



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

PROPOSTA DE DENSÍMETRO COM ACELERÔMETRO

Autor: Hugo Leonardo Prioto
Orientador: Ricardo Zelenovsky

Brasília, dezembro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

PROPOSTA DE DENSÍMETRO COM ACELERÔMETRO

Autor: Hugo Leonardo Prioto
Orientador: Ricardo Zelenovsky

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica como
requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista

Banca Examinadora

Prof. Ricardo Zelenovski, ENE/UnB
Orientador

Prof. Alexandre Romariz, ENE/UnB
Examinador interno

Prof. Edson Mintsu Hung, ENE/UnB
Examinador interno

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Zeno e Neusa, pelo apoio, força e amor incondicional. Sem vocês a realização desse sonho não seria possível.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar saúde, fé e coragem para superar todas as adversidades.

Aos meus pais que me deram apoio e educação para que eu pudesse concluir mais essa etapa da minha vida, especialmente à minha mãe que, ao meu lado, sempre foi minha incentivadora, minha eterna gratidão. Aos meus tios e primos pelo estímulo a esta minha caminhada.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Ricardo Zelenovsky, pela boa vontade, paciência e entusiasmo dedicados à conclusão deste trabalho. Registro aqui minha gratidão por compartilhar da sua sabedoria, do seu tempo e da sua experiência.

Sou grato à Universidade de Brasília, especialmente ao corpo docente do curso de Redes de Comunicações, assim como à direção e administração desta instituição. Não poderia olvidar minha gratidão aos monitores sempre prestativos no cumprimento de seus misteres.

Agradeço também a todos que contribuíram para a conclusão da minha faculdade, especialmente aos amigos Antonio Bigonha, Fábio Kasahara, Levino Porto, e Pedro Neto por me estenderem a mão nos momentos de dificuldade, sempre com alegria e boa vontade.

Retribuo aqui todo carinho, amor e incentivo que recebi da companheira Karen.

RESUMO

Este trabalho se propõe a desenvolver um protótipo de baixo custo, baseado no hardware livre Arduino, capaz de medir a densidade no meio aquoso. Em particular, ele será empregado para aferir a densidade de cervejas durante todo o processo de fermentação. Serão coletadas informações periódicas de densidade da solução a partir da inclinação do próprio protótipo. As informações serão então transmitidas via *bluetooth* para um sistema final.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	III
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VI
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 AMBIENTAÇÃO - SITUAÇÃO DO MERCADO DA PRODUÇÃO DE CERVEJA ARTESANAL.....	1
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO	4
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO	4
1.4 PRODUÇÃO ARTESANAL.....	5
1.5 BRASSAGEM OU MOSTURA.....	5
1.6 FERVURA.....	7
1.7 FERMENTAÇÃO.....	8
1.8 ENGARRAFAMENTO	9
CAPÍTULO 2 - HARDWARE	10
2.1 ACELERÔMETRO MPU-5060	10
2.2 BLUETOOTH HC-05	12
2.3 ARDUINO NANO.....	14
2.4 SENSOR DE TEMPERATURA LM35DZ.....	15
2.5 MEMÓRIA FLASH	16
CAPÍTULO 3 – DESENVOLVIMENTO	17
3.1 INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA	19
3.2 ENCAPSULAMENTO E LASTRO DO DENSÍMETRO.....	19
3.3 CONFECÇÃO E MONTAGEM DO CIRCUITO	20
3.4 PROBLEMAS COM A ALIMENTAÇÃO	23
3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MEMÓRIA.....	24
3.6 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE	25
3.6.1 MODO 0: OPERAÇÃO	26
3.6.2 MODO 1: GRAVAÇÃO DA REFERÊNCIA EM 1.000	26
3.6.3 MODO 2: GRAVAÇÃO DA REFERÊNCIA EM 1.050	27
3.6.4 MODO 3: MOSTRAR LEITURAS E CALCULAR DISTÂNCIA.....	27
3.6.5 MODO 4: MOSTRAR CONTEÚDO DA EEPROM	27
3.6.6 MODO 5: MOSTRAR CONTEÚDO DA FLASH.....	27
3.6.7 MODO 6: APAGAR MEMÓRIAS EEPROM E FLASH.....	27
CAPÍTULO 4 – ENSAIOS COM O DENSÍMETRO	28
4.1 ENSAIO I - CALIBRAGEM COM 4 BATERIAS AAA	28
4.2 ENSAIO II – CALIBRAGEM COM 4 BATERIAS AA	32
4.3 ENSAIO III – TESTE COM UMA FERMENTAÇÃO REAL	36
4.4 ENSAIO IV – TESTES PARA VERIFICAR O CONSUMO DOS COMPONENTES	45
4.5 ENSAIO V – TESTES PARA VERIFICAR DURAÇÃO DAS BATERIAS.....	47
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	48
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo cilíndrico com hardware embarcado.....	3
Figura 2 - Conceito do projeto onde se pode ver um tubo cuja inclinação em relação à linha d'água deverá variar de acordo com a densidade. Quanto maior a densidade, mais o tubo se aproxima da linha horizontal.	3
Figura 3 - Produto oriundo do processo de mostura [5].....	6
Figura 4 - Rampas de temperatura para um processo de brasagem.	6
Figura 5 - Flor do lúpulo [6].....	7
Figura 6 - Módulo MPU-6050 pronto para uso [7].	11
Figura 7 - Orientação dos eixos de sensibilidade e polarização da rotação [8].....	11
Figura 8 - Emblema do Bluetooth [9].....	12
Figura 9 - Pinagem do HC-05.....	13
Figura 10 - Pinagem do Arduino Nano [12].....	14
Figura 11 - Sensor de temperatura [13].....	15
Figura 12 - Geometria simplificada do densímetro proposto.....	17
Figura 13 - Subtração vetorial.	18
Figura 14 - Influência do lastro no posicionamento (inclinação) do densímetro.	20
Figura 15 - Síntese do sistema.	20
Figura 16 - Esquema elétrico do densímetro proposto;	21
Figura 17 – Geometria dos componentes.....	22
Figura 18 - Esquema com a geometria dos componentes soldados.....	22
Figura 19- Esquemático de alimentação do densímetro com apenas um diodo.....	24
Figura 20 - Esquemático de alimentação do densímetro com dois diodos	24
Figura 21 - Foto mostrando o densímetro submetido ao ensaio para levantar a curva de densidade.....	28
Figura 22 - Distância x Densidade.....	30
Figura 23 - Eixo X vs Densidade.....	31
Figura 24 - Eixo Y vs Densidade.....	31
Figura 25 - Densidade vs Eixo Z.	32
Figura 26 - Foto do densímetro com o flutuador auxiliar.	32
Figura 27 - Gráfico as leituras dos 3 eixos (ax,ay e az), e distância e o cálculo da soma vetorial dos 3 eixos, que deve resultar na aceleração da gravidade em Brasília.....	33
Figura 28 - Gráfico relacionando a densidade com a distância, usando o último valor da leitura em cada patamar.....	34
Figura 29 - Gráfico relacionando a densidade com a distância usando o valor médio das leituras feitas em cada patamar de densidade.....	35
Figura 30 - Curva de densidade x tempo, durante um período de 17 dias.	37
Figura 31 - Gráfico mostrando as leituras dos 3 eixos do acelerômetro e resultante vetorial em “1g”, ao longo dos 17 dias.	38
Figura 32 - Gráfico mostrando as leituras do eixo X do acelerômetro ao longo dos 17 dias	38
Figura 33 - Gráficos mostrando as leituras nos eixo y ao longo dos 17 dias.	39
Figura 34 - Gráficos mostrando as leituras no eixo z, ao longo dos 17 dias.....	40
Figura 35 - Leituras de aceleração no eixo x durante as primeiras 48 horas.	40
Figura 36 - Curvas da aceleração da gravidade no eixo x (ax) e a curva da densidade (dist) nas primeira 48 horas. Ambas as curvas foram escalonadas para excursionar entre 0 e 1.....	41
Figura 37 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano x – y.....	42

Figura 38 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano $x - z$	42
Figura 39 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano $y - z$	43
Figura 40 - Gráfico tridimensional indicando a posição da aceleração da gravidade com as medidas colhidas nos 3 eixos.....	43
Figura 41 - Foto do densímetro após os 17 dias de fermentação.	44
Figura 42 - Foto do densímetro após os 17 dias de fermentação.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modos de operação do densímetro	26
Tabela 2 - Medidas dos eixos e da distância em função da densidade	29
Tabela 3 - Medidas das médias da distância em função da densidade	36
Tabela 4 - Resumo das medidas realizadas	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

CPU	<i>Central Processing Unit</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
PC	<i>Personal Computer</i> (computador pessoal)
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Ambientação - Situação do mercado da produção de cerveja artesanal

O segmento de cerveja artesanal vem ganhando cada vez mais adeptos no Brasil e assim se mostrando um mercado promissor. Essas cervejarias artesanais e as micro cervejarias cresceram tanto que afetaram grandes cervejarias nacionais, a ponto de elas terem de lançar produtos especiais para concorrer neste segmento. Esse movimento ocorreu por diversos fatores como hobby, curiosidade e até mesmo uma oportunidade de novo negócio. Com isso, esse mercado se torna ainda mais competitivo. É cada vez maior o número de novos consumidores, fabricantes, restaurantes e bares que buscam o prazer da cerveja artesanal.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria da Cerveja (CervBrasil) as chamadas cervejas especiais que incluem as artesanais, as importadas e as industriais de categoria Premium, ocupam hoje 5% do mercado e têm previsão de dobrar o número de vendas nos próximos cinco anos. Assim, mercado desse tipo de bebida se apresenta um bom negócio nos últimos anos mesmo com a alta carga tributária que chega em torno de 60% do valor do produto. O brasileiro consome cerca de 70 litros da bebida por ano [1].

Segundo o Sistema de Controle de Produção de Bebidas da Receita Federal, o Brasil é o terceiro maior consumidor de cerveja. Produz 13,4 bilhões de litros/ano (dados de 2013) - ficando atrás da EUA (23,6 bilhões de litros/ano) e CHINA (35 bilhões de litros/ano). Em 2013 havia 200 microcervejarias e a expectativa de crescimento para os próximos 10 anos, é de aumento de 2% do mercado total.

Enquanto o mercado de cervejas *mainstream* (que envolve as marcas mais populares) tem caído nos últimos anos (1,8% em 2016 - até outubro - em relação a 2015, e 2% em 2015 em relação a 2014), o mercado das cervejas artesanais e especiais vem em um sentido oposto. No nicho de cervejas especiais, em 2013 a porcentagem que esse mercado ocupava era de 10% do mercado. De acordo com a projeção realizada pela Brain Beer Consultoria e Sindicerv (Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja), em 2020, o mercado será de 20%.

Nos últimos anos a taxa de crescimento aumenta acima de 50 novas cervejarias artesanais por ano, o que representa em média uma nova cervejaria por semana. A

estimativa é de que o número esteja em pelo menos 500 cervejarias artesanais até o final de 2017.

O ideal para quem fabrica cerveja artesanal é não se preocupar em competir com as grandes empresas, mas sim, fazer uma produção em pequena escala, porém, produzir produtos diferenciados, de qualidade e alto valor agregado.

