

**JOSÉ HENRIQUE CAMARGO LEOPOLDO E SILVA
RAFAEL JARDIM PASTOR**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE
DA FERMENTAÇÃO DE CERVEJAS**

São Paulo
2020

**JOSÉ HENRIQUE CAMARGO LEOPOLDO E SILVA
RAFAEL JARDIM PASTOR**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE
DA FERMENTAÇÃO DE CERVEJAS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista.

São Paulo
2020

**JOSÉ HENRIQUE CAMARGO LEOPOLDO E SILVA
RAFAEL JARDIM PASTOR**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE
DA FERMENTAÇÃO DE CERVEJAS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração:

Engenharia Elétrica

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo
2020

RESUMO

Resumo...

Palavras-Chave – Cerveja, Fermentação Alcoólica, Produção de Bebidas, Controle de Processos.

LISTA DE FIGURAS

1	Gráfico de evolução de variáveis ao longo da fermentação - Munroe [1]	14
2	Desenho do problema de troca de calor entre o ambiente e fermentador	20
3	Circuito elétrico equivalente ao problema de troca de calor entre ambiente e fermentador	20
4	Dissipador de calor e ventoinha, modelo utilizado em CPU.	22
5	Haste de cobre.	22
6	Wemos D1	23
7	Sensor DS18B20	24
8	Sensor de diferença de pressão MPXV7002DP	27
9	Representação de um corpo (azul) submerso em um fluido (amarelo) e das forças gravitacional e de empuxo	28
10	Sensor de carga ZHIPU-200g	28
11	Sensor de pH E-201-C	29
12	Esquema de uma célula de Peltier	29
13	Diagrama de Casos de Uso.	34
14	Camada de Interface.	36
15	Camada Intermediária.	37
16	Camada de Negócio - Servidor de Registros.	38
17	Camada de Negócio - Servidor de Receitas.	39
18	Camada de Negócio - Servidores de Análises, Processamento e Autenticação.	39
19	Camada de Persistência.	40
20	Diagrama de Entidade-Relacionamento.	41
21	Diagrama de Componentes.	42

LISTA DE TABELAS

1	Descrição das variáveis do circuito elétrico equivalente da figura 3.	21
2	Diferenças de pressão esperadas para cálculo da densidade relativa durante a fermentação.	26

LISTA DE SÍMBOLOS

Lista de símbolos...

SUMÁRIO

1	Introdução	9
1.1	Objetivo	9
1.2	Resumo	9
1.3	Organização do Trabalho	10
2	Contexto	11
2.1	História da Cerveja	11
2.2	Fabricação de Cervejas	11
2.2.1	Fermentação e Maturação	12
2.3	Estado da Arte de Sistemas de Produção Artesanal	13
2.3.1	Análise de Soluções Existentes	13
3	Metodologia do Trabalho	15
4	Projeto	16
4.1	Especificação de Requisitos Técnicos	16
4.1.1	Sistema Hardware	16
4.1.1.1	Requisitos funcionais de Hardware	16
4.1.1.2	Requisitos não funcionais de Hardware	17
4.1.2	Sistema Software	17
4.1.2.1	Requisitos funcionais de Software	17
4.1.2.2	Requisitos não funcionais de Software	18
4.2	Projeto de Controle	18
4.2.1	Modelagem Térmica do Sistema	18
4.2.2	Transferência de Calor entre Ar e Fermentador	19

4.2.3	Geração de Calor na Fermentação	21
4.2.4	Dispositivo para Troca de Calor	21
4.3	Projeto de Hardware	22
4.3.1	Microcontrolador	23
4.3.2	Critérios de Escolha dos Sensores	23
4.3.3	Sensor de Temperatura	24
4.3.4	Sensor de Densidade Relativa	25
4.3.4.1	Medição por diferença de pressão	25
4.3.4.2	Medição por Empuxo	27
4.3.5	Sensor de pH	28
4.3.6	Atuador de Temperatura	29
4.4	Projeto de Software	30
4.4.1	Especificação dos Casos de Uso	31
	UC - 1: Registro de Dispositivo	31
	UC - 2: Cadastro de Receitas	32
	UC - 3: Cadastro de Lotes	32
	UC - 4: Envio das informações do Lote para Dispositivo	33
	UC - 5: Envio das informações do Dispositivo para o Sistema	33
	UC - 6: Visualização das Informações dos Lotes	33
4.4.2	Modelo de Entidade-Relacionamento	34
4.4.3	Arquitetura de Software	35
4.4.3.1	Camada de Interface	35
4.4.3.2	Camada Intermediária	37
4.4.3.3	Camada de Negócio	38
4.4.3.4	Camada de Persistência	39
4.4.4	Definição de Tecnologias	39

4.4.5	Projeto de Implantação	40
5	Implementação	43
6	Testes e Avaliação do Protótipo	44
7	Considerações Finais	45
7.1	Conclusões do Projeto de Formatura	45
7.2	Contribuições	45
7.3	Perspectivas de Continuidade	45
	Referências	46
	Apêndice A – Levantamento Bibliográfico	47
	Apêndice B – Protótipos das Interfaces	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste estudo é desenvolver um protótipo de um sistema que realize o monitoramento e controle do processo de fermentação de cervejas. O objetivo específico é possibilitar às cervejarias de pequeno e médio porte o desenvolvimento da capacidade de testes de novas receitas de cervejas, a fim de garantir a reprodutibilidade e qualidade das mesmas por meio do controle do processo de fermentação.

1.2 Resumo

Na produção de cervejas, a fermentação é um complexo processo bioquímico cuja função primária é converter os açúcares obtidos dos grãos maltados em etanol, tendo grande impacto no sabor, aroma, aparência e textura do produto. As principais variáveis da fermentação são a densidade do líquido em fermentação, que indica a evolução do processo, e a temperatura do líquido, que impacta diretamente no funcionamento da levedura de modo que um controle preciso evitar subprodutos indesejados e contaminações que impactam significativamente qualidade final do produto. O objetivo geral desse projeto é criar um protótipo de um sistema que realize o monitoramento dessas variáveis no processo e controle de temperatura, de modo a garantir resultados mais precisos e reprodutíveis, voltado para cervejarias de pequeno e médio porte que realizem testes de novas receitas e necessitem de alto grau de controle para escalas pequenas de produção. O sistema idealizado é composto por dois principais subsistemas: (i) um físico, agregando o controlador, hardware com sensores e atuadores e software embarcado; e (ii) um digital, que capta, processa e disponibiliza todas as informações adquiridas para o usuário. A execução do projeto será guiada por várias iterações curtas e prototipagem, focando na resolução de algumas milestones a cada iteração, com a finalidade de acelerar a obtenção de resultados. Deste modo, para a aquisição de conhecimento técnico e de negócio necessários para a

execução do projeto será feito um levantamento e estudo de material bibliográfico adequado, entrevistas com mestres-cervejeiros para o qual o produto se destinaria e análise de soluções já existentes no mercado, dentro e fora do país.

1.3 Organização do Trabalho

2 CONTEXTO

Esse projeto tem natureza multidisciplinar, buscando harmonizar a bioquímica do processo de produção de cervejas com sistemas de controle e automação e geração e análise de dados estudados na Engenharia Elétrica. Em sua primeira parte, será estudado o funcionamento das leveduras e como o ambiente age sobre seu processo metabólico, enquanto na outra parte, são estudados sensores, atuadores e arquitetura de Internet das Coisas para captação, processamento e disponibilização de informações referente a ação dos microrganismos.

2.1 História da Cerveja

2.2 Fabricação de Cervejas

O processo de fabricação de cervejas é conhecido pela humanidade há milhares de anos, tendo seu primeiro registro histórico em 2800 a.C. na região da Mesopotâmia. Ao longo dos anos, foi amplamente praticado e estudado por diversos povos, sendo refinado à medida que um maior entendimento sobre o processo foi obtido. Ainda que existam variações dependentes de ingredientes, a produção de cervejas é dividida por Kunze (2) nas seguintes etapas:

1. Maltagem dos grãos: comumente cevada, que consiste na produção de enzimas como a amilase, a partir da germinação controlada e parcial dos grãos, que passam a ser chamados de malte;
2. Moagem do malte: expondo as enzimas e componentes internos. É desejável que parte da casca seja mantida intacta para auxiliar na filtragem após a mostura;
3. Mostura: o malte moído é misturado em água, e aquecida em temperaturas que estimulem a ação das enzimas obtidas na maltagem. As enzimas realizam a que-

bra de moléculas insolúveis de amido em moléculas menores de açúcares, que são dissolvidas, formando o mosto;

4. Lautering: separação do mosto do resto do malte que não foi dissolvido. As cascas dos grãos auxiliam essa etapa formando um filtro natural;
5. Fervura: o mosto é fervido por pelo menos uma hora, a ação enzimática é interrompida, a solução é esterilizada e lúpulos são adicionados em diferentes momentos da fervura, fornecendo extratos que conferem amargor, sabor e aroma à cerveja;
6. Fermentação: leveduras são adicionadas ao mosto após seu resfriamento e aeração. Os açúcares são consumidos pelo metabolismo das leveduras, gerando etanol e dióxido de carbono;
7. Maturação: após o consumo dos açúcares, as leveduras passam a reabsorver subprodutos da fermentação, melhorando a qualidade da bebida. As leveduras então floculam e decantam;
8. Envase: transferência para o recipiente final. Nessa etapa, também é realizada a carbonatação da bebida, geralmente por injeção de gás carbônico ou por meio de uma segunda fermentação, aproveitando-se as leveduras. Industrialmente, é comum a filtragem pré-envase, e a pasteurização pós- envase.

