos descritos nesse trabalho. Essa divergência pode ter sido causada devido à alteração no tempo de operação do dispositivo. Nesse trabalho foram observados valores de cinco segundos (Figura 13(a)). Porém, é de conhecimento que conexões Wi-Fi ruins podem demandar tempo de operação e transmissão superiores ( $t_{op}$  e  $t_t$ ). Portanto, é interessante incluir fator que incremente  $t_{op}$  e  $t_t$  em trabalhos futuros.

O método do processo de calibração realizado no trabalho pode ser utilizado para calibração do produto final. O processo pode ser realizado somente uma vez para um único dispositivo de uma determinada linha de

montagem. Esse modelo pode ser reaproveitado nos dispositivos da linha de produção, ou seja, o processo de calibração não precisa ser repetido na indústria. Esse procedimento que pode reduzir custos de produção. Foi possível representar a densidade em função da inclinação com modelo polinomial simples (terceira ordem, na Figura 18(a)). Ainda assim, esse tipo de procedimento pode facilitar a operação por parte do usuário, uma vez que não é necessário calibração. Ressalva-se que deve ser utilizado peso bem definido. Os dispositivos eletrônicos irão se comportar de maneira semelhante uma vez que o acelerômetro escolhido (MPU-6050) já é calibrado de fábrica. Não há requisitos de precisão no modelo de estimativa de carga de bateria. O objetivo desse modelo é ser um facilitador para o usuário (bateria em porcentagem). Em alguns produtos comerciais utiliza-se circuitos integrados medições de correntes (*battery gas/fuel gauge IC*) para estimar energia armazenada na bateria com mais precisão (e.g., Texas Instruments série BQxxxxx). Não foi adotado procedimento com circuito integrado devido preço superior e não requisito de resolução de medição da bateria.

A investigação por tecnologias correlatas no estágio inicial do projeto foi bastante importante pois detectou patentes nos Estados Unidos. O desenvolvimento de produto já protegido por propriedade intelectual no Brasil poderia não ser benéfico, uma vez que não seria possível comercializá-lo no Brasil. Não existe uma patente global. A proteção é territorial e o depósito deve ser feito em cada país. O PCT visa facilitar esse tipo de situação (o Brasil é participante). Uma vez que não foram detectadas patentes que possam interferir na venda desse dispositivo no Brasil, pode-se comercializá-lo livremente, não se aplica nenhum tipo de sanção no Brasil. Para comercializar o dispositivo desse trabalho no Estados Unidos seria necessário consultar o titular da patente detectada.

O uso de simulações para projeto do invólucro reduziu custos com experimentação com materiais em aço inoxidável. O uso de simulações pode ser utilizado para otimizar ainda mais a forma do dispositivo.

A etapa de testes em fermentadores industriais detectou necessidade de grau IP na placa eletrônica do produto. Nesse trabalho não foram feitas investigações em relação a esse tipo de proteção. Recomenda-se investigar em trabalhos futuros o encapsulamento da placa eletrônica com resina epóxi. Ressalva-se que em uma indústria esse procedimento é importante, pois o contato da cerveja com os componentes internos (bateria) pode provocar contaminação e perda total do lote.

O densímetro eletrônico desenvolvido necessita somente de operações básicas anteriores ao uso (*i.e.*, configuração, carregamento da bateria e higienização). O dispositivo é compatível com diferentes fermentadores e é minimamente invasivo (*i.e.*, não necessitar instalações completas, alterações no fermentador e cabos, e não provocar alterações na cerveja). O dispositivo permanece ativo registrando automaticamente dados de densidade durante toda a duração da etapa de fermentação. As soluções empregas no projeto são soluções econômicas e suscetíveis de aplicação industrial (produzíveis em indústrias de eletrônicos convencionais). O dispositivo pode ser implementado na produção de cerveja pois possui invólucro em material seguro.

A característica proeminente do dispositivo é a facilidade de o operador consultar a curva de fermentação de bebidas fermentadas, como a cerveja, e dela extrair o estado da fermentação. O fermentador pode permanecer lacrado e sem necessitar intervenção humana durante fermentação. O produto densímetro eletrônico visa proporcionar facilidade, comodidade e economia aos produtores de cerveja artesanal e em microcervejarias. Essas qualidades são devido ao produto realizar a medição automática de densidade e sem necessidade de extração e desperdício de cerveja.