De acordo com a Associação Brasileira de Bebidas (Abrabe), as microcervejarias são constituídas de empresas (microempresários individuais - MEI) dotadas de modestas instalações que produzem em pequenas quantidades para consumo no local com envasamento próprio para consumo em ambientes tais como residências e pontos específicos de consumo representados por bares e restaurantes frequentados por pessoas que conhecem e apreciam cervejas artesanais. Nesse cenário se encontra o pequeno produtor de cerveja artesanal: microempreendedor ou a pessoa que exerce a atividade como forma de lazer, de distração ou passatempo.

Nesse contexto, o microcervejeiro encontra muitas dificuldades para produzir e comercializar cerveja artesanal, tais como a burocracia, tendo em vista que o Ministério da Agricultura ainda não distingue microcervejarias de pequenas, médias e grandes empresas cervejeiras, ou seja, trata igualmente os pequenos e microempresários como se fossem grandes cervejeiros do ramo, com a mesma carga tributária e custo de produção (insumos e equipamentos). Assim sendo, o perfil de produção mais industrial acaba por elevar o preço de bens intermediários para patamares de valores proibitivos ao pequeno produtor.

Existem outros equipamentos capazes de mensurar a fermentação da cerveja, alguns utilizam o grau de produção de dióxido de carbono durante o processo de fermentação, já outros obtém a fermentação através da massa de levedura depositada. Um dos equipamentos imprescindíveis que possui custo elevado no mercado é aquele responsável por aferir o nível de fermentação da cerveja, custa aproximadamente R\$900,00 [2]. Foi então proposto um projeto para desenvolver o protótipo de um densímetro, capaz de realizar funções semelhantes ao do industrial, mas por um preço inferior.

O projeto consiste em embarcar em um tubo cilíndrico um microcontrolador acompanhado de alguns componentes, tais como: sensor de temperatura, módulo de comunicação *bluetooth*, módulo acelerômetro e giroscópio, bateria e pesos para o ajuste do centro de gravidade do protótipo. Vide a Figura 1 para melhor entendimento do protótipo.



Figura 1 - Tubo cilíndrico com hardware embarcado.

O tubo então será colocado dentro do recipiente em que a cerveja está fermentando. O protótipo ficará suspenso na solução e apresentará uma variação em sua inclinação de acordo o grau de fermentação da cerveja. Com base na estimacão do protótipo, será possível estimar a densidade da cerveja e, conseqüentemente, o nível de fermentacão que a mesma se encontra. É possível ter uma ideia do conceito através da Figura 2.



Figura 2 - Conceito do projeto onde se pode ver um tubo cuja inclinação em relação à linha d'água deverá variar de acordo com a densidade. Quanto maior a densidade, mais o tubo se aproxima da linha horizontal.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo deste projeto é criar um protótipo de baixo custo capaz de atender às necessidades do hobbyista ou pequeno produtor de cerveja artesanal na medição da densidade de forma eficiente e barata.

O propósito se justifica, pois o controle de qualidade é fundamental, mas ainda representa um desafio para as microcervejarias e hobbies (plural de hobby – significa passamento, ou seja, atividade praticada por prazer nos tempos livres), que não contam com disponibilidade de recursos para investir em sistemas avançados de controle. A falta de controle de qualidade afeta não somente a padronização, mas promove perdas e desperdícios de produção.

1.3 Descrição do trabalho

Este documento está dividido em 4 capítulos conforme descrito a seguir:

Introdução: mostra um pequeno panorama do mercado da cerveja artesanal no Brasil, assim como a situação dos produtores, em especial do pequeno produtor e do hobbyista, que enfrentam problemas para adquirir equipamentos de controle de seu produto. Especial para este trabalho é a medida de densidade, pois é usada para aferir o grau alcoólico da cerveja. Apresenta-se, então, a proposta de um protótipo barato, capaz de acompanhar esta medição durante a fase de fermentação.

Capítulo 1 - Produção Artesanal de Cerveja: faz-se um breve relato que explica, ainda que de forma resumida, todo o processo de produção de cerveja.

Capítulo 2 - Hardware: Descrição de todo o equipamento utilizado para produzir o protótipo, bem como realizar os ensaios.

Capítulo 3 - Desenvolvimento e Software: Desenvolvimento do conceito, proposta de software a serem utilizados no protótipo.

Capítulo 4 - Ensaios: Descrição dos testes realizados e análise dos resultados obtidos.

Conclusão: apresentação e discussão dos resultados obtidos, assim como das possibilidades de análise e sugestão de aprimoramentos futuros.

1.4 Produção Artesanal

A fase do processo de produção caseira de cerveja artesanal foi extraída, com pequenas adaptações, do livro "Arduino Avançados para Processadores AVR" de autoria dos professores Ricardo Zelenovsky e Alexandre Mendonça, ainda em fase de preparação. O texto a seguir, transcreve alguns fragmentos do citado título, naquilo que interessa aos propósitos deste projeto.

“O principal produto na fabricação da cerveja é o malte. Este termo é usado de forma indistinta e merece uma explicação mais cuidadosa. No caso da cerveja este ingrediente é produzido com a hidratação da cevada que inicia seu processo de germinação. Durante a germinação, enzimas são produzidas para transformar o amido da cevada em glicose para alimentar a planta. Nesse momento, a cevada recém-germinada é secada e se transforma em malte. O mesmo processo, denominado malteação ou maltação, pode ser aplicado a diversos tipos de cereais. O malte para a cerveja pode passar por outras etapas, como a defumação ou a torrefação, para alterar suas propriedades.

A produção de cerveja envolve quatro etapas básicas, a seguir explanadas[3]:

- (i) Brassagem ou mostura; (ii) Fervura; (iii) Fermentação; e (iv) Engarrafamento

1.5 Brassagem ou Mostura

Brasagem é um termo que tem origem na palavra francesa “*brasserie*”, a qual significa cervejaria ou negócio de cerveja. Durante o processo de brassagem, ocorre a moagem do malte e, em seguida, é misturado com água e submetido a diversas rampas de temperatura. O objetivo é garantir que as enzimas que começaram a agir durante a germinação voltem à atividade e transformem o amido disponível em açúcar. Os tipos de açúcares produzidos durante o processo dependem da temperatura em que a mistura é mantida, permitindo assim diversas variações de sabor. O produto da brassagem, após a separação da parte sólida chama-se mosto e pode ser visto na Figura 3. A Figura 4 apresenta um exemplo de rampas de temperatura usadas em uma típica brassagem. Vale ressaltar que esses valores mudam de acordo com o tipo da cerveja.



Figura 3 - Produto oriundo do processo de mostura [5].

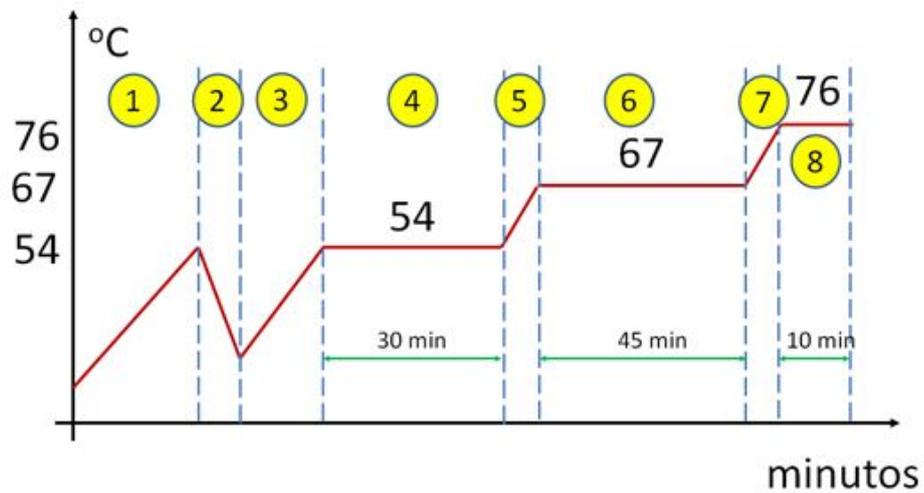


Figura 4 - Rampas de temperatura para um processo de brasagem.

Etapas da brassagem do exemplo apresentado na Figura 4:

- Aquecimento da água até chegar a 54°C.
- Adição malte e com isso a temperatura cai.
- Novo aquecimento até chegar a 54°C.
- Manter em 54°C por 30 minutos.
- Aquecimento até chegar a 67°C.
- Manter em 67°C por 45 minutos.
- Aquecimento até chegar a 76°C.
- Manter em 76°C por 10 min e encerrar o processo.

Aquecimento da água até chegar a 54°C. Adição malte e com isso a temperatura cai. Novo aquecimento até chegar a 54°C. Manter em 54°C por 30 minutos. Aquecimento até chegar a 67°C. Manter em 67°C por 45 minutos. Aquecimento até chegar a 76°C. Manter em 76°C por 10 min e encerrar o processo.

A rampa final, de 76°C, é usada para finalizar o processo, já que nessa temperatura o processo enzimático é interrompido. Na brassagem é importante não ultrapassar a temperatura de 80°C, pois a partir desta temperatura os taninos da casca da cevada começam a se dissolver no mosto e isso vai trazer um sabor adstringente para a cerveja.

Ao finalizar a brassagem, separa-se a parte líquida (mosto) da parte sólida. É usual “lavar” ou “enxaguar” a parte sólida restante com água a 76°C para garantir uma boa extração dos açúcares. O líquido resultante desta lavagem é adicionado ao mosto. Assim, termina a brassagem.

1.6 Fervura

O mosto produzido na etapa anterior é submetido ao processo de fervura durante o qual se faz a adição do lúpulo. O lúpulo, mostrado na figura 5, é uma flor da família das canabidáceas (mesma da maconha) originária no hemisfério norte, que é usado para dar sabor amargo e aroma à cerveja. Ele, junto com o álcool e o gás carbônico, transforma a cerveja num ambiente hostil para as bactérias, facilitando assim sua preservação.



Figura 5 - Flor do lúpulo [6].

Classificam-se os principais subprodutos do lúpulo como “alfa ácidos” e “beta ácidos”. O amargor da cerveja deve-se a presença dos alfa ácidos. Além disso, eles têm

efeito bactericida, especialmente contra as bactérias Gram-positiva, e ainda favorecem a ação da levedura. Os alfa-ácidos são insolúveis em água, porém durante a fervura eles sofrem o processo de isomerização, o que modifica sua solubilidade. Por sua vez, os beta ácidos não isomerizam durante a fervura. Eles têm pouca influência no sabor, mas contribuem muito para o aroma da cerveja.

Por esses motivos, os lúpulos são classificados em:

- Lúpulo de amargor Rico em alfa ácidos, adicionado no início da fervura.
- Lúpulo de aroma Rico em beta ácidos, adicionado no final da fervura.

Em resumo, quando levanta a fervura do mosto, adiciona-se o lúpulo de amargor. Essa fervura dura de 50 a 70 minutos, dependendo do lúpulo empregado. Um pouco antes de finalizar a fervura, cerca de 10 minutos, é adicionado o lúpulo de aroma. Uma etapa importante ao final da fervura é o resfriamento brusco (*cold break*).

Durante a fervura do mosto, diversos tipos de álcoois e ésteres são produzidos. Porém, devido à temperatura elevada da fervura, eles evaporam. Após a fervura, durante o resfriamento, estes álcoois e ésteres ainda são produzidos, mas como a temperatura está abaixando, eles ficarão dissolvidos no mosto. Isto pode resultar em sabor estranho e ainda provocar dor de cabeça após o consumo. Assim, é importante que o resfriamento seja rápido, para minimizar a quantidade desses subprodutos. É comum o uso de uma serpentina com água gelada para conseguir a quebra brusca de temperatura Finalizada a fervura, o mosto está pronto para a fase de fermentação.