2.2.1 Fermentação e Maturação

Segundo descrito por White e Zainasheff (3), as primeiras produções de cervejas datam de milhares de anos atrás, sendo que na maior parte da história a fermentação de bebidas foi tida como um fenômeno divino, sem o conhecimento dos organismos microscópicos que a realiza. Estes só puderam ser observados em 1680 com o desenvolvimento e auxílio de microscópios. Ainda assim, apenas em 1789 a equação química da transformação de açúcares em álcool, dentre eles o etanol, e dióxido de carbono (CO_2) foi descrita por Lavoisier, e na segunda metade do século XIX, com as descobertas de Pasteur, passaram a ser melhor entendidas, com o surgimento da bioquímica como uma área de estudo própria.

Apesar da falta de conhecimento durante tantos anos, a fermentação é o processo que possui um dos maiores impactos no sabor, aroma, aparência e textura do produto. Sendo assim, o controle dessa etapa é essencial para garantir a qualidade final.

A fermentação, na produção de cervejas, é um processo metabólico realizado pelas leveduras adicionadas ao mosto com a finalidade principal de converter os açúcares extraídos dos grãos maltados no processo de brassagem em etanol. As leveduras, fungos unicelulares, realizam a fermentação como uma forma de respiração anaeróbia para obterem energia em meios desprovidos de oxigênio ou com grande excesso de açúcares disponíveis. Além da geração de etanol e gás carbônico, há diversos subprodutos, como ésteres, álcoois superiores e compostos sulfúricos que caracterizam o produto e definem sua qualidade final.

O processo de fermentação pode ser dividido em 3 fases:

1. Fase de retardamento, durante as primeiras quatro a 15 horas após a adição da levedura no mosto, caracterizada pela climatização das células ao ambiente e preparação para a próxima fase;
2. Fase de crescimento exponencial, que dura entre quatro horas e quatro dias, quando ocorre o consumo dos açúcares e replicação logarítmica das células de leveduras;
3. Fase estacionária, em que o crescimento diminui e alguns compostos são absorvidos pelas células, maturando o produto durante três a dez dias.

Para a obtenção de resultados consistentes em testes e na produção de cervejas, é essencial que a fermentação seja monitorada e controlada de forma que ocorra em condições ideais. As principais variáveis monitoradas no processo, em ordem de importância são: a temperatura, que impacta diretamente no grau de atividade celular das leveduras, assim como na produção e reabsorção de subprodutos da fermentação; a densidade relativa (specific gravity, em inglês) do mosto em fermentação, que indica a evolução do processo, uma vez que ao longo do processo a densidade diminui, em caminho a um valor final esperado; o pH da solução, importante para a saúde da levedura e indicativo de possíveis problemas; e a concentração de oxigênio e gás carbônico dissolvidos. Munroe (1) fornece um perfil de evolução de algumas dessas variáveis na fermentação de uma cerveja do tipo Lager (Figura 1):

2.3 Estado da Arte de Sistemas de Produção Artesanal

2.3.1 Análise de Soluções Existentes

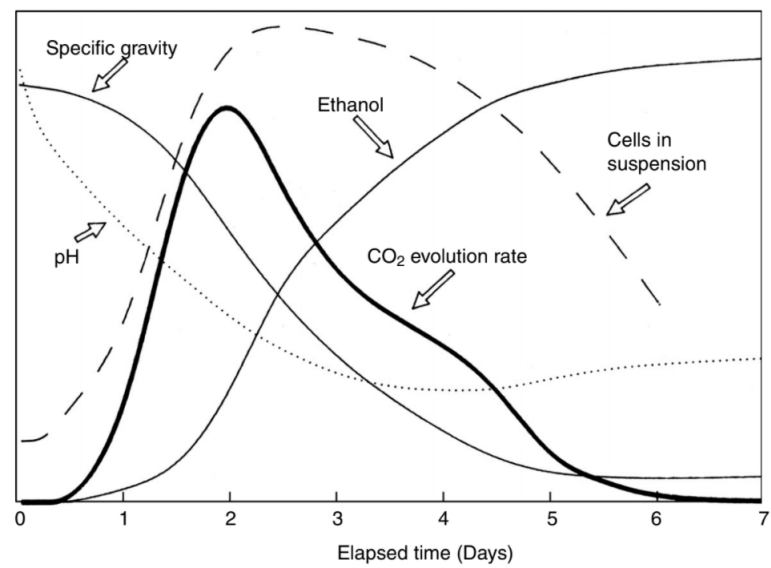


Figura 1: Gráfico de evolução de variáveis ao longo da fermentação - Munroe [1]

3 METODOLOGIA DO TRABALHO

A elaboração desse projeto segue metodologia típica de projetos de controle de processos, estudada na graduação, consistindo inicialmente de estudo sobre o processo a ser controlado e levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais necessários a se atingir o objetivo deste trabalho.

A partir dos requisitos, pretende-se seguir com o desenvolvimento seguindo uma metodologia de prototipagem guiada por iterações curtas com incremento de funcionalidades constante. Acreditamos que essa abordagem acelera a obtenção de resultados.

Para avaliar cada iteração do protótipo, o processo de produção de cervejas, incluindo a fermentação, será reproduzido por nós, em pequena escala. Acreditamos que essa abordagem prática aguça o conhecimento do processo e tem grande potencial em evidenciar erros no projeto.

4 PROJETO

4.1 Especificação de Requisitos Técnicos

O protótipo deve ser capaz de monitorar e controlar o processo de fermentação de cervejas, seguindo as configurações de receita definidas pelo usuário. Todas as informações coletadas devem ser disponibilizadas ao usuário com a finalidade de possibilitar maior entendimento e reprodutibilidade do processo. O projeto foi dividido em dois sistemas: um Hardware, encarregado das medições e controle, e um Software, responsável por exibir informações e estabelecer uma interface com o usuário. A partir dessas premissas, foram determinados os seguintes requisitos para cada um dos sistemas.

4.1.1 Sistema Hardware

4.1.1.1 Requisitos funcionais de Hardware

HW-F-1) O sistema deve monitorar a temperatura (entre 0 e 100 °C), com precisão de 0,5 °C e intervalo de 1 minuto.

HW-F-2) O sistema deve monitorar o pH em intervalo de 1 minuto.

HW-F-3) O sistema deve monitorar a densidade relativa (entre 1,000 e 1,150), com precisão de 0,001 em relação à água a 20°C e intervalo de 1 minuto.

HW-F-4) O sistema deve controlar a temperatura de até 50 Litros de mosto em fermentação, com desvio máximo de 0,5°C em relação ao valor definido pelo usuário e diferença máxima de 10°C em relação ao ambiente.

HW-F-5) O sistema deve seguir o perfil de controle (temperatura x tempo) definido pelo usuário no Software.

HW-F-6) Os dados monitorados devem ser enviados para o Software a cada 5 minutos por meio de rede sem fio.

4.1.1.2 Requisitos não funcionais de Hardware

HW-NF-1) O sistema deve ser acoplável a fermentadores de até 50 Litros disponíveis no mercado.

HW-NF-2) Em caso de perda de conexão com o Software, o sistema deve tentar enviar os dados ainda não enviados a cada ciclo de envio.

HW-NF-3) Caso o sistema tenha uma oscilação no fornecimento de energia, ele deve ser capaz de voltar ao funcionamento normal.

HW-NF-4) Os dados monitorados devem ser armazenados temporariamente, por no mínimo 15 dias, no Hardware.

4.1.2 Sistema Software

4.1.2.1 Requisitos funcionais de Software

SW-F-1) O sistema deve fornecer acesso ao usuário após identificação com usuário e senha

SW-F-2) O sistema deve fornecer as informações instantâneas das fermentações em progresso.

SW-F-3) O sistema deve permitir acesso às informações históricas de fermentações já realizadas.

SW-F-4) O sistema deve permitir o cadastro de receitas. Uma receita é definida por: identificação, nome, estilo e campo livre para observações. O campo livre pode evoluir para um cadastro padronizado dos ingredientes e processos realizados.