A tecnologia embarcada no dispositivo está no contexto da especialização em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O dispositivo é automático e eletrônico. Diversos conceitos aprendidos durante a especialização foram aplicados. Principalmente em relação à desenvolvimento de produtos, sistemas embarcados, gestão de projetos, normatização, tecnologia de comunicação de dados e processos de fabricação.

A capacidade da levedura em processar os açúcares definirá a fermentação e isso pode ser avaliado com o dispositivo. Acredita-se que o trabalho irá gerar impacto positivo aos cervejeiros artesanais e possivelmente pode ser aplicável na indústria de pequeno porte. O conhecimento da curva de fermentação pode acrescentar qualidade (ou controle de qualidade) e consistência ao produto. Consequentemente, pode gerar produtos fermentados de maior valor agregado.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi desenvolvido densímetro eletrônico para produção de cervejas considerando métodos de desenvolvimento de produtos. Esses aspectos visam tornar o produto econômico (baixo custo) e confiável. Um protótipo foi desenvolvido para validação da ideia. O dispositivo desenvolvido pode melhorar a medição de densidade e acompanhamento da fermentação. Além disso, o produto é de fácil instalação e manipulação. Ele é adequado para cervejeiros caseiros.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao professor Dr. Cláudio Luís Ebert e ao Murilo Dirksen da Cervejaria Kairós por permitirem ensaios na empresa, ao Eng. Sérgio Stähelin da cervejaria Stähelin Bier pelo empréstimo do densímetro de vidro e *brainstorm*, a Eng. Marina Brasil Pintarelli pelo auxílio com as simulações no SolidWorks.

## REFERÊNCIAS

- ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução de Diretoria Colegiada N° 91, de 11 de maio de 2001. Brasil, 2001.
- ABRACERVA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERVEJA ARTESANAL. **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: 22 abr. 2018.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5992 - Etanol combustível - Determinação da massa específica e do teor alcoólico por densímetro de vidro**. [s.l.: s.n.], 2016.
- BARON BREW EQUIPMENT. **TILT™ Wireless Hydrometer and Thermometer**. Disponível em: <<http://www.tilthydrometer.com>>. Acesso: 2019.
- BETTS, B. Brewing up: A technology revolution. **Engineering & Technology**, v. 11, n. 2, p. 54–57, 1 mar. 2016.
- BNDES. **Produto 8: Relatório do Plano de Ação para o Desenvolvimento de IoT no Brasil**. [s.l.: s.n.], 2017.
- BURATTI, S.; BENEDETTI, S. **Alcoholic Fermentation Using Electronic Nose and Electronic Tongue**. [s.l.]: Elsevier Inc., 2016.
- CARPES JR, W. P. **Introdução ao Projeto de Produtos**. 1ª ed. Florianópolis: Editora Bookman, 2014.
- CASALS, L.; MIR, B.; VIDAL, R.; GOMEZ, C. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2364, 16 out. 2017.
- CERVEJARIA KAIRÓS. **Cervejaria Kairós**. Disponível em: <<http://www.cervejariakairos.com.br>>. Acesso em: 2019.
- DAOUD, I. S.; SEARLE, B. A. On-Line Monitoring of Brewery Fermentation by Measurement of CO<sub>2</sub> Evolution Rate. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 96, n. 5, p. 297–302, 10 set. 1990.
- ELMEHDI, H. M.; PAGE, J. H.; SCANLON, M. G. Evaluating Dough Density Changes During Fermentation by Different Techniques. **Cereal Chemistry Journal**, v. 84, n. 3, p. 250–252, maio 2007.
- GIBSON, B. R.; LAWRENCE, S. J.; LECLAIRE, J. P. R.; POWELL, C. D.; SMART, K. A. Yeast responses to stresses associated with industrial brewery handling. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 31, n. 5, p. 535–569, set. 2007.
- GITHUB. **iSpindel**. Disponível em: <<http://www.github.com/universam1/iSpindel>>. Acesso: 2019.
- GUBBI, J.; BUYYA, R.; MARUSIC, S.; PALANISWAMI, M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, set. 2013.
- IEEE. **Towards a Definition of the Internet of Things (IoT)**. [s.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<https://iot.ieee.org/definition.html>>. Acesso em: 4 nov. 2018.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 649 - Laboratory glassware - Density hydrometers for general purposes**. [s.l.: s.n.], 1981.
- MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa N° 5, de 31 de março de 2000**, 2000.
- MARTINS, M. R. **Hidrostatica e Estabilidade, Notas de Aula PNV2341, USP**. [s.l.: s.n.], 2010.
- MCKINSEY & COMPANY. **The Internet of Things: mapping the value beyond the hype**. [s.l.: s.n.], 2015.