1.7 Fermentação

A fervura removeu todos os gases que estavam dissolvidos no mosto, assim, antes de iniciar a fermentação é necessária uma fase de aeração para fazer novamente a dissolução de gases. Isto é facilmente conseguido com uma bomba de ar usada em aquário. Após a aeração, o mosto é colocado em um recipiente esterilizado e se faz a adição do fermento. Existe uma grande quantidade de empresas produzindo fermentos, um para cada tipo de cerveja. Quando tudo está pronto, o recipiente com o mosto e o fermento é lacrado e posto para fermentar em um ambiente quieto e se possível escuro. Após duas ou três semanas, a fase de fermentação é encerrada e a cerveja pode ser engarrafada.

Esta etapa de fermentação é muito importante para o presente trabalho, pois é onde os açúcares são consumidos pela levedura, resultando como subproduto o álcool e o gás. Em ambiente artesanal, a estimativa do grau alcoólico de uma receita de cerveja é feita com as medidas de densidade antes e a pós a fermentação. Antes da fermentação, devido à quantidade de açúcares dissolvidos, a densidade é elevada. Como o processo de fermentação consome esses açúcares e produz álcool, a densidade do produto final é menor. Pela diferença entre a densidade original e a final estima-se a quantidade de álcool.

O presente trabalho propõe um dispositivo que possa ser inserido dentro de fermentador e que registre, periodicamente, a evolução do processo de fermentação, oferecendo ao usuário a possibilidade de, a qualquer instante, ver como a densidade está evoluindo.

1.8 Engarrafamento

Terminada a fermentação, a cerveja está pronta para ser colocada nas garrafas. Essa fase é muito delicada, pois é preciso minimizar o contato com o ar. O oxigênio da atmosfera pode oxidar rapidamente a cerveja, o que lhe dá um sabor estranho, levemente azedo. Os especialistas descrevem esse sabor como “gosto de papelão molhado”.

Capítulo 2 - Hardware

Com a finalidade de se construir um dispositivo capaz de acompanhar a densidade de uma cerveja em fermentação, pela medição da inclinação de um tubo que flutua em sua superfície, vários componentes foram necessários.

Os principais componentes serão apresentados a seguir:

- Acelerômetro para medir a inclinação do tubo;
- CPU para automatizar o processo;
- Módulo Bluetooth para transmitir as medidas;
- Memória Flash para armazenar as medidas;
- Leds para sinalização e
- Circuito de alimentação

2.1 Acelerômetro MPU-5060

Uma forma muito simples de se estimar a inclinação do densímetro é com o uso de um acelerômetro de 3 eixos. A leitura que se obtém do acelerômetro é a projeção da aceleração da gravidade em cada um de seus eixos, permitindo assim estimar a inclinação do dispositivo. O componente escolhido foi o MPU-5060, devido ao seu baixo custo e fácil manuseio. Ele é um dispositivo integrado que combina um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio também de 3 eixos, além de um termômetro interno. Seu principal emprego é a detecção e acompanhamento de movimentos. Citam-se o uso na detecção da posição de celulares e *tablets*, nos *videogames*, na detecção de movimentos humanos e até na eliminação da trepidação em câmeras fotográficas e filmadoras.

O MPU-6050 é um *chip* fabricado pela InvenSense e disponibilizado num encapsulamento para montagem em superfície. Devido às dificuldades para se trabalhar com tal encapsulamento, é comum encontrarmos pequenas placas que já o trazem soldado, o que facilita muito seu emprego, como mostrado na Figura 6. Como já foi afirmado, este chip disponibiliza ao usuário um acelerômetro de 3 eixos (X, Y e Z), um giroscópio de 3 eixos (X, Y e Z) e um termômetro, de acordo com a Figura 7. Ele pertence à classe Unidade de Medida Inercial (do inglês, IMU –*Inertial Motion Unit*) de 6 eixos.



Figura 6 - Módulo MPU-6050 pronto para uso [7].

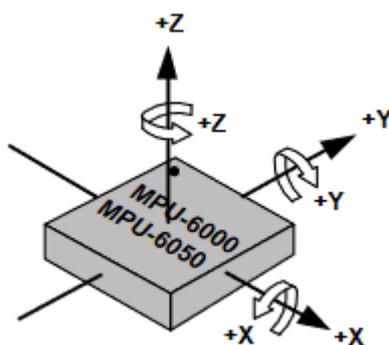


Figura 7 - Orientação dos eixos de sensibilidade e polarização da rotação [8].

O acelerômetro trabalha nas escalas ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g. O giroscópio trabalha nas escalas de ± 250 gr/s, ± 500 gr/s, ± 1000 gr/s e ± 2000 gr/s (gr/s = graus/segundo). Os valores entregues são inteiros de 16 bits com sinal. Isto significa que varrem a faixa de -32.768 até 32.767 (65.536 passos). Por exemplo, supondo a escala de ± 2 g, a resolução é dada por $4 \text{ g} / 65.536$ (ou então, $2 \text{ g} / 32.767$).

A placa mais comum no Brasil é a GY-521, apresentada na Figura 6. Essa placa possui um regulador interno de 3,3 V, assim, pode ser alimentada com 5 V. Seus pinos são:

- VCC = 5V;
- GND = Terra;
- SCL e SDA = porta TWI (I2C) do Arduino;
- AD0 = endereço alternativo e
- INT = pino de interrupção.

Os pinos XDA e XCL não são usados neste trabalho.

2.2 Bluetooth HC-05

A popularização do Arduino abriu mercado para uma série de dispositivos para a comunicação sem fio de sensores, controladores e processadores. A comunicação *bluetooth*, já popularizada e usada em diversos equipamentos como smartphones, *tablets*, *headsets*, *notebooks* e outros, é uma das melhores opções para implementar redes sem fio com o Arduino[8].

A tecnologia Bluetooth consiste em um protocolo para comunicação de rádio para uso pessoal, isto é, é uma especificação de rede sem fio classificada como PAN (*Personal Area Network*). Foi desenvolvida inicialmente em 1994 pela Ericsson como uma alternativa sem fio ao protocolo RS-232. A faixa de frequência utilizada pelo Bluetooth é de 2.4 a 2.485 GHz.

Um grupo de empresas e centros de desenvolvimento chamado de Bluetooth Special Interest Group é responsável por escrever as especificações do protocolo e lançar versões atualizadas e novas funcionalidades.

O protocolo é licenciado e para que um produto possa estampar o emblema da comunicação *bluetooth*, vide Figura 8, é preciso estar de acordo com todas as especificações do protocolo. Para cada versão do Bluetooth existem testes de qualificação pelos quais um produto deve passar para poder ser certificado como um equipamento que utiliza comunicação Bluetooth.

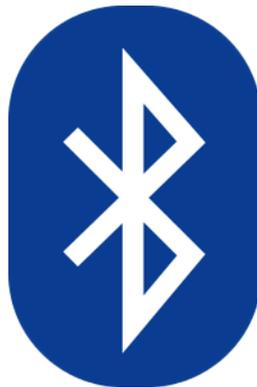


Figura 8 - Emblema do Bluetooth [9].

No Brasil, o HC05 e o HC06 são os principais módulos Bluetooth para interfacear com Arduino. Além de fáceis de usar e prototipar, são baratos e facilmente encontrados em qualquer distribuidor de eletrônicos que trabalhe com Arduino.

Este projeto faz uso do HC-05, apresentado na Figura 9. Este módulo possui dois modos de operação: mestre e escravo. Uma outra versão é o HC-06, que só pode

funcionar no modo escravo. Ambos dispositivos podem ser configurados com o emprego de comandos AT.

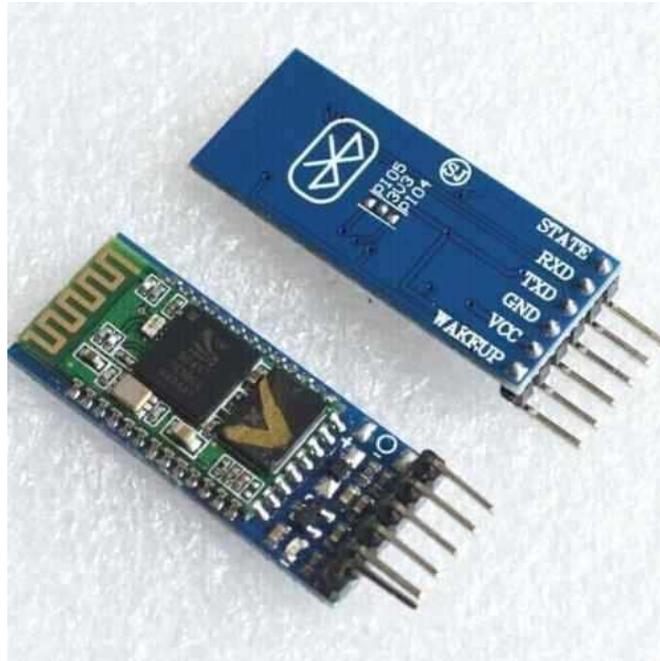


Figura 9 - Pinagem do HC-05.

No caso do HC-05, suas especificações são [11]:

- Módulo montado em PCB com regulador de tensão e 6 terminais de acesso a VCC, GND, TXD(3,3V),RXD(3,3V), STATE e WACKUP;
- Tensão de Alimentação CC: 3,6V a 6,0V;
- Consumo de corrente: 30 mA a 40 mA;
- Frequência: 2,4GHz Banda ISM (Industrial, Scientific and Medical);
- Alcance de sinal: até 30m (ideal) sem obstáculos e interferências, típica de até 10m;
- Especificação Bluetooth v2.0 + EDR (Enhanced Data Rate);
- Taxa de dados: Assíncrona: 2 Mbps (máx.)/160 kbps, síncrona: 1 Mbps/1 Mbps;
- Temperatura de operação: -25 °C a +75 °C;
- Taxa máxima de transmissão serial: 1382400bps;
- Configuração padrão: Identificação BT-06, 9600bps, senha 1234;

2.3 Arduino Nano

A especificação deste projeto demandava por um processador que estivesse disponível em uma placa de tamanho reduzido e formato retangular, com disponibilidade de entrada e saída digital, conversor AD e interface I2C e modos de operação em baixo consumo. A facilidade de acesso, preço baixo e disponibilidade de bibliotecas e comunidade virtual levaram à escolha do Arduino Nano.

É composto por uma placa pequena, completa e fácil de usar, que utiliza o microcontrolador Atmega328 operando em 16Hz. O quesito forma é bastante adequado para ser embarcado dentro de do densímetro proposto. O Atmega328 é um processador RISC fabricado pela Atmel. As principais características deste processador estão listadas a seguir. A placa Arduino Nano facilita o emprego deste processador, pois já incorpora o regulador de tensão e interface USB. A Figura 10 apresenta uma foto com indicações dos principais recursos.

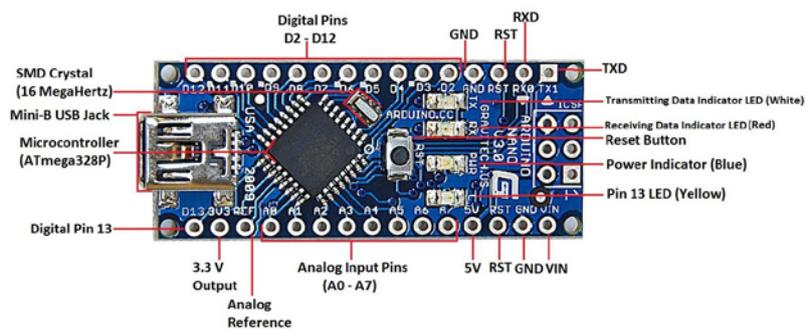


Figura 10 - Pinagem do Arduino Nano [12].