SW-F-5) O sistema deve permitir o cadastro de lotes. Um lote é definido por: identificação, receita utilizada, instante de início da fermentação, instante de fim da fermentação, variáveis personalizadas, perfil de controle e observação.

SW-F-6) O sistema deve permitir o cadastro de perfis de controle. Um perfil de controle é definido por: identificação, nome e temperatura alvo, instante (em relação ao início da fermentação).

SW-F-7) O sistema deve permitir o cadastro de variáveis personalizadas. Uma variável personalizada é definida por: identificador, lote correspondente, chave, valor e instante (em relação ao início da fermentação).

SW-F-8) O sistema deve disponibilizar, para cada lote um gráfico com a evolução de cada variável monitorada ao longo do tempo de fermentação.

SW-F-9) Os dados recebidos pelo Hardware devem ser salvos em banco de dados

SW-F-10) Em caso de perda de conexão com o Hardware, o usuário deve ser notificado por e-mail.

SW-F-11) O sistema deve permitir que o usuário realize o download de seus dados em formato de planilha.

SW-F-12) O sistema deve permitir que o usuário registre seus dispositivos.

4.1.2.2 Requisitos não funcionais de Software

SW-NF-1) As informações de cada usuário são, por padrão, particulares de cada usuário e devem seguir padrões de segurança.

SW-NF-2) As informações instantâneas devem estar disponíveis em até 1 minuto após o recebimento dos dados pelo HW.

SW-NF-3) O sistema deve ser desenvolvido na forma de Web-App, e ser responsivo a dispositivos mobile e computadores.

4.2 Projeto de Controle

4.2.1 Modelagem Térmica do Sistema

O primeiro passo para a implementação do controle de temperatura da fermentação é a modelagem térmica do processo. Nota-se que essa modelagem é bastante complexa pois envolve diversos coeficientes térmicos desconhecidos, devido a composição heterogênea do Mosto com Leveduras.

A fermentação ocorre na maior parte das receitas em temperaturas de 14°C até 20°C, temperaturas muitas vezes inferiores à temperatura do ambiente. Sendo assim, existe a necessidade de criar um sistema que troque calor com o mosto e leveduras mantendo um gradiente de temperatura entre o fermentador e o ambiente constante conforme configuração do usuário.

Para isso acontecer durante o processo, o calor retirado pela refrigeração deve ser o mesmo que o gerado pela convecção com o ambiente e pelo próprio processo de fer-

mentação, que é exotérmico.

É possível dividir essa modelagem em três partes:

1. Determinação da quantidade de calor trocada pelo fermentador e o ambiente.
2. Determinação da quantidade de calor ganha no processo de fermentação.
3. Projeto e modelagem do dispositivo de troca de calor.

É importante destacar que o dispositivo irá ter duas funções: a primeira será manter a temperatura do líquido fermentado; a segunda será levar o líquido até determinada temperatura. Ambas as funcionalidades envolvem a capacidade do dispositivo de retirar ou fornecer calor do sistema de forma eficiente e constante.

4.2.2 Transferência de Calor entre Ar e Fermentador

Nessa modelagem, serão analisados os seguintes elementos:

- Mosto e Leveduras
- Tanque de Fermentação
- Manta Térmica

Nessa dinâmica, considerando que o fermentador vai operar na maior parte do tempo em temperaturas inferiores às do ambiente, o calor vai fazer o seguinte caminho:

$$\text{Ambiente} \longrightarrow \text{Manta térmica} \longrightarrow \text{Fermentador} \longrightarrow \text{Mosto e leveduras}$$

Sendo assim, é possível obter o calor ganho por convecção para cada 1°C de diferença de temperatura entre o fermentador e o ambiente

Algumas hipóteses foram adotadas visando simplificar o problema:

1. O gradiente de temperatura no interior do Mosto + Leveduras é desprezível;
2. O coeficiente de troca de calor por convecção entre o Mosto + leveduras e o tanque é elevado o bastante para que não sejam observadas diferenças de temperatura entre esses elementos;

3. O regime é permanente e as propriedades são constantes
4. A condução é unidimensional no plano X
5. A transferência de calor por radiação é desprezível nas superfícies
6. Resistências de contato desprezíveis.

As hipóteses 1, 2, 3 podem ser adotadas devido ao horizonte de tempo da fermentação, no qual é necessário manter a mesma temperatura durante dias. As hipóteses 4, 5 e 6 foram adotadas com a intenção de simplificar o problema. A figura 2 exemplifica esse problema e a figura 3 demonstra o circuito elétrico equivalente, cuja legenda se encontra na tabela 1.

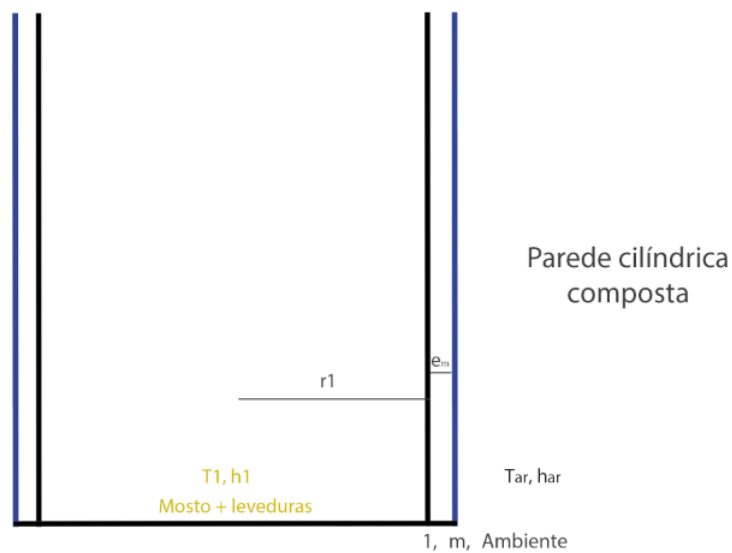


Figura 2: Desenho do problema de troca de calor entre o ambiente e fermentador

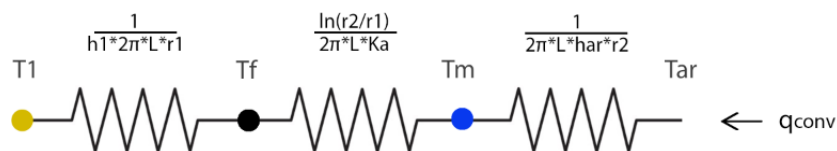


Figura 3: Circuito elétrico equivalente ao problema de troca de calor entre ambiente e fermentador

Sendo:

Variável	Descrição
r_1	raio do fermentador
e_m	espessura da manta
r_2	em + r1
T_1	temperatura desejada para a fermentação,
T_{ar}	temperatura ambiente
L	Altura do fermentador
h_1	coeficiente de transferência térmica do Mosto + Leveduras
h_{ar}	coeficiente de transferência térmica do ar
K_a	Condutividade térmica da manta
q_{conv}	quantidade de calor perdida por convecção (J/kg)

Tabela 1: Descrição das variáveis do circuito elétrico equivalente da figura 3.

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_{12}} \quad (4.1)$$

A equação 4.2 define a quantidade de calor recebida pelo mosto e leveduras devido a convecção natural:

$$q_{conv} = (T_{ar} - T_1) \cdot (2\pi L) \cdot \left(\frac{h_1 \cdot h_{ar} \cdot K_a \cdot r_2 \cdot r_1}{k_a \cdot h_{ar} \cdot r_2 + \ln(r_2/r_1) \cdot h_1 \cdot h_{ar} \cdot r_2 \cdot r_1 + h_1 \cdot k_a \cdot r_1} \right) \quad (4.2)$$

4.2.3 Geração de Calor na Fermentação

O processo de fermentação é exotérmico, logo existe a produção de calor. Segundo Munroe (1), é estimada a produção de 585,76 kJ por Kg de mosto. Como a maior parte do calor é gerado durante a fase de crescimento exponencial da fermentação, que acontece durante os 4 primeiros dias, iremos estimar que ocorre a troca de $587,76 \cdot 10^3 / (4 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60)W = 1,7W$ por kg de mosto durante os 4 primeiros dias de fermentação.

4.2.4 Dispositivo para Troca de Calor

Um dos maiores desafios do projeto é criar um sistema que consiga trocar calor de forma eficiente, não seja intrusivo e consiga ser simples o suficiente para ser utilizado por um hobbysta. Conforme anteriormente especificado, a ideia é utilizar placas de peltier para realizar essa troca. A maior vantagem do uso dessas placas é a possibilidade de controlar o calor associado proporcionalmente a quantidade de corrente fornecida ao módulo, através da seguinte equação 4.3.

$$Q_P = \pi \cdot 1 \quad (4.3)$$

Possibilitando assim o uso de um circuito junto com o microcontrolador para o controle de temperatura. O sistema será composto por um dissipador de calor e um dissipador de calor e uma ventoinha na face quente (figura 4). Dessa forma podemos otimizar a expulsão de calor do dispositivo. E uma haste de cobre (figura 5) ligado no lado frio, o metal é considerado um bom condutor térmico e servirá como condutor de calor entre a o fermentador e o módulo de Peltier. Essa abordagem foi inspirada no aparelho homebrew citado anteriormente.