- MUMTAZ, S.; ALSOHAILY, A.; PANG, Z.; RAYES, A.; TSANG, K. F.; RODRIGUEZ, J. Massive Internet of Things for Industrial Applications: Addressing Wireless IIoT Connectivity Challenges and Ecosystem Fragmentation. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 11, n. 1, p. 28–33, mar. 2017.
- NSC – NOSSA SANTA CATARINA. **Mercado das cervejas artesanais triplicou em Santa Catarina - A Notícia**. Disponível em: <<http://www.anoticia.clicrbs.com.br/sc/geral/joinville/noticia/2017/07/mercado-das-cervejas-artesanais-triplicou-em-santa-catarina-9842002>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- OECD. Test No. 109: Density of Liquids and Solids. **OECD Guidelines for the Testing of Chemicals**, v. Section 1, out. 2012.
- OLIVEIRA, B. D. M.; MELO FILHO, J. M.; AFONSO, J. C. A densidade e a evolução do densímetro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 1, p. 1–10, mar. 2013.
- OSTERTAGOVÁ, E. Modelling using Polynomial Regression. **Procedia Engineering**, v. 48, p. 500–506, 2012.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. **Engineering Design**. London: Springer London, 2007.
- PANG, Z.; CHEN, Q.; HAN, W.; ZHENG, L. Value-centric design of the internet-of-things solution for food supply chain: Value creation, sensor portfolio and information fusion. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 289–319, 29 abr. 2015.
- REDDY, T. B.; LINDEN, D. **Linden's handbook of batteries**. 4. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 2011.
- ŠAVEL, J.; KOŠIN, P.; BROŽ, A.; SIGLER, K. Convenient Monitoring of Brewery Fermentation Course by Refractometry. **Kvasny Prumysl**, v. 55, n. 4, p. 94–99, 1 abr. 2009.
- SCHMIDT, R. H.; ERICKSON, D. J. **Sanitary Design and Construction of Food Equipment (FSHN0409) University of Florida**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/fs/fs11900.pdf>>.
- SIGFOX. **Sigfox Coverage**. Disponível em: <<http://www.sigfox.com/en/coverage>>. Acesso em: 17 mar. 2019.
- STEWART, G. G. **Brewing and Distilling Yeasts**. Cham: Springer International Publishing, 2017.
- THE THINKS NETWORK. **The Thinks Network Map**. Disponível em: <<http://www.thethingsnetwork.org/map>>. Acesso em: 17 mar. 2019.
- VEJLGAARD, B.; LAURIDSEN, M.; NGUYEN, H.; KOVACS, I. Z.; MOGENSEN, P.; SORENSEN, M. Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. [s.l.]: IEEE, 2017, p. 1–5.
- VERBELEN, P. J.; DEKONINCK, T. M. L.; SAERENS, S. M. G.; VAN MULDER, S. E.; THEVELEIN, J. M.; DELVAUX, F. R. Impact of pitching rate on yeast fermentation performance and beer flavour. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 82, n. 1, p. 155–167, 19 fev. 2009.
- WANG, J.; YUE, H. Food safety pre-warning system based on data mining for a sustainable food supply chain. **Food Control**, v. 73, p. 223–229, mar. 2017.
- WHITE, C.; ZAINASHEFF, J. **Yeast: the practical guide to beer fermentation**. [s.l.]: Brewers Publications, 2010.
- WHITMORE, A.; AGARWAL, A.; DA XU, L. The Internet of Things — A survey of topics and trends. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 261–274, 12 abr. 2015.
- XU, M.; DAVID, J. M.; KIM, S. H. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**, v. 9, n. 2, p. 90, 5 fev. 2018.