Suas características são:

- 32KB de memória Flash para programa
- 2KB de memória RAM para dados
- 1KB de memória EPROM
- 1 timer de 16 bits e dois timers de 8 bits
- Um conversor A/D de 10bits
- Porta serial assíncrona
- Porta I2C
- Tensão de operação de 2,7V até 5,5V
- Tensão de alimentação (recomendada): 7-12 V
- Tensão de alimentação (limite): 6-20 V

Para sua operação é necessário o uso do conversor AD do Arduino. A temperatura em Celsius é facilmente calculada com o uso da equação abaixo, onde V_{TERM} é a tensão medida sobre o sensor.[14]

$$T = 100 \times V_{Term}$$

Para o caso do Arduino Nano com conversor ADC de 10 bits trabalhando com tensão de referência de 5 V, a equação assume uma nova forma.

$$T = 100 \times N_{ADC} \times \frac{5}{2048}$$

onde N_{ADC} é o código retornado pelo conversor ADC do Arduino.

2.5 Memória Flash

Em sua versão final, o densímetro irá apenas fornecer o valor da densidade medida a cada hora. Para isso, a memória EEPROM de 1 KB disponibilizado pela CPU já seria suficiente, pois permitiria armazenar 1024 leituras. Porém, durante a fase de desenvolvimento é interessante gravar mais dados para permitir uma análise posterior.

A intenção é gravar as medidas dos 3 eixos do acelerômetro, as medidas dos 3 eixos do giroscópio, o valor da temperatura interna do MPU e a temperatura externa medida com LM35DZ. Como cada medida tem 2 bytes, tem-se o total de 16 bytes por leitura. Considerando uma leitura a cada hora durante o período de 1 mês, a demanda é 11.520 bytes. Evidentemente, a EEPROM do AT328 não é suficiente.

A pesquisa por memórias Flash indicou a adequação da família de memórias da Microchip denominadas de 24LCxxx, em particular a 24LC512 com 64 KB e a 24LC1025 com 128 KB. Essas memórias têm espaço suficiente para o que se pretende, operam na faixa de 2,5 V até 5,5 V e são controladas por uma porta I2C, a mesma usada pelo acelerômetro. O consumo de corrente é outro item importante. Quando em operação, esta memória consome 1 mA e em repouso o consumo cai para 100 μ A. Esses são valores muito atraentes para o projeto pretendido [15].

Capítulo 3 – Desenvolvimento

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo tubular que ficasse flutuando, de forma inclinada, em líquido cuja densidade varia. As Figuras 12 e 13 dão uma boa ideia de seu princípio de funcionamento. Quando a densidade do líquido for alta, sua acomodação se aproximaria da horizontal e, por sua vez, com densidade baixa, seu posicionamento se aproxima da vertical.

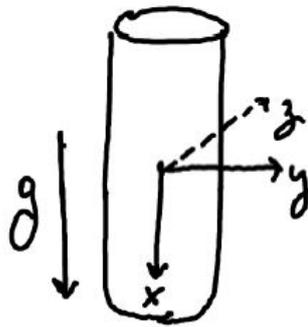


Figura 12 - Geometria simplificada do densímetro proposto.

A primeira ideia que surge é a de usar as componentes de aceleração medidas nos 3 eixos para estimar o ângulo de inclinação do densímetro. Esta abordagem implica na necessidade de se levantar empiricamente uma curva de densidade X inclinação. O principal impedimento tem a ver com a necessidade de se abrir o densímetro e retirar os componentes para trocar as baterias. Como é difícil devolver os componentes na mesma geometria anterior, cada troca de baterias implicaria numa nova calibração. Isto, realmente, não seria prático.

Uma segunda abordagem, mais pragmática, pretende fazer as medidas tomando uma determinada posição como sendo a de referência. Esta referência será a posição do densímetro quando imerso em água potável, que é fácil de ser obtida. Nos ensaios usou-se a “água da torneira”. A hipótese, ainda a ser comprovada de forma definitiva, é a de que a curva de densidade X inclinação é sempre a mesma. Uma alteração na geometria do densímetro apenas desloca esta curva na vertical. Assim, apenas uma medida seria suficiente para se conhecer a curva correta.

Segundo essa ideia, se denominarmos a referência pelo vetor $V_R = \{ x_R, y_R, z_R \}$ e o valor medido pelo vetor $V_m = \{ x_m, y_m, z_m \}$, o vetor diferença (V_d) entre esses dois vetores é dado pela seguinte equação[16]:

$$V_d = \sqrt{(x_m - x_R)^2 + (y_m - y_R)^2 + (z_m - z_R)^2}$$

Quanto maior for a inclinação, ou seja, quanto mais o densímetro “se afastar” da posição de referência, maior a densidade. À frente são apresentados ensaios comprovando esta hipótese. Para simplificar o cálculo a ser feito pelo Arduino Nano, a equação acima é alterada para uma forma mais simples que oferece a mesma informação, mas em uma escala diferente.

$$V_{dist} = |x_m - x_R| + |y_m - y_R| + |z_m - z_R|$$

Note que apenas se faz o somatório do valor absoluto das diferenças nos três eixos. Este valor, de agora em diante, será rotulado como distância, ou seja, algo proporcional à “distância” entre o valor original e o valor medido.

A figura 13 a seguir exemplifica a distância que está sendo calculada. É possível verificar que a distância não muda, independentemente de ocorrer uma rotação em torno do eixo Z.

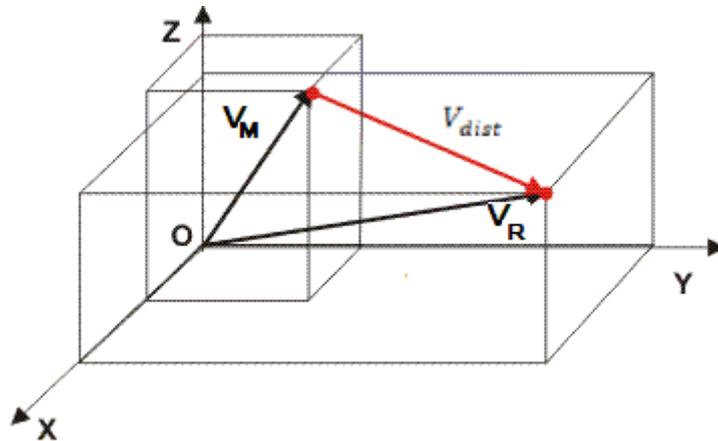


Figura 13 - Subtração vetorial.

Esta abordagem tem ainda a grande vantagem de dispensar a necessidade de aferição do acelerômetro. O manual indica que o acelerômetro possui erros de *offset* em seus eixos. Esses erros são calculados com medidas feitas com o acelerômetro em repouso e depois são descontados em todas as medidas. Como a abordagem trabalha com a diferença entre duas medidas, este erro é eliminado.

3.1 Inicialização do Sistema

Como já foi afirmado, inicialmente pensou-se em apenas medir a inclinação do eixo x (a_x) com relação à aceleração da gravidade. Essa ideia implica necessidade de construir uma geometria específica. Em outras palavras, a placa e a bateria deveriam ocupar sempre a mesma posição dentro do densímetro.

A alternativa foi a de trabalhar com a distância medida em relação a uma posição de referência. Com isso, a geometria deixou de ser um parâmetro crítico, embora tenha feito surgir a necessidade de se fornecer uma referência inicial. Essa referência é conseguida ao colocar o densímetro em água de torneira (densidade 1.000).

Assim, um dos modos de operação do densímetro, denominado de Calibração, é para gravar na EEPROM a projeção da aceleração da gravidade em cada um dos três eixos (a_x , a_y , a_z) do acelerômetro, criando assim o vetor de referência.

3.2 Encapsulamento e lastro do densímetro

A placa de circuito foi inserida em um tubo cilíndrico de ponta abaulada, com formato de ogiva. Fez-se necessário utilizar chumbo de pesca na ponta baixa do tubo, com o intuito de conferir uma certa inclinação, tendo em vista que a parte baixa do tubo estava muito próxima da linha d'água. Entre o hardware e o peso de pesca, existe uma membrana esponjosa, feita da parte amarela da bucha de lavar prato, que serve tanto para isolar o chumbo na parte baixa, quanto para conformar melhor a posição da fonte de alimentação, mitigando eventuais deslocamentos internos dos componentes. Isso se deve porque ainda não há certeza sobre o lastro ideal. Vide a Figura 14 para melhor compreensão.

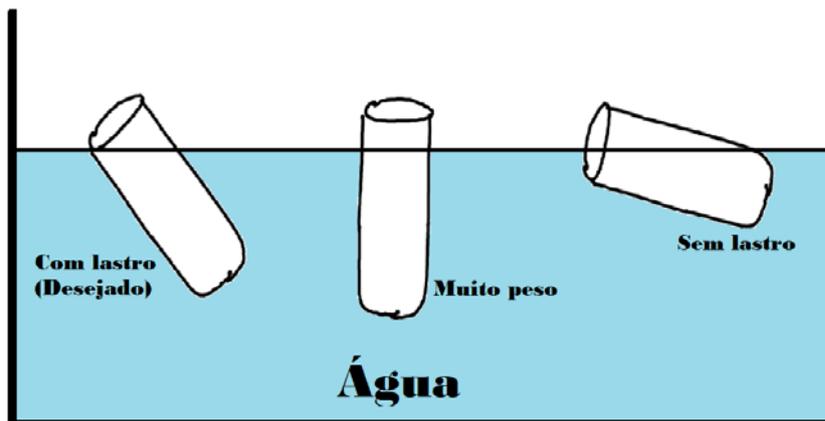


Figura 14 - Influência do lastro no posicionamento (inclinação) do densímetro.

3.3 Confeção e montagem do circuito

O sistema do proposto é composto por 6 subsistemas, a saber: MPU-6050, Memória Flash, Arduino Nano, Bluetooth HC-05, dois LEDs e um sensor temperatura LM35DZ. Os subsistemas estão dispostos de acordo com a figura 15. Os LEDs são usados para fazer sinalizações para o usuário e indicar condições internas.



Figura 15 - Síntese do sistema.

Todo o circuito do densímetro foi montado sobre uma placa padrão de circuito impresso, cortada de forma a caber de forma justa dentro do tubo escolhido. As conexões necessárias entre os diversos dispositivos foram feitas com solda usando fio flexível. O espaço de placa disponível era exíguo e por isso foram necessários alguns ensaios de forma a encontrar a geometria mais eficiente.