Figura 4: Dissipador de calor e ventoinha, modelo utilizado em CPU.



Figura 5: Haste de cobre.

4.3 Projeto de Hardware

Com base nos requisitos, foram determinados os principais componentes do projeto para o controle e monitoramento do sistema

4.3.1 Microcontrolador

O microcontrolador Arduino Uno R3 é versátil e ideal para a prototipagem e será utilizado como microcontrolador do projeto. O mesmo possui portas i/o analógicas e digitais, fontes de alimentação de 3,3V/5V e é programado na linguagem C.

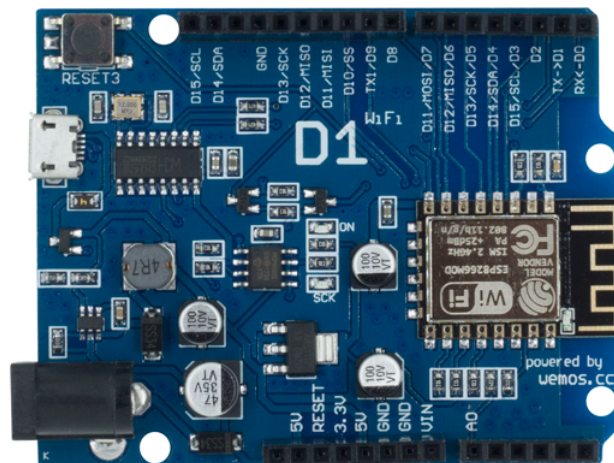


Figura 6: Wemos D1

4.3.2 Critérios de Escolha dos Sensores

A definição dos sensores a serem utilizados se baseou nos seguintes critérios, em ordem de importância:

- Faixa de operação compatível com os requisitos e especificidades do sistema
- Disponibilidade no mercado brasileiro
- Compatibilidade com o Arduino
- Custo de aquisição

O primeiro critério é trivial, e deve ser eliminatório em qualquer avaliação. O critério de disponibilidade no mercado brasileiro teve essa classificação pelo desejo de se adquirir e trabalhar com os sensores o mais rápido possível e mitigar o risco com atrasos devido

a importações e falta de estoque. A compatibilidade com o Arduino exprime quão diretamente um sensor pode ser utilizado, principalmente em relação a alimentação, sendo preferíveis sensores que tenham tensões de entrada em comum com o microcontrolador, i.e., 3,3 ou 5V. Finalmente, custos de aquisição menores são preferíveis.

4.3.3 Sensor de Temperatura

Para a medição de temperatura o sensor escolhido foi o circuito integrado DS18B20 (Figura 7) com uma vedação impermeável. É um sensor que atende as especificações e é amplamente utilizado em conjunto com o Arduino e microcontroladores semelhantes, e possui alta disponibilidade no mercado a um baixo custo, sendo comercializado em uma versão impermeável, muita prática para esse projeto. A leitura da temperatura pelo microcontrolador é realizada por apenas um fio de dados, utilizando a interface One-Wire.

Ficha técnica:

- Tensão de operação: 3-5,5V
- Faixa de medição: -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$
- Precisão: $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ entre -10°C e $+85^{\circ}\text{C}$
- Ponta de aço inoxidável

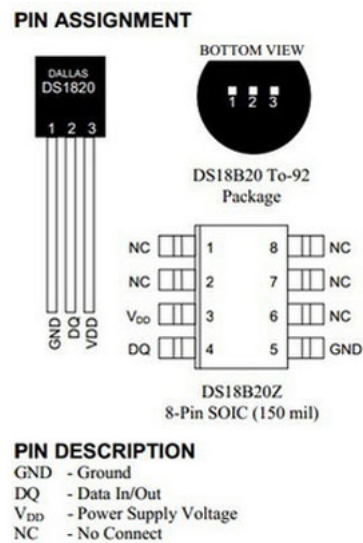


Figura 7: Sensor DS18B20

4.3.4 Sensor de Densidade Relativa

A medição da densidade relativa é menos trivial pela ausência de sensores completos comercializados a baixo custo. Quando não é automatizada, a medição é comumente realizada com auxílio de um densímetro ou um refratômetro, que medem a densidade relativa e a concentração de açúcar dissolvido em graus Brix, respectivamente. Ambas as ferramentas requerem interação humana e a extração de uma pequena amostra da solução, aproximadamente 100 a 250ml e algumas gotas, respectivamente.

Quanto a medição automática e contínua da densidade relativa, Boulton e Quain [4] apresentam algumas formas de medir a grandeza, destacam-se: a utilização de sensores de pressão posicionados em diferentes alturas do fermentador, e computando a diferença de pressões medidas; e utilizando um sensor ultrassônico, medindo o tempo que um pulso leva para ser transmitido entre dois pontos fixos, entremeado pela solução.

Em pesquisa por soluções existentes no mercado, a abordagem de dois produtos são dignas de consideração: o Beer Bug utiliza uma célula de carga para medir o empuxo sofrido por um peso submerso na solução, e o Plaato, que utiliza a medição do gás carbônico expelido durante a fermentação para calcular indiretamente a densidade relativa.

Dentre as opções listadas, a medição por diferença de pressões e empuxo foram selecionadas para serem adotadas em primeiro momento no projeto, com prioridade da primeira. Essas são as soluções que aparentam apresentar menor complexidade na medição e maior facilidade na calibração para obtenção de resultados consistentes.

As opções listadas são discutidas a seguir, contemplando as especificações necessárias para cada sensor, e os modelos escolhidos para utilização no projeto.

4.3.4.1 Medição por diferença de pressão

Esse método se baseia no conceito de pressão estática $P_{estatica}$, que é pode ser calculada para um determinado ponto em um fluido como o produto da densidade ρ desse fluido, da aceleração gravitacional g , e da altura h da coluna de líquido sobre o ponto escolhido.

$$P_{estatica} = \rho \cdot g \cdot h \quad (4.4)$$

Consequentemente, considerando a densidade homogênea e a variação da aceleração gravitacional desprezível, a diferença de pressão entre dois pontos em diferentes alturas desse fluido, é:

	N/m ² ou Pa	bar	psi
Valor Mínimo	1957,805	0,019578	0,284
Valor Máximo	2251,476	0,022515	0,327

Tabela 2: Diferenças de pressão esperadas para cálculo da densidade relativa durante a fermentação.

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (4.5)$$

Dessa forma, mantendo a diferença de alturas Δh fixa e conhecida, é simples inferir o valor da densidade a partir da medida da diferença de pressão medida pelo sensor.

Seguindo a especificação do requisito HW-F-3, o sistema deve ser capaz de medir densidades relativas de 1,000 e 1,150, em relação à água a 20 °C, o que corresponde a uma faixa entre 998,203 e 1147,933 kg/m³. Considerando a aceleração gravitacional 9.807 m/s² e uma distância de 20 cm entre os dois pontos medidos (o que é razoável para fermentadores pequenos, até 50L), a faixa de operação do sensor de diferencial de pressão deve ser, em diferentes unidades comerciais:

Para obter a precisão de 1 milésimo de densidade relativa, o sensor necessita de uma precisão de aproximadamente 0,1%.

A partir das especificações, foram buscados os sensores disponíveis no mercado, principalmente os produzidos pela Mouser Electronics (<https://br.mouser.com/>). Seguindo os critérios definidos, o modelo escolhido foi o MPXV7002DP (Figura 8), que possui as seguintes especificações:

- Faixa de medição: -0.3 a +0.3 psi
- Precisão: 2,5%
- Tensão de alimentação: 5V

Apesar do sensor não apresentar uma precisão adequada, acreditamos que o uso da média de diversas medidas e calibração com algumas medidas feitas pelo usuário podem propiciar resultados satisfatórios.

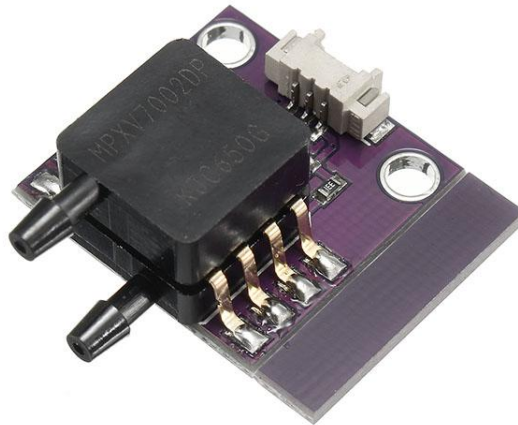


Figura 8: Sensor de diferença de pressão MPXV7002DP

4.3.4.2 Medição por Empuxo

O empuxo hidrostático E sofrido por um corpo submerso em um fluido é expresso pelo produto entre a densidade ρ_f do fluido, o volume submerso V_f do corpo, e da aceleração da gravidade g :

$$E = \rho_f \cdot V_f \cdot g \quad (4.6)$$

Naturalmente, o corpo também sofre ação da força gravitacional P , que é definida pelo produto da massa m do corpo pela aceleração gravitacional g :

$$P = mg \quad (4.7)$$

As duas forças atuam em sentidos opostos (como ilustrado na figura a seguir), de forma que, utilizando uma célula de carga conectada por meio de um fio a um corpo, é possível notar uma diferença no “peso natural” do objeto submerso, que é igual a força resultante entre a força gravitacional e o empuxo. Esse é o conceito de uma balança hidrostática.