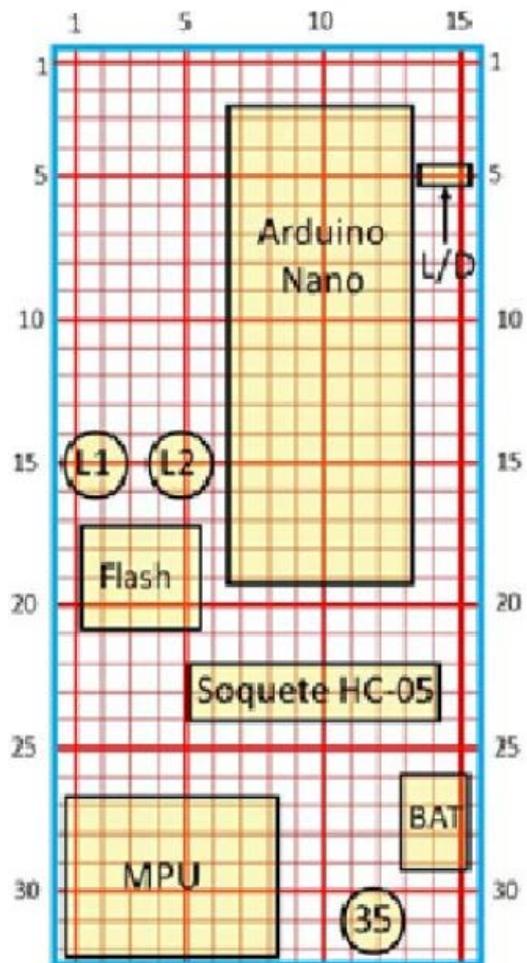


Figura 17 – Geometria dos componentes

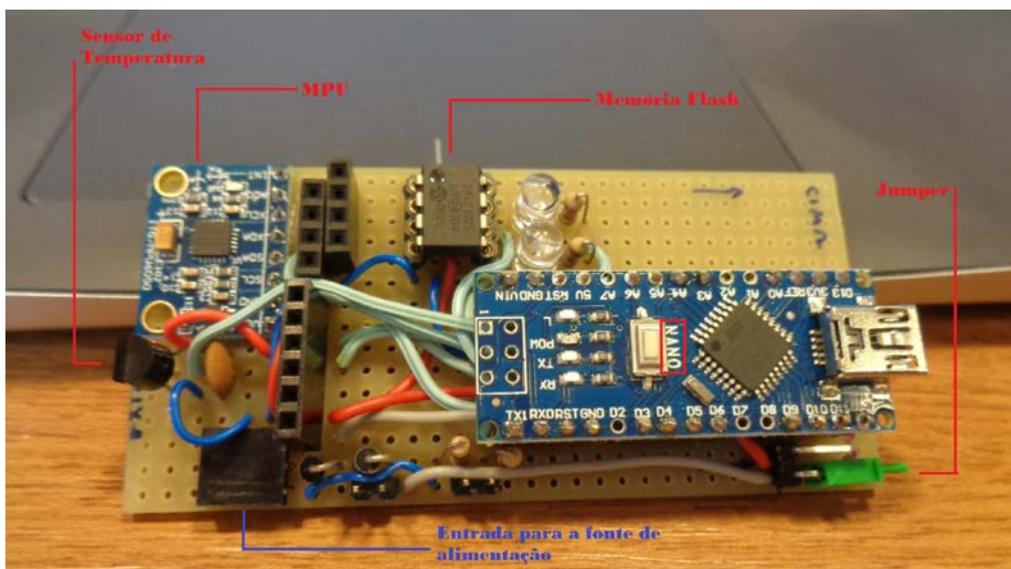


Figura 18 - Esquema com a geometria dos componentes soldados

3.4 Problemas com a alimentação

O primeiro protótipo foi construído para 3 baterias do tipo AAA (1,5 Volts), resultando em 4,5V, que está dentro da faixa de operação da CPU AVR (2,7 a 5,5 V). A intenção era usar um tubo com as dimensões de 15cm comprimento e 2,5cm diâmetro. Entretanto, o dispositivo *bluetooth* parava de funcionar em pouco tempo. A explicação era de que a tensão das baterias caía com seu uso, chegando a ficar abaixo do que era necessário para o HC-05 *bluetooth* funcionar. Apesar da especificação deste componente indicar que ele opera na faixa de 3,6 V até 6,0 V ele, de fato, parava de funcionar quando a tensão caía alguns décimos de volts. Uma segunda hipótese é a de que o dreno de corrente do HC-05 (40 a 50 mA), aliado ao consumo dos demais componentes, ultrapassava a capacidade das 3 baterias AAA.

Surgiu a necessidade de se usar baterias AAA. Isto implicou no uso de um tubo maior. No mercado encontrado um tubo semelhante ao anterior, mas com 16cm de comprimento e 4cm de diâmetro. Porém 4 baterias AAA resultam em 6,0V (4,0 x 1,5V). Essa tensão, evidentemente está acima do que CPU suporta. Por isso foi adicionado um diodo em série com a alimentação. Como o diodo de silício oferece uma queda de tensão de 0,7 V[17], a resultante fica em 5,3V (6,0V - 0,7V). A tensão de 5,3V está dentro da faixa aceitável pelo processador, cujo limite superior é de 5,5V.

Para surpresa, durante o primeiro ensaio a placa do Arduino Nano queimou. Uma análise cuidadosa explicou o que aconteceu. Apesar do valor nominal indicado nas baterias ser de 1,5 V, quando nova, elas oferecem, na verdade, 1,6 V. Algumas medições indicaram até 1,63 V. Assim, quatro baterias de 1,6 V vão resultar em 6,4 V. Após descontar o 0,7 V de queda de tensão sobre o diodo, o resultado é 5,7 V. Este valor está acima do limite suportado pela CPU AVR do Arduino Nano. A Figura 19 apresenta o esquema desta conexão.

A solução, foi então adicionar um segundo diodo. Agora, a queda de tensão nos diodos é de 1,4 V. Com isso, a tensão entregue à CPU quando as baterias são novas é de 5,0 V (6,4 - 1,4 = 5,0 V). Esta alimentação está mostrada na Figura 20. Pode-se argumentar que existe um desperdício, pois assim que a tensão das baterias começar a cair, devido à descarga, o HC-05 vai parar de funcionar. Em outras palavras, o circuito apenas funcionaria com baterias novas. Para evitar isso, o segundo diodo pode ser removido do circuito ao fechar um *jumper* que faz um curto sobre ele.

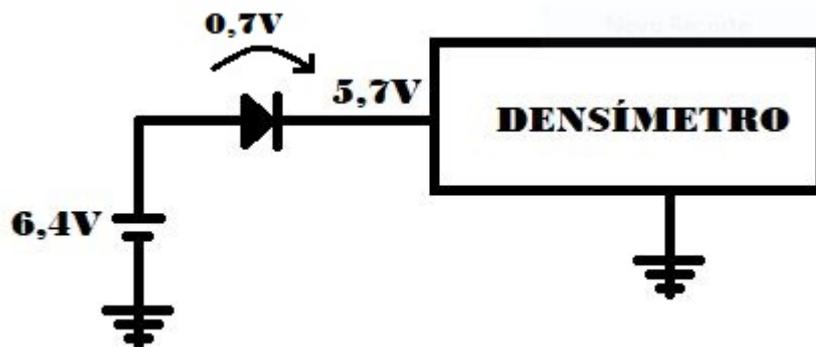


Figura 19 - Esquemático de alimentação do densímetro com apenas um diodo

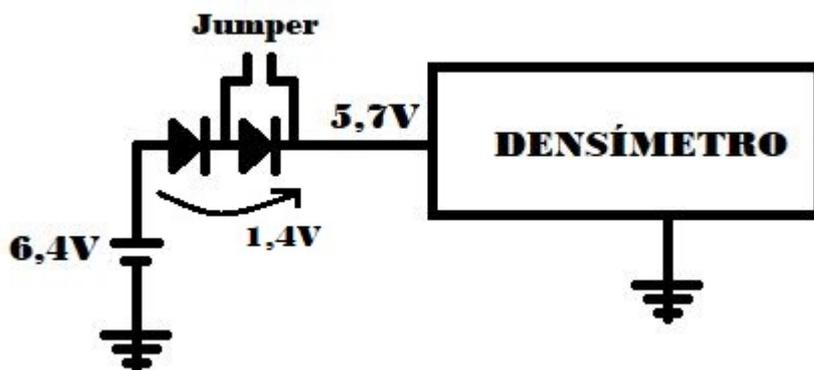


Figura 20 - Esquemático de alimentação do densímetro com dois diodos

3.5 Considerações sobre a memória

Espera-se que em sua versão final o densímetro seja capaz de indicar ao usuário as medições de densidade feita a cada hora. Por enquanto, usa-se a memória EEPROM da CPU AVR para armazenar a distância medida. Essa EEPROM tem o tamanho de 1 KB. Como cada medida consome 2 bytes, o limite de tempo para operação do densímetro é de 512 leituras, ou 21,25 dias. Deseja-se aumentar este período para, no mínimo 30 dias.

A densidade da água destilada a 25°C é de 1g/cm³. Na fabricação de cerveja é comum usar um densímetro manual com escala de densidade ampliada para 1.000. Assim a densidade da água é indicada como 1.000. Uma solução com densidade de 1,020g/cm³ é indicada como 1.020. Os valores típicos de densidade em uma cerveja artesanal vão desde 1.000 até 1.060. Assim, ao invés de armazenar a distância em 16 bits, o processador pode calcular a densidade a armazenar apenas o que excede de

1.000. Assim, cada leitura demandaria apenas 1 byte e, com isso, dobra-se o limite de tempo para 42,5 dias.

Como já foi afirmado, para a fase de desenvolvimento está um uso uma memória Flash de 128 kB. Nesta memória armazena-se todas as 6 leituras de aceleração (3 eixos) e giro (3 eixos) mais a temperatura interna e a temperatura externa medida com LM35DZ. Provavelmente esta memória Flash não estará presente na versão final.

3.6 Desenvolvimento do Software

Todo o desenvolvimento foi feito usando no IDE do Arduino. Como o Arduino Nano possui apenas uma porta serial, que é usada pelo IDE para transferir os programas, nesta fase é necessário remover o dispositivo Bluetooth (HC-05).

Com a realização dos ensaios e das diversas montagens foi ficando clara a necessidade de criar alguma forma de interação com o usuário. Era necessário definir modos de operação. Por exemplo, um modo para fazer as medições durante a fermentação. Outro modo para o densímetro entregar as leituras. Um outro modo para medir e gravar a referência usando água potável.

É claro que não se poderia adicionar botões, pois todo o dispositivo está fechado dentro de um tubo. A solução mais óbvia era usar o Bluetooth, porém, como será mostrado adiante, este dispositivo se mostrou um grande consumidor de energia e foi decidido que ele seria removido durante as medições. Uma solução para substituir o HC-05 é sugerida mais adiante.

Uma opção de comunicação era usar um sensor de luz ou um sensor infravermelho. Essas duas soluções têm a desvantagens de demandar uma fonte de luz externa e a dificuldade na seleção do modo de operação.

A solução simples encontrada foi utilizar o próprio acelerômetro como mecanismo para selecionar as opções de operação do protótipo. Toda a montagem do densímetro é feita de forma a colocá-lo na posição indicada na Figura 14. Durante seu uso, ainda que esteja acompanhando uma fermentação, ele nunca ficará de "ponta-cabeça". A partir dessa premissa, foi possível adicionar no código uma função que permite o usuário se comunicar com o protótipo, girando-o para uma posição extrema, que vulgarmente, pode-se dizer: de ponta-cabeça.

Agora ficou simples: toda vez que o densímetro for colocado de ponta-cabeça ele muda, de forma circular, para o próximo modo de operação. Com essa possibilidade,

foram definidos 7 modos de operação. É claro que na versão final esses modos deverão ser reduzidos. A Tabela 1 apresenta um resumo desses modos de operação. Ao ser ligado, o densímetro sempre inicia no modo 3.