Considerando um corpo de massa 250g e volume de 125cm³ arbitrários, e a variação de densidade especificada, uma célula de carga adequada para o projeto deve ser capaz de medir massas entre 112,75 e 125,22g, com precisão mínima de aproximadamente 0,125g. Nota-se que é desejável um corpo mais denso que o fluido para que ele fique completamente

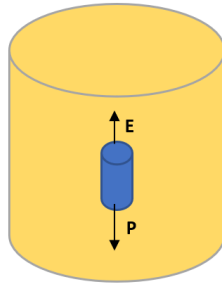


Figura 9: Representação de um corpo (azul) submerso em um fluido (amarelo) e das forças gravitacional e de empuxo

submerso, facilitando aplicação da relação do empuxo. O sensor ZHIPU-200g (Figura 10) foi escolhido, medindo entre 0 a 200g, com precisão de 0,1g.



Figura 10: Sensor de carga ZHIPU-200g

4.3.5 Sensor de pH

Para a medição de pH o sensor escolhido foi o E-201-C (Figura 11) com uma placa condicionadora que permite interface direta com o microcontrolador. Assim como o DS18B20, é um sensor amplamente utilizado em conjunto com o Arduino e facilmente encontrado no mercado nacional. A comunicação com o microcontrolador é realizada por comunicação serial, utilizando os protocolos UART ou I2C.

Ficha técnica:

- Tensão de operação: 5V;
- Temperatura de operação: 0°C a 60°C;
- Tempo de resposta: 5s;
- Tempo de sedimentação: 60s;

- Faixa de medição: pH de 0 a 14



Figura 11: Sensor de pH E-201-C

4.3.6 Atuador de Temperatura

Para a montagem do nosso dispositivo que realiza trocas de calor com o fermentador, as células termoelétricas de Peltier se mostraram uma boa opção. Elas são versáteis, possuem a capacidade de esfriar ou aquecer o fermentador dependendo do sentido da corrente aplicada em seus terminais e fornecem calor proporcionalmente a corrente fornecida ao sistema.

A célula é constituída por duas chapas de material isolante com um material condutor entre elas, como é esquematizado na Figura 12. Quando uma diferença de tensão é aplicada entre os terminais da célula, o movimento dos semicondutores de tipo “n” e “p” transforma a energia elétrica em energia térmica, criando um fluxo de calor que aquece uma célula e esfria outra. Em um semicondutor do tipo-n, o calor é absorvido próximo ao terminal negativo e rejeitado próximo ao terminal positivo, já em um semicondutor do tipo-p o processo se dá de maneira inversa. Como os pares tipo “n” e “p” tem características diferentes, é possível alterar o fluxo de calor dependendo do sentido da corrente.



Figura 12: Esquema de uma célula de Peltier

Um exemplo de aplicação comercial das células de Peltier para controle da temperatura de fermentação, pode ser observada no produto desenvolvido pela Brew Jacket, que consiste em uma célula de Peltier conectada em lado a uma haste de transferência de calor, que fica em contato com a solução, e ao outro lado, a um dissipador de calor e ventoinha, que ficam externos ao fermentador. O produto recomenda a utilização de uma capa térmica sobre o fermentador para aumentar a eficiência do controle de temperatura.

Uma alternativa, ainda se utilizando a célula de peltier, é realizar a troca de calor com a solução pela parede do fermentador, de forma menos invasiva e com menores riscos de contaminação, mas gerando uma dependência maior à geometria e material do fermentador. Opções a serem estudadas nesta alternativa são a utilização das células em contato próximo à parede do fermentador; e a construção de um pequeno sistema que utilize um líquido circulando por serpentinas em torno ao fermentador, com as células controlando a temperatura do líquido.

4.4 Projeto de Software

A partir dos Requisitos Técnicos levantados, foi realizado o projeto de software. O projeto se iniciou com a definição de casos de uso a serem implementados, de forma a satisfazer os requisitos técnicos, em conjunto o diagrama de casos de uso definido pela UML foi elaborado para prover apresentação visual. Em seguida, as informações que devem ser armazenadas pelo sistema foram levantadas e a relação entre elas foi estabelecida, sendo representada no diagrama de entidade-relacionamento. O passo seguinte foi a definição da arquitetura de software do sistema.

No projeto a arquitetura de microsserviços foi escolhida como padrão para o sistema. Essa arquitetura define padrões de modularização do sistema em componentes pequenos e altamente especializados, conferindo facilidades de manutenção e escalabilidade em contraste com a arquitetura de monólito. Em contrapartida, o sistema é mais complexo de se implementar e implantar, devido a separação dos módulos, contudo, considerando o desejo de continuar este projeto após a entrega e os padrões de mercado atuais a abordagem de microsserviços é considerada a mais adequada.

Definida a arquitetura, cada módulo do sistema foi especificado e foi elaborado o diagrama de componentes, definido pela UML, para ilustrar os pontos de comunicação e componentização da solução completa. Nessa etapa foram definidas as tecnologias a serem empregadas em cada módulo, a justificativa das escolhas é apresentada após o

detalhamento dos componentes da arquitetura de software. O projeto de implantação foi então realizado, com planejamento da disponibilização do sistema de software com ferramentas de computação de nuvem disponíveis no mercado.

4.4.1 Especificação dos Casos de Uso

Na definição dos casos de uso do projeto foram definidos dois atores que interagem com o sistema de software a ser desenvolvido, identificados como usuário e dispositivo. O usuário representa o utilizador humano do sistema a ser desenvolvido, responsável por todas as interações humanas necessárias.

O usuário se comunica com o sistema por duas interfaces, uma aplicação web, que se comunica diretamente com o sistema, e um aplicativo para smartphone, necessário para configurações iniciais do dispositivo. O dispositivo representa o sistema hardware de controle e monitoramento, também desenvolvido neste projeto. Em relação ao sistema de software, ele é tratado como um ator com suas devidas interações; seu projeto e especificações são discutidos na seção destinado ao projeto de hardware.

Segue a especificação dos casos de uso em si, contendo a identificação de cada caso de uso, sua breve descrição, enumeração dos passos que o definem e listagem dos requisitos técnicos relacionados ao caso de uso. Com caráter ilustrativo, o Diagrama de Casos de Uso da UML é apresentado na figura 13.

UC - 1: Registro de Dispositivo

Descrição: ao obter um novo dispositivo, o usuário deve configurar seu acesso à rede Wi-Fi e registrá-lo, de modo que o sistema reconheça que aquele dispositivo pertence ao usuário.

1. Usuário acessa aplicativo em seu smartphone
2. Sistema autentica acesso do usuário
3. Aplicativo se conecta ao dispositivo
4. Usuário informa configurações da rede Wi-Fi
5. Aplicativo envia informações da rede para dispositivo
6. Dispositivo se conecta na rede e se prepara para receber mensagens do sistema

7. Aplicativo envia informações do dispositivo para o sistema
8. Sistema cadastra informações do dispositivo e usuário

Requisito relacionado: SW-F-12

UC - 2: Cadastro de Receitas

Descrição: fluxo de cadastro de receitas.

1. Usuário acessa tela de listagem de receitas
2. Sistema exibe todas as receitas referentes ao usuário
3. Usuário seleciona opção “Criar Receita” e acessa tela de cadastro de receita
4. Usuário informa nome, estilo e observações da receita e clica em “Salvar”
5. Sistema cadastra a receita no banco de dados

Requisito relacionado: SW-F-4

UC - 3: Cadastro de Lotes

Descrição: fluxo de cadastro de lotes, perfis de controle e associação de lote a um dispositivo.

1. Usuário acessa tela de listagens de receitas
2. Sistema exibe todas as receitas referentes ao usuário
3. Usuário escolhe uma receita e seleciona a opção “Criar Lote”, e acessa a tela de cadastro de lote
4. Sistema carrega listagem de perfis de controle já cadastrados e dispositivos do usuário
5. Usuário informa identificação e observações do lote
6. Usuário escolhe um perfil de controle já existente ou cria um novo perfil, informando uma identificação e cada um dos passos de controle (instante e valor alvo de temperatura)

7. Usuário seleciona qual dispositivo irá controlar a produção do lote
8. Usuário clica em “Salvar”
9. Sistema cadastra lote, perfil de controle (caso novo), associação de lote e perfil de controle, e associação de lote e dispositivo
10. Sistema envia informações do lote para dispositivo selecionado

Requisitos relacionados: SW-F-5 e SW-F-6.

UC - 4: Envio das informações do Lote para Dispositivo

Descrição: fluxo de envio das informações do lote para o dispositivo associado ao controle daquele lote.

1. Dispositivo recebe informações do lote que foi associado por tópico de mensagens
2. Dispositivo salva informações localmente
3. Quando pronto, dispositivo inicia rotina de monitoramento e controle

Requisito relacionado: HW-F-5

UC - 5: Envio das informações do Dispositivo para o Sistema

Descrição: fluxo de envio das informações obtidas pelo monitoramento do processo pelo dispositivo para o sistema.

1. Dispositivo envia dados coletados para o sistema
2. Sistema processa dados e salva informações no banco de dados

Requisitos relacionados: HW-F-6, SW-F-9

UC - 6: Visualização das Informações dos Lotes

Descrição: fluxo para visualização das informações gerais e de evolução dos lotes correntes e passados

1. Usuário acessa tela de listagem dos lotes

2. Sistema exibe todas os lotes referentes ao usuário
3. Usuário escolhe um lote e seleciona a opção “Ver Informações”, acessando a tela de informações do lote
4. Sistema exibe informações gerais sobre o lote, como identificação, receita, observações, status, data de início, data de término, densidades relativas inicial e final/atual, estimativa de teor alcoólico, pH final/atual, temperatura final/atual.
5. Sistema exibe um gráfico com as variáveis monitoradas em relação ao tempo
6. Caso usuário clique em “Baixar Dados”, sistema efetua o download dos dados do gráfico em arquivo de texto

Requisitos relacionados: SW-F-2, SW-F-3, SW-F-8, SW-F-11

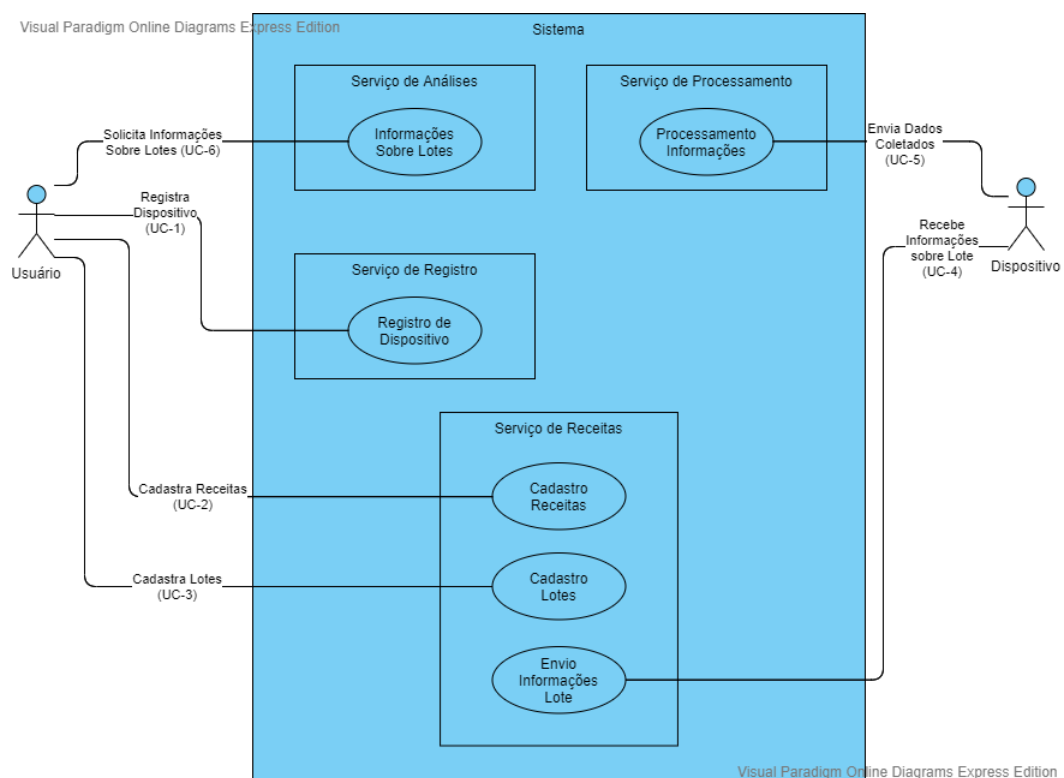


Figura 13: Diagrama de Casos de Uso.

4.4.2 Modelo de Entidade-Relacionamento

O Modelo Entidade Relacionamento descreve como as informações são organizada no sistema e como o banco de dados do sistema é estruturado. Cada entidade no modelo

representa um tipo de informação que é produzida e consumida pelo sistema, na execução dos casos de uso.

Todas as informações são armazenadas em um banco de dados relacional, dividido em schemas que atuam como partições de dados em diferentes domínios. Foram definidos três domínios, traduzidos em schemas no banco de dados, para os dados: user, receita e control. O schema user contém as informações referentes aos usuários e dispositivos do sistema; o domínio receita contempla as entidades relacionadas às receitas e lotes de produção, assim como os dados coletados em cada execução de uma receita; e o schema control, por fim, os perfis de controle que são seguidos pelo dispositivo durante seu funcionamento. A separação das entidades em domínios é importante na arquitetura de microsserviços para assegurar que cada serviço tenha controle apenas às informações de sua competência.

A definição das entidades e seus relacionamentos é ilustrada pelo Diagrama Entidade Relacionamento da figura 20, com destaque em cor para cada um dos schemas determinados.

4.4.3 Arquitetura de Software

A arquitetura de software do projeto foi estruturada tendo como base o fluxo da informação como especificado nos casos de uso e os conceitos de arquitetura de microsserviços. Dessa forma, foram definidas quatro camadas para organizar os sistemas a serem implementados: Camada de Interface, contemplando as interfaces utilizadas diretamente pelos atores; Camada Intermediária, contendo um API Gateway para isolar os microsserviços das interfaces e um message broker para intermediar a comunicação entre dispositivo e sistema; Camada de Negócio, contendo os microsserviços que exercem as regras de negócio do sistema; e Camada de Persistência, com os serviços de armazenamento de dados. Os componentes de cada camada são descritos em detalhes quanto a suas responsabilidades e detalhes de implementação em sequência. A arquitetura completa é representada visualmente pelo Diagrama de Componentes da figura 21.

4.4.3.1 Camada de Interface

A Camada de Interface (figura 14) contém os componentes que fornecem interface direta aos atores definidos na modelagem de casos de uso. Sua função, portanto, reside na interação com os atores e comunicação de suas ações para a próxima camada, a Camada Intermediária. São três componentes de interface que compõe essa camada: Aplicação Front-end, Aplicação Mobile e o Software Embarcado no dispositivo.

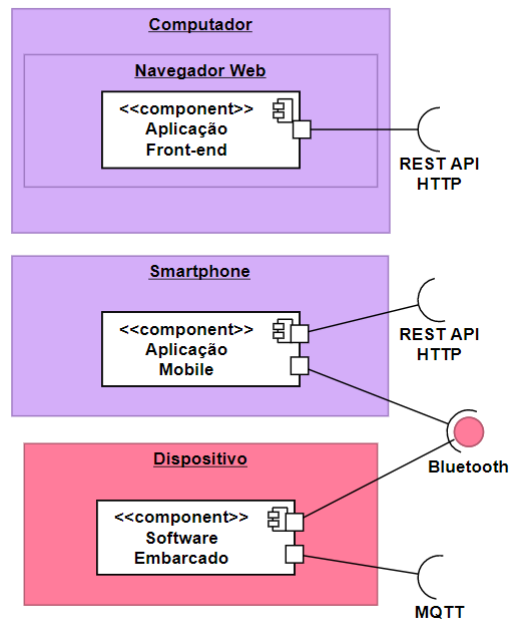


Figura 14: Camada de Interface.

A Aplicação Front-end é executada pelo navegador web do usuário do sistema, e permite que ele realize o cadastro e gerenciamento de todas as informações referentes ao sistema, como receitas, perfis de controle e lotes, ela também permite que o usuário visualize os dados gerados pelo dispositivo em formato de gráficos e tabelas. Essa aplicação contém o componente gráfico das telas que o usuário utilizará e algumas regras de validação simples, como campos obrigatórios de cadastro. As ações do usuário são traduzidas em requisições HTTP que são enviadas para o Serviço de API Gateway, na próxima camada.

A Aplicação Mobile foi a solução encontrada para intermediar a comunicação entre usuário e dispositivo, suas principais funções são: enviar as informações necessárias para conexão à rede Wi-Fi do usuário, que é realizado pela tecnologia de bluetooth, e informar o sistema que aquele dispositivo foi ativado por determinado usuário. Após essa configuração, o usuário poderá associar um lote de uma receita para o dispositivo monitorar e controlar, e o dispositivo deve estar pronto para se comunicar com o sistema por meio de mensagens.