Tabela 1 - Modos de operação do densímetro

Modo	Pisca		Função
	Az	Vm	
0	0	-	Operação: depois de 1 hora inicia uma medida a cada hora
1	1		Densidade = 1000. Aguarda 10 min e grava essa referência
2	2	-	Densidade = 1050. Aguarda 10 min e grava essa referência
3	3	-	Mostrar leituras do MPU e calcular distância
4	-	1	Mostrar conteúdo de EEPROM interna
5	-	2	Mostrar conteúdo da Flash externa
6	-	3	Apagar memórias EEPROM e FLASH

A sinalização do modo de operação é feita com o piscar de um dos dois leds, uma azul e outro vermelho. A cada 2 segundos, um dos leds pisca indicando o modo, de acordo com a Tabela acima. O modo de operação, para não gastar energia é caracterizado pela ausência de sinalização, ou seja, nenhum led pisca. A seguir é feita uma breve descrição de cada modo de operação.

3.6.1 Modo 0: operação

Este é o modo a ser usado para acompanhar a fermentação. Nenhum dos leds pisca para economizar bateria. Ao entrar neste modo, o densímetro espera 1 hora e inicia as medições de densidade a cada hora. Para evitar ruído, cada medida gravada é na verdade a média de uma série de 200 medidas sequenciais. Como ainda se trata de um protótipo, a distância calculada é grava na EEPROM da CPU AVR e as leituras de aceleração, giro e temperatura gravadas na memória Flash externa.

3.6.2 Modo 1: Gravação da referência em 1.000

Após selecionar este modo, o usuário deve mergulhar o densímetro em um recipiente com água potável e aguardar. O programa aguarda 15 minutos e em seguida calcula a média de uma série de medidas que será usada como referência. Esta

referência (projeção da gravidade nos 3 eixos do acelerômetro) é gravada nos endereços de 0 até 5, tanto da EEPROM como da Flash externa.

Após essa gravação, o programa fica mostrando a cada segundo a distância da posição atual em relação ao valor de referência.

3.6.3 Modo 2: Gravação da referência em 1.050

Tudo se passa igual ao modo anterior, entretanto do usuário deve mergulhar o densímetro em uma solução previamente preparada com densidade de 1.050. Este modo foi colocado para fazer uma segunda medição e verificar o ajuste da curva de inclinação x densidade. Sua finalidade é para teste do deslocamento da curva.

3.6.4 Modo 3: Mostrar leituras e calcular distância

Quando colocado neste modo, o densímetro faz uma leitura por segundo e transmite todas as informações de aceleração e densidade. Este modo é muito útil para levantar a curva de distância (inclinação) versus densidade. Como ele é um modo inócuo, é o modo escolhido para iniciar o densímetro assim que é ligado.

3.6.5 Modo 4: Mostrar conteúdo da EEPROM

Neste modo o densímetro transmite todo o conteúdo da EEPROM, cada byte apresentado em hexadecimal e ainda monta a palavra de 16 bits para apresentar a distância que foi gravada. Serve para apresentar as medidas realizadas durante uma fermentação.

3.6.6 Modo 5: Mostrar conteúdo da FLASH

Neste modo o densímetro transmite todo o conteúdo da Flash externa, cada byte apresentado em hexadecimal e ainda monta a palavra de 16 bits para apresentar a distância que foi gravada.

3.6.7 Modo 6: Apagar memórias EEPROM e FLASH

Ao entrar neste modo, o densímetro envia um alerta de apagamento das memórias e 3 minutos. Depois, se o usuário não mudar de modo, o programa apaga todas as memórias.

Capítulo 4 – Ensaios com o Densímetro

O protótipo foi desenvolvido foi submetido a uma série de ensaios. Alguns ensaios tiveram como objetivo levantar a curva de distância versus densidade. Um outro ensaio mediu a duração das baterias e um terceiro acompanhou uma fermentação durante quase 17 dias. Na figura 21 é possível observar um dos ensaios realizados.



Figura 21 - Foto mostrando o densímetro submetido ao ensaio para levantar a curva de densidade.

- 4.1 - Ensaio para levantar a curva de densidade, realizado 4 com baterias AAA em água salobra com adição de açúcar.
- 4.2 – Ensaio para levantar a curva de densidade, realizado 4 com baterias AA Foi usado um flutuador auxiliar e realizado em água salobra.
- 4.3 - Ensaio com 4 baterias AA e flutuador auxiliar, acompanhando o processo de fermentação de cerveja durante 17 dias.
- 4.4 - Ensaio para verificar o consumo de cada componente do densímetro
- 4.5 - Ensaio de duração de bateria

4.1 Ensaio I - Calibragem com 4 baterias AAA

Neste primeiro ensaio, o densímetro foi alimentado com 4 baterias AAA. Como elas são leves, foi necessário adicionar um lastro feito com bolinhas de chumbo. O protótipo foi imerso em um aquário preenchido com água de torneira à temperatura ambiente. Em seguida adicionou-se sal gradativamente. A intenção era que a densidade

chegasse o mais alto possível. A saturação da solução foi a indicação para finalizar o experimento. No entanto, antes do final do experimento o sal disponível acabou e foi necessário utilizar o açúcar. O ensaio foi acompanhado com um densímetro tradicional. A adição de sal (ou açúcar) foi paulatina de forma a se atingir os valores de 1.000, 1.010, 1020, ..., 1.100.

A Tabela 2 apresenta o resultado deste experimento. Ali estão listadas as leituras nos 3 eixos e o cálculo da distância. As leituras tabeladas são o resultado da média 64 leituras sequenciais. É necessário ressaltar que nesse primeiro ensaio, os modos de operação ainda não haviam sido implementados; por isso, ao ligar o densímetro, o mesmo imediatamente calculou o vetor de referência. Ao ser colocado dentro do aquário, a posição de flutuação foi diferente da posição em que o instrumento se encontrava quando foi iniciado. Destarte a variável Dist da primeira linha, não é igual a zero.

Tabela 2 - Medidas dos eixos e da distância em função da densidade

Densidade	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z	Dist
1.000	0014747	-003388	0006859	0016463
1.010	0014246	-003970	0007543	0018230
1.020	0013076	-005088	0008729	0021704
1.030	0011717	-006279	0009751	0025276
1.040	0010257	-007215	0010566	0028487
1.050	0009128	-007787	0011060	0030682
1.060	0008554	-008132	0011210	0031751
1.070	0008025	-008395	0011362	0032695
1.080	0007479	-008622	0011558	0033664
1.090	0007110	-008559	0011852	0034264
1.100	0006777	-008243	0012205	0034634

A Figura 23 apresenta a curva da densidade versus distância. Nota-se um comportamento próximo do linear, mas não poderia ser aproximado por uma reta. Parece haver dois segmentos de reta. Na extrema direita da curva há um leve achatamento. Isso provavelmente ocorreu porque a adição do açúcar causou certa instabilidade na densidade. Começou a acontecer uma decantação. Toda vez que o açúcar era adicionado, era necessário agitar a solução com o intuito de melhor dissolvê-lo. Nesse momento a densidade subia. Porém, pouco tempo depois da agitação da mistura, o açúcar começava a decantar no fundo do aquário e a densidade da solução voltava a cair. Essa era uma indicação de que a mistura estava entrando em saturação.

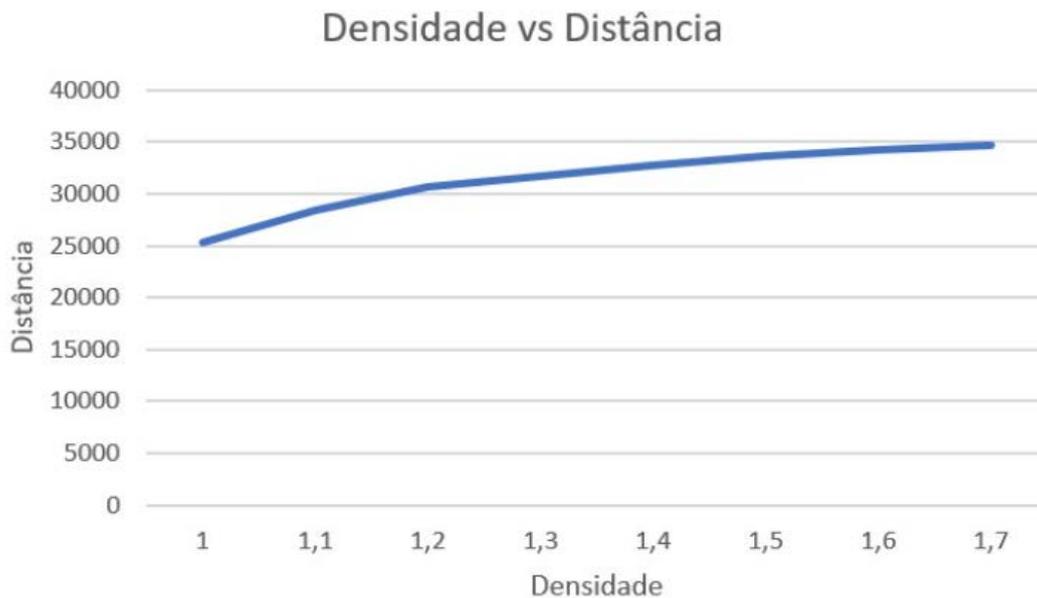


Figura 22 - Distância x Densidade.

Apresentam-se em seguida as medidas coletadas em cada eixo do acelerômetro. Tendo em vista que a geometria do objeto, apesar de uniforme por fora, não é balanceada por dentro, fazendo com que ele flutue de maneira não alinhada ao módulo MPU. Por isso, alguns eixos têm variações muito limitadas; enquanto outros eixos possuem um comportamento mais próximo do linear. A mais importante, devido a geometria é a do eixo x, vide Figura 23. Esperava-se que ela ficasse próxima de uma linha reta, mas isso não aconteceu. As medidas coletadas nos eixos y e z, como podem ser vistas nas figuras 24 e 25, podem variar pois esses eixos estão perpendiculares ao maior comprimento do tubo. Um pequeno giro do tubo para se acomodar em uma nova densidade vai alterá-las.