O Software Embarcado no dispositivo, além das funcionalidades de monitoramento e controle, que são detalhadas nas seções de Modelagem de Controle e Projeto de Hardware, deve ser capaz de se comunicar via tecnologia bluetooth com a Aplicação Mobile, e enviar e receber mensagens via protocolo MQTT com o Message Broker da Camada Intermediária. O dispositivo deve enviar mensagens com os dados que estão sendo coletados durante a

fermentação, como temperatura, densidade relativa e pH, e receber informações sobre um novo lote que foi alocado para ele realizar o controle.

4.4.3.2 Camada Intermediária

Toda a comunicação entre os atores e o sistema é realizada por mediação da Camada Intermediária (figura 15). O tráfego pode ocorrer pelos protocolos HTTP ou MQTT. O fluxo por HTTP é mediado pelo Serviço de API Gateway, que roteia as requisições externas para os devidos microsserviços, enquanto que o fluxo MQTT, composto por mensagens, é controlado pelo Message Broker, que organiza as mensagens nos fluxos dispositivo para sistema e sistema para dispositivo.

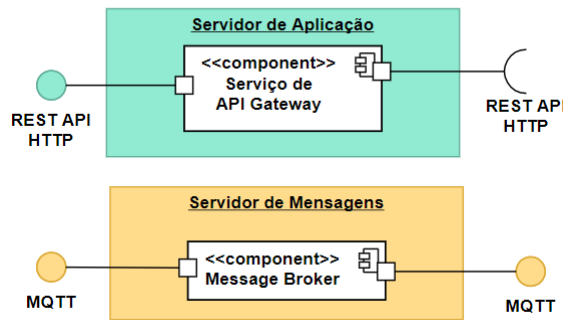


Figura 15: Camada Intermediária.

O Serviço de API Gateway funciona como um serviço de proxy reverso que, além centralizar as solicitações do usuário, consolida o resultado de cada microsserviço necessário para atender uma demanda. Apesar de ser um serviço muito simples, ele é importante por questões de segurança, uma vez que apenas um endereço fica exposto externamente e a autenticação externa é centralizada nele, e também por questões de escala futura, sendo mais fácil implantar um balanceador de carga ou sistema de fila de processamento com essa separação de serviços, caso seja necessário no futuro.

O Message Broker é simplesmente um corretor de mensagens, que opera sobre o protocolo MQTT, e é responsável pelo recebimento, entrega e armazenamento das mensagens que trafegam no sistema. O protocolo MQTT foi escolhido por ser extremamente leve e desenvolvido especialmente para o uso em Internet das Coisas.

4.4.3.3 Camada de Negócio

Os microserviços do sistema, que aplicam as regras de negócios, estão presentes na Camada de Negócio. Os componentes dessa camada são responsáveis pela validação de consistência das informações, interação com o banco de dados na Camada de Persistência através da interface ODBC, e processamento dos dados coletados pelo dispositivo. Cada microserviço que compõe essa camada é especializado e responsável por uma quantidade restrita de entidades, prezando-se pelo baixo acoplamento do sistema. Simplificando a implantação do sistema, alguns serviços foram agrupados em um mesmo servidor, mediante sua afinidade em relação às informações em que se especializa.

O Servidor de Registro (figura 16) comporta os Serviços de Usuários e de Dispositivos, que são responsáveis pelo cadastro, recuperação, atualização e deleção (CRUD, em inglês) dos registros de usuários e registros, respectivamente. Além disso, o Serviço de Usuários controla a associação entre um usuário e seus dispositivos.

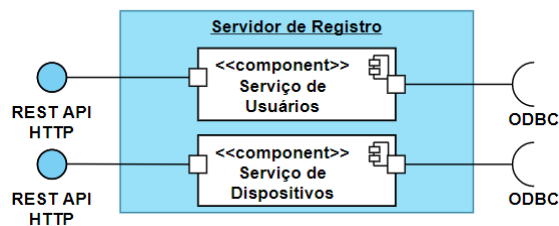


Figura 16: Camada de Negócio - Servidor de Registros.

Os Serviços de Controle, Receitas e Lotes também exercem a responsabilidade sobre o CRUD de perfis de controle, receitas e lotes, respectivamente, e foram agrupados no Servidor de Receitas (figura 17). O Serviço de Lotes também realiza a associação de um lote com o dispositivo e envia todas as informações necessárias para o controle do lote da receita para o dispositivo que foi associado, essa comunicação é realizada por meio de mensagens sob o protocolo MQTT, que serão consumidas pelo dispositivo conectado à Internet.

A figura 18 ilustra os demais serviços da Camada de Negócios. O Serviço de Análises empenha função analítica sobre os dados coletados que foram consolidados, fornecendo relatórios de desempenho para o usuário, além de dados para serem exibidos na Aplicação Web. O Serviço de Processamento, ou Processador, acessa os dados enviados pelo dispositivos ao Message Broker e aplica as transformações necessários para consolidar as informações no banco de dados. Adicionalmente, um Serviço de Autenticação foi incluído para atender às necessidades de segurança dos dados e controle de acesso ao sistema.

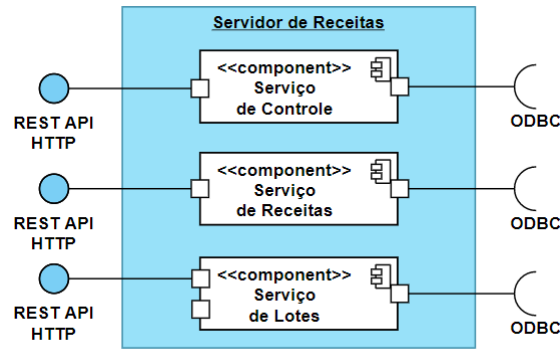


Figura 17: Camada de Negócio - Servidor de Receitas.

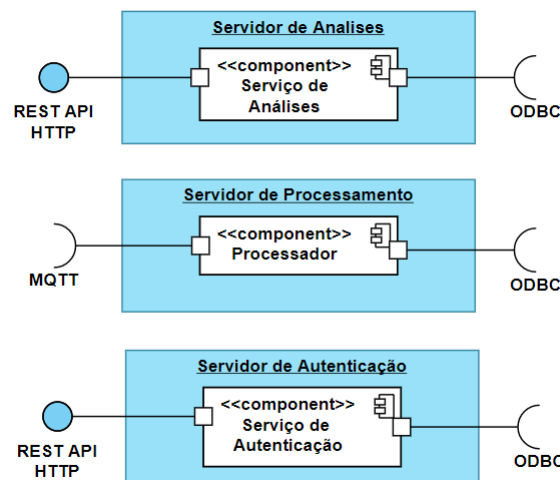


Figura 18: Camada de Negócio - Servidores de Análises, Processamento e Autenticação.

4.4.3.4 Camada de Persistência

A Camada de Persistência (figura 19) abriga os serviços de armazenamento de dados necessários ao sistema. Neste projeto, está previsto apenas um servidor de banco de dados relacional, discutido em maior detalhe na Modelagem de Entidade-Relacionamento.

4.4.4 Definição de Tecnologias

As tecnologias a serem utilizadas na implementação e implantação deste projeto foram definidas levando em consideração sua adequação e familiaridade dos autores. Dessa forma, foi determinada a utilização da linguagem de programação Python para implementar os microsserviços e as lógicas necessárias no API Gateway. Utilizando o Python, é possível prover de forma simples e com poucos recursos uma API REST utilizando o framework Flask executado com o servidor Gunicorn. A segurança da aplicação segue

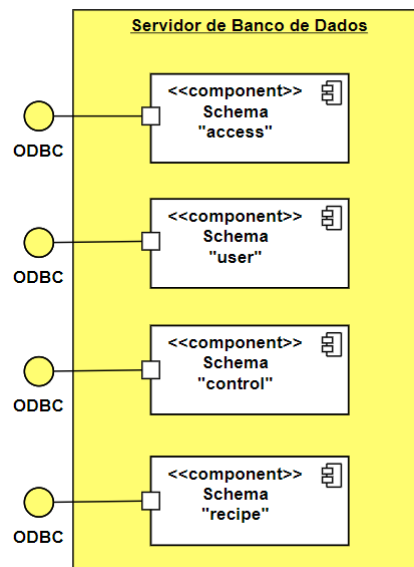


Figura 19: Camada de Persistência.

padrão OAuth 2.0 implementado pela biblioteca oauthlib.

Definiu-se a utilização da biblioteca React da linguagem JavaScript para desenvolvimento da interface da Aplicação Web, utilizando também a biblioteca chart.js para construção de gráficos. Para a interface do Aplicativo Mobile foi definida a linguagem Java, para utilização em smartphones Android. O banco de dados relacional escolhido foi o PostgreSQL.

4.4.5 Projeto de Implantação

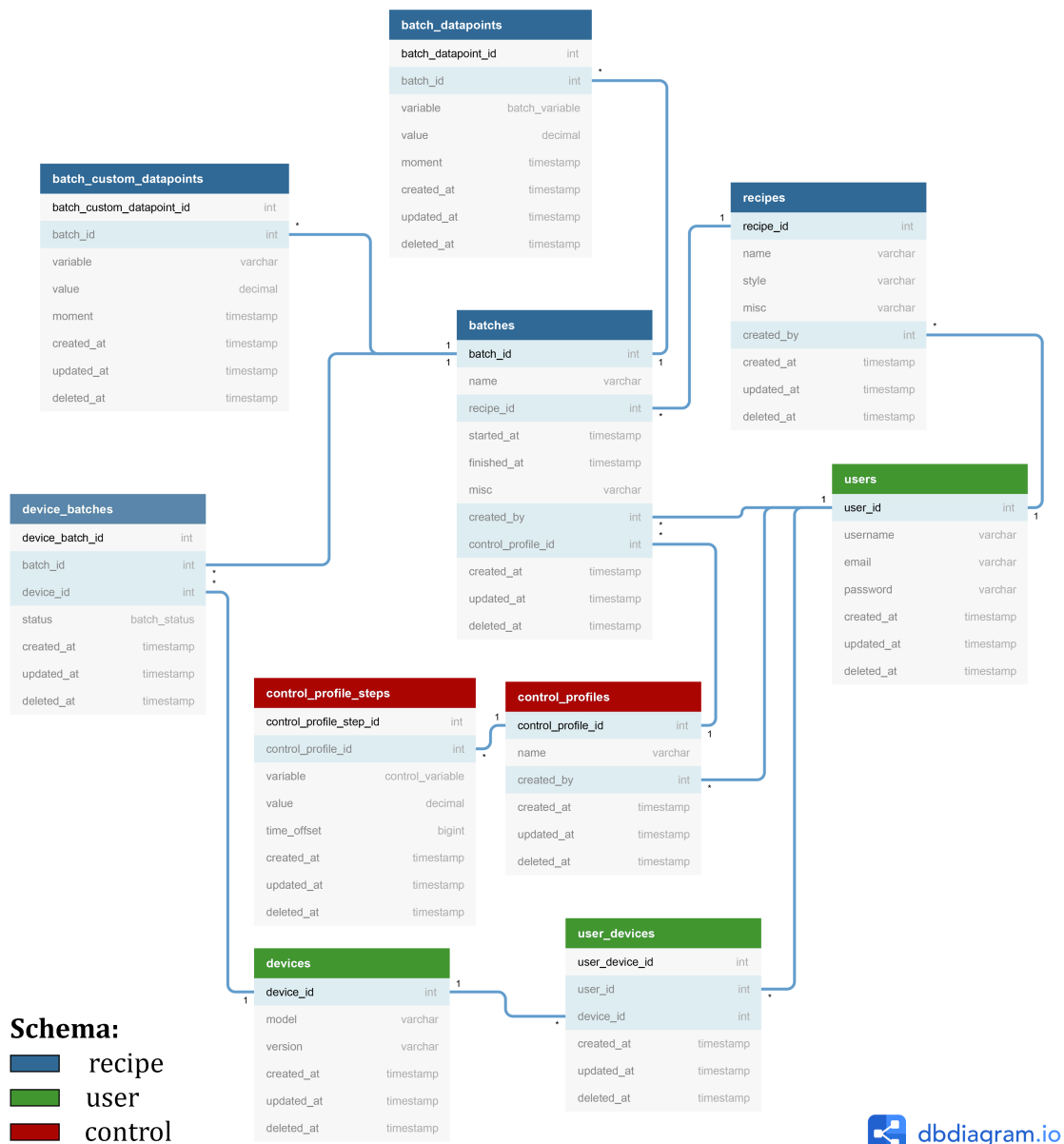


Figura 20: Diagrama de Entidade-Relacionamento.

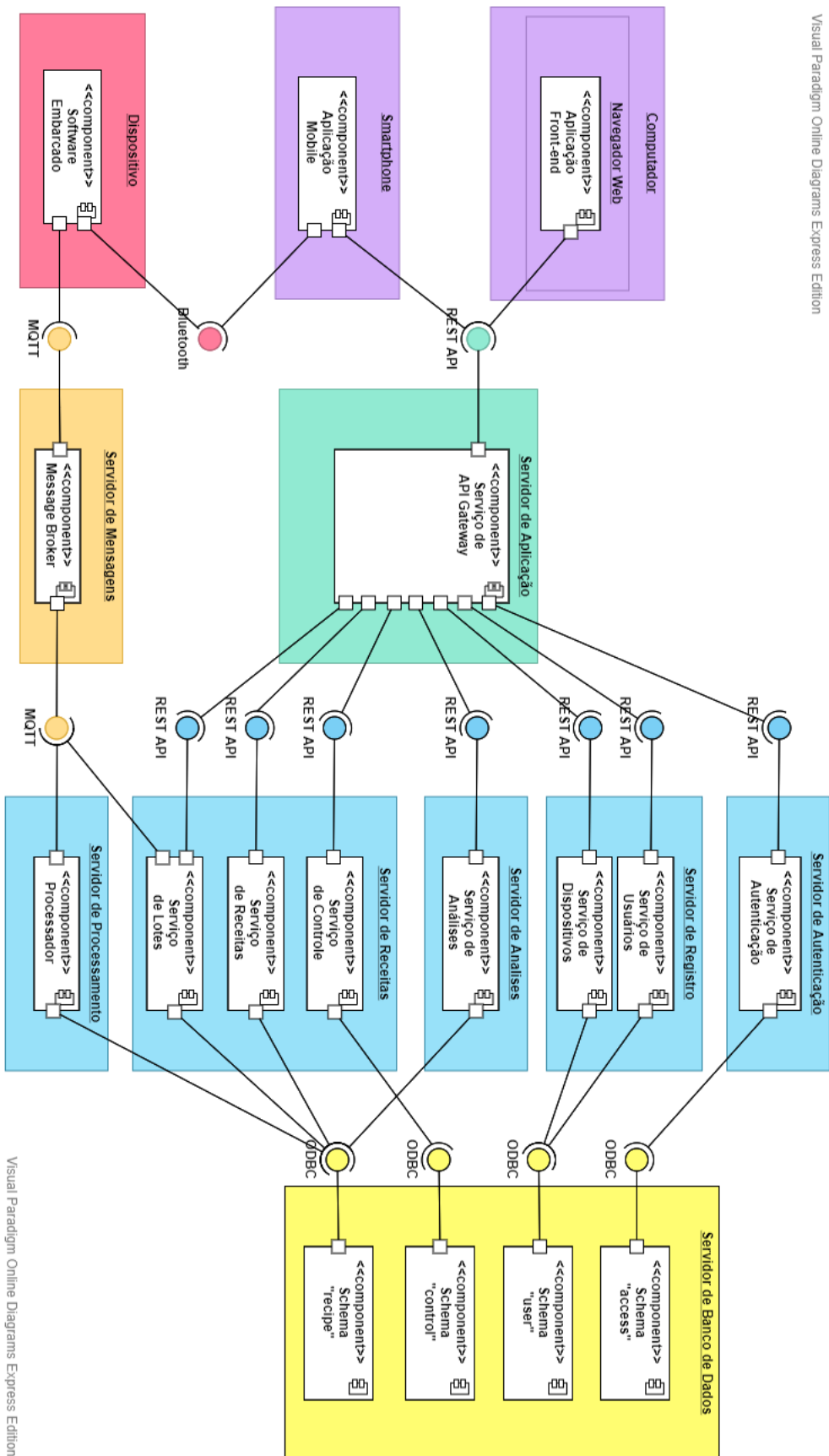


Figura 21: Diagrama de Componentes.

5 IMPLEMENTAÇÃO

6 TESTES E AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões do Projeto de Formatura

7.2 Contribuições

7.3 Perspectivas de Continuidade

REFERÊNCIAS

- [1] MUNROE, J. H. Fermentation. In: PRIEST, F.; STEWART, G. (Ed.). *Handbook of Brewing*. 2. ed. New York: CRC Press, 2006. p. 487–524.
- [2] KUNZE, W. *Technology Brewing and Malting*. 3. ed. Berlin: VLB Berlin, 2004.
- [3] WHITE, C.; ZAINASHEFF, J. *Yeast: the practical guide to beer fermentation*. Colorado: Brewers Publications, 2010.
- [4] BOULTON, C.; QUAIN, D. *Brewing Yeast and Fermentation*. [S.l.]: Wiley, 2001. ISBN 9780632054756.

APÊNDICE A – LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

APÊNDICE B – PROTÓTIPOS DAS INTERFACES