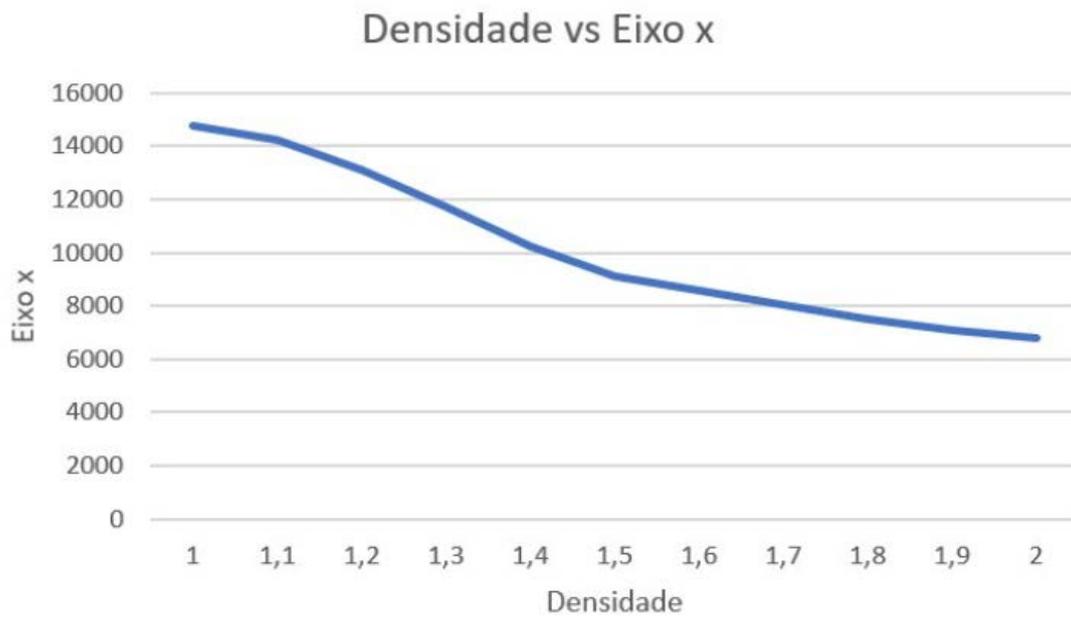


Figura 23 - Eixo X vs Densidade

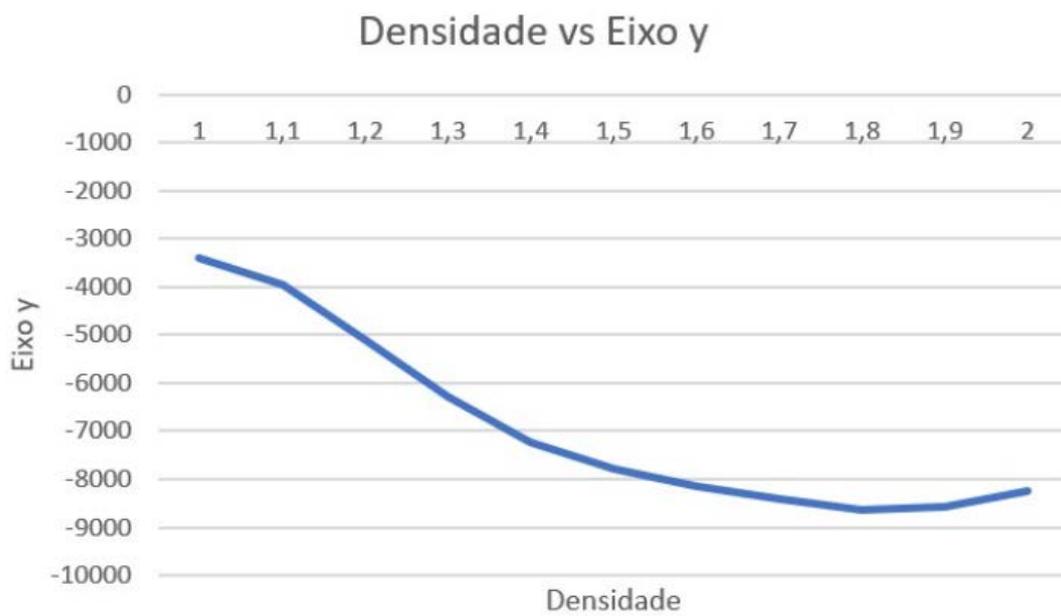


Figura 24 - Eixo Y vs Densidade.

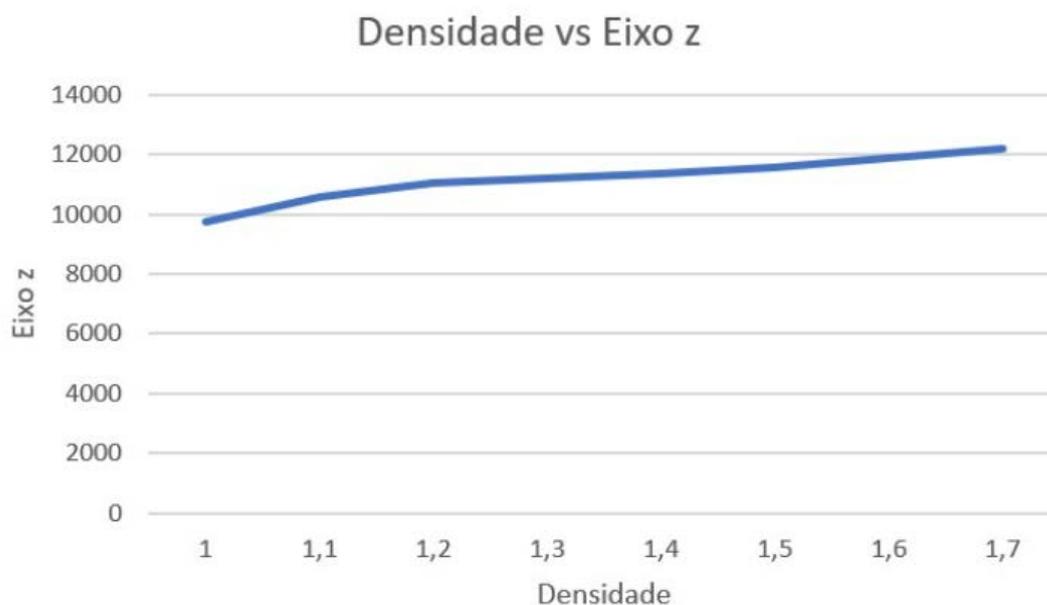


Figura 25 - Densidade vs Eixo Z.

4.2 Ensaio II – Calibragem com 4 baterias AA

Este foi um ensaio preparatório para o densímetro ser usado durante uma fermentação. Havia insegurança quando à duração das baterias. Para não correr o risco de que elas ficassem exauridas durante o longo período da fermentação, optou-se por 4 baterias AA. Depois de montado, o densímetro revelou-se muito pesado. Para contornar o problema foi adicionado um flutuador auxiliar, que nada mais é que o tubo usado nas primeiras versões. O esquema pode ser visto na Figura 26.



Figura 26 - Foto do densímetro com o flutuador auxiliar.

Quando essa calibração foi realizada, o programa embarcado já estava mais desenvolvido. O densímetro foi colocado no modo 3 pois neste modo ele envia pelo Bluetooth uma leitura a cada segundo. Assim, para cada densidade, várias medidas foram coletadas. A sequência do experimento foi um pouco diferente. A cada adição de sal, uma amostra da solução era coletada e medida com um densímetro tradicional.

Antes de iniciar esse ensaio, o densímetro foi colocado no modo 1 e imerso em água potável. Esse passo foi para estabelecer a leitura de referência, ou seja, a referência em água com densidade 1.000. O valor dessa referência foi armazenado na EEPROM da CPU e usado para calcular a distância na etapa de calibração.

A Figura 27 apresenta o gráfico das componentes da aceleração da gravidade em cada um dos 3 eixos (ax, ay e az). A linha rotulada “dist” representa a distância calculada entre a leitura realizada e o valor de referência. Como foram feitas diversas leituras em cada densidade, surgiram diversos patamares.

Existem duas linhas horizontais no topo da figura 27. Uma corresponde à soma vetorial das 3 componentes da aceleração, o que deve resultar na aceleração da gravidade em Brasília, que é igual a 9,7886g (m/s²)[18]. A segunda linha, completamente horizontal indica o valor que seria esperado e que foi obtido por ocasião da calibração em 1.000. Vê-se que as duas retas estão bastante parecidas

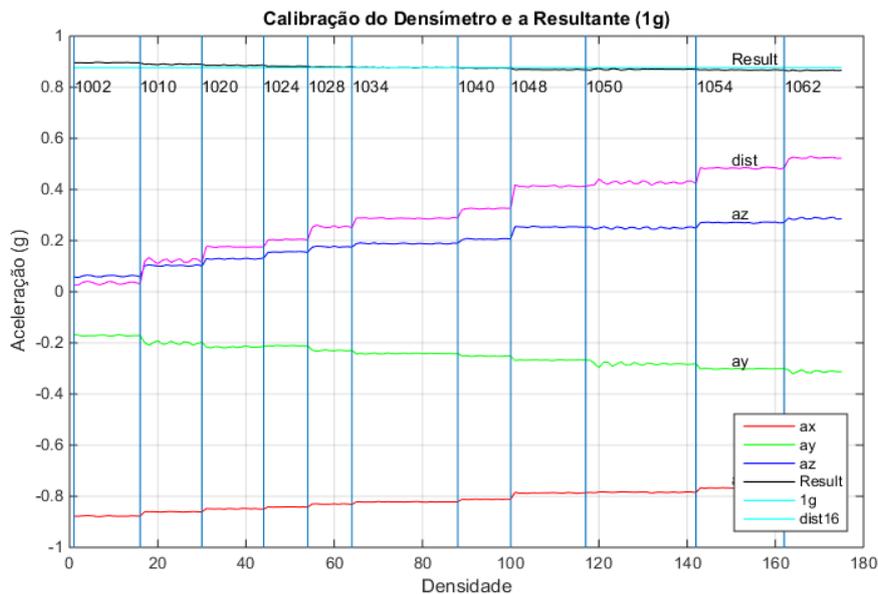


Figura 27 - Gráfico as leituras dos 3 eixos (ax,ay e az), e distância e o cálculo da soma vetorial dos 3 eixos, que deve resultar na aceleração da gravidade em Brasília

É importante comentar que após a adição de sal se fazia necessário agitar a solução para garantir que o sal fosse completamente dissolvido e depois aguardar alguns minutos para que o líquido entrasse em repouso.

Como isso, após a obtenção das leituras, existiam duas possibilidades. A primeira era usar o último valor da leitura em cada densidade, pois este seria a leitura feita com a solução mais estável. Já a segunda possibilidade seria calcular o valor médio das leituras coletadas em cada patamar de densidade.

A Figura 28 apresenta o gráfico relacionando a densidade com o último valor medido. Cada asterisco representa uma leitura e a linha inclinada a aproximação por uma reta ligando apenas o primeiro e o último ponto. O coeficiente desta reta é igual a -138,05. Nota-se que os pontos se aproximam de uma reta, acredita-se que a geometria, com o emprego do flutuador auxiliar pode ter ajudado na linearidade. Não correspondeu às medidas feitas durante o primeiro ensaio.

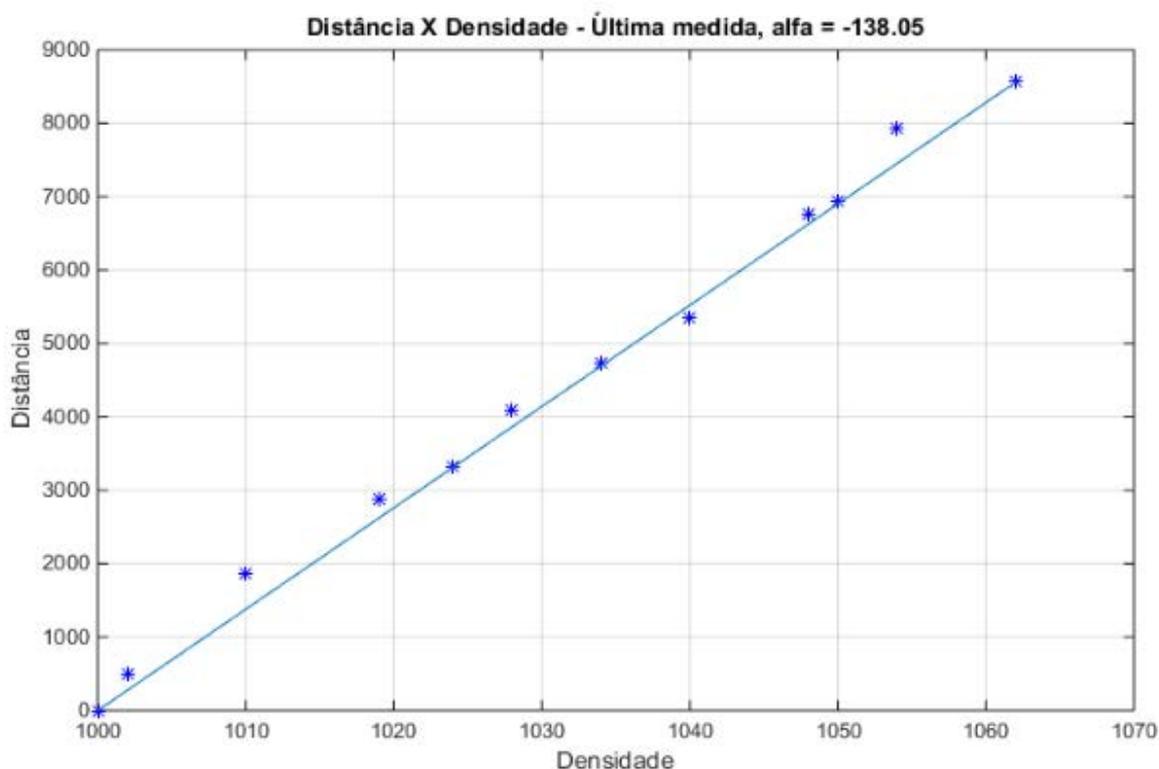


Figura 28 - Gráfico relacionando a densidade com a distância, usando o último valor da leitura em cada patamar.

A Figura 29 apresenta o gráfico usando a média das leituras em cada patamar. É possível ver que eles são muito próximos e coeficiente da reta ficou em -138,36. A

grande conclusão é que os dois gráficos são muito parecidos. No ensaio de fermentação, descrito a seguir usou-se o gráfico da Figura 29 para obter os valores de densidade.

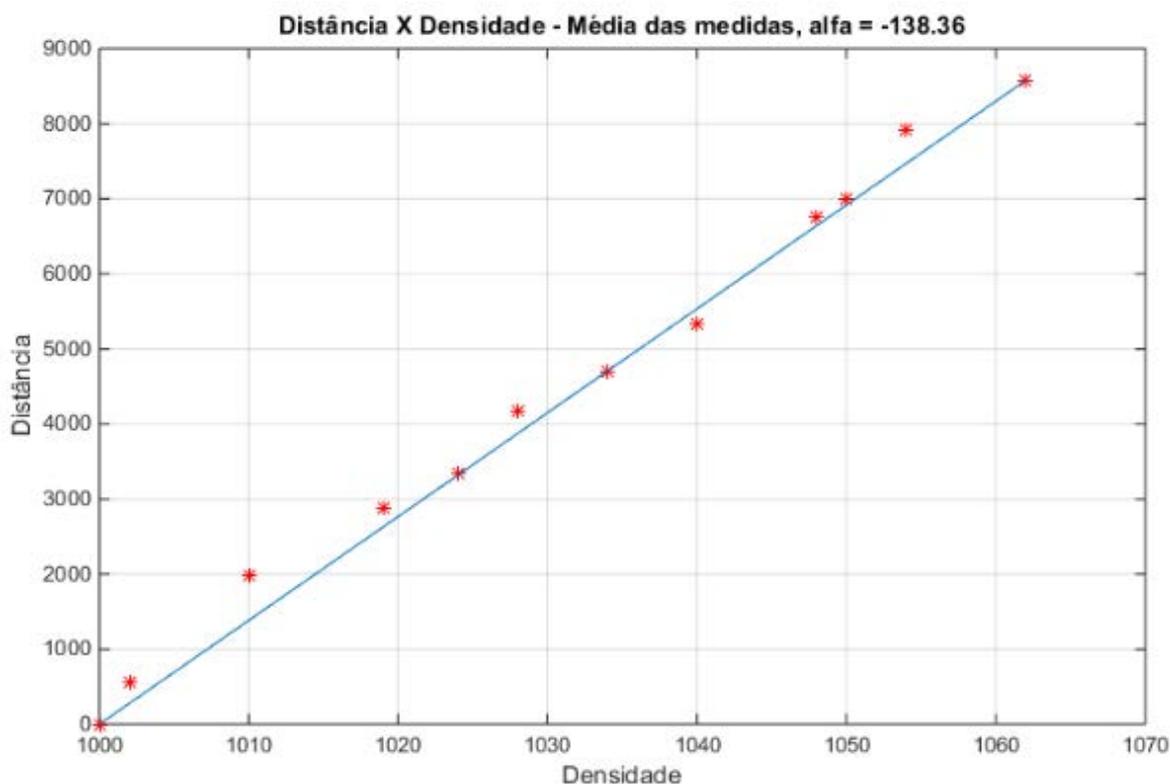


Figura 29 - Gráfico relacionando a densidade com a distância usando o valor médio das leituras feitas em cada patamar de densidade.

A tabela 3 apresenta o valor médio da distância, usadas para construir o gráfico da Figura 30. Nessa tabela está apresentada a distância usando representação com diferentes quantidades de bits

- Dist16 = 16 bits
- Dist 8 = 8 bits
- Dist 6 = 6 bits
- Dist 4 = 4 bits

A intenção é verificar a possibilidade de usar uma quantidade de bits menor que 16. Parece que a representação com 8 bits pode ser adequada. A correlação também foi calculada a partir das informações da tabela 3, utilizando a função CORREL do *software* Excel. Correlação: 0,996454. A função CORREL faz o cálculo do R de Pearson.

Tabela 3 - Medidas das médias da distância em função da densidade

Densidade	dist16	dist8	dist6	dist4
1002	549,9	1,6	0	0
1010	1991,2	7,4	1,3	0
1020	2875,1	11	2	0
1024	3345,2	12,6	3	0
1028	4163,9	16	4	1
1034	4707,6	18	4	1
1040	5326,6	20	5	1
1048	6766,1	26	6	1
1050	6989,3	26,8	6	1
1054	7923,2	30,45	7	0,95
1062	8578,6	33	8	2

Comparando a última medida com a média das medidas realizadas em cada densidade. Foi feita com a intenção de verificar se o movimento do líquido chegou a perturbar as medidas. É de se notar a proximidade entre os pontos, o que leva a concluir que as medidas de calibração foram bem feitas.

4.3 Ensaio III – Teste com uma fermentação real

Este ensaio foi realizado durante a fermentação de uma cerveja por um período de 17 dias. Como já foi afirmado, foram usadas 4 baterias AA, pois havia o receio de que as baterias AAA não durassem tanto tempo. Com isso o densímetro ficou pesado e foi necessário um flutuador auxiliar.

Ao final do período de fermentação, o densímetro foi recuperado e se constatou que as baterias ainda tinham bastante carga. Os dados, porém, vieram um pouco diferente do que seria esperado. A Figura 30 apresenta o gráfico de densidade ao longo dos 21 dias. A densidade inicial medida com um densímetro tradicional foi de 1045 e a final foi de 1016. Assim, a curva de densidade deveria ter iniciado em 1045 e finalizado em 1016. Bem diferente do que está mostrado no gráfico. Pode-se ver no gráfico que após o segundo dia, o decaimento da curva está bem semelhante ao que seria esperado, porém estabilizando em 1020 ao invés de 1016. O que surpreendeu foram as medidas realizadas durante os 2 primeiros dias.

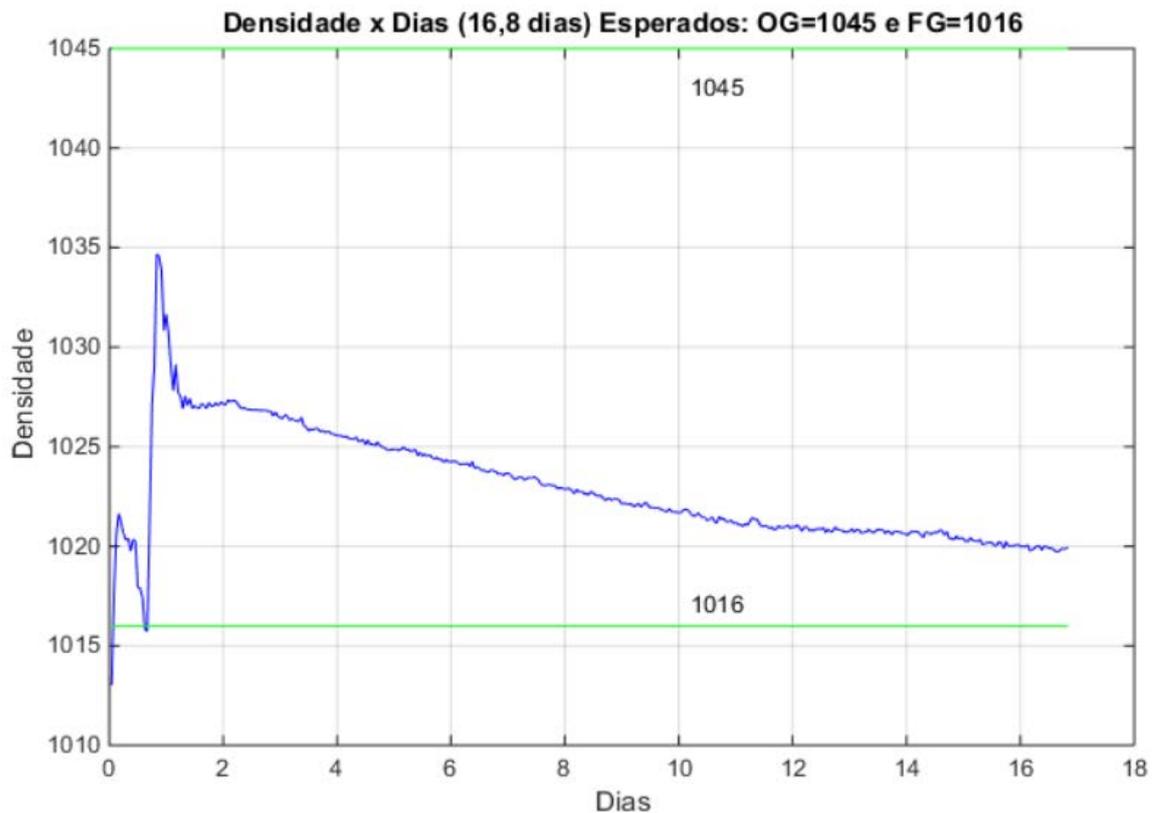


Figura 30 - Curva de densidade x tempo, durante um período de 17 dias.

Para poder comentar algo sobre o comportamento durante esses dois primeiros dias, é importante visualizar o funcionamento do densímetro. Em um líquido de baixa densidade, o densímetro se aproxima da horizontal, ou seja, “ele afunda”. Já quando o líquido é mais denso, ele se aproxima da vertical, ou seja, “ele flutua”. Observando o gráfico desses 2 primeiros dias, nota-se que no início o densímetro flutuou marcando 1012, depois começou a afundar até marcar um pouco mais de 1020, e voltou a flutuar lentamente até 1016, quando novamente afundou até chegar aos 1035. A partir daí, apesar do erro nas medidas absolutas, o decaimento da curva está bem próximo do que seria o esperado, ou seja, o densímetro foi afundando lentamente.

A Figura 31 apresenta um gráfico graduação segundo a aceleração da gravidade “g”, que mostra as leituras colidas pelos 3 eixos do acelerômetro. A soma vetorial dessas 3 leituras deve resultar na aceleração da gravidade, que está traçada no topo da figura e rotulada por “1g”. Nota-se um comportamento estranho durante os 2 primeiros dias. Isto é sugestão de que, mais do que imprecisão ou erros de leitura, deve ter havido uma perturbação externa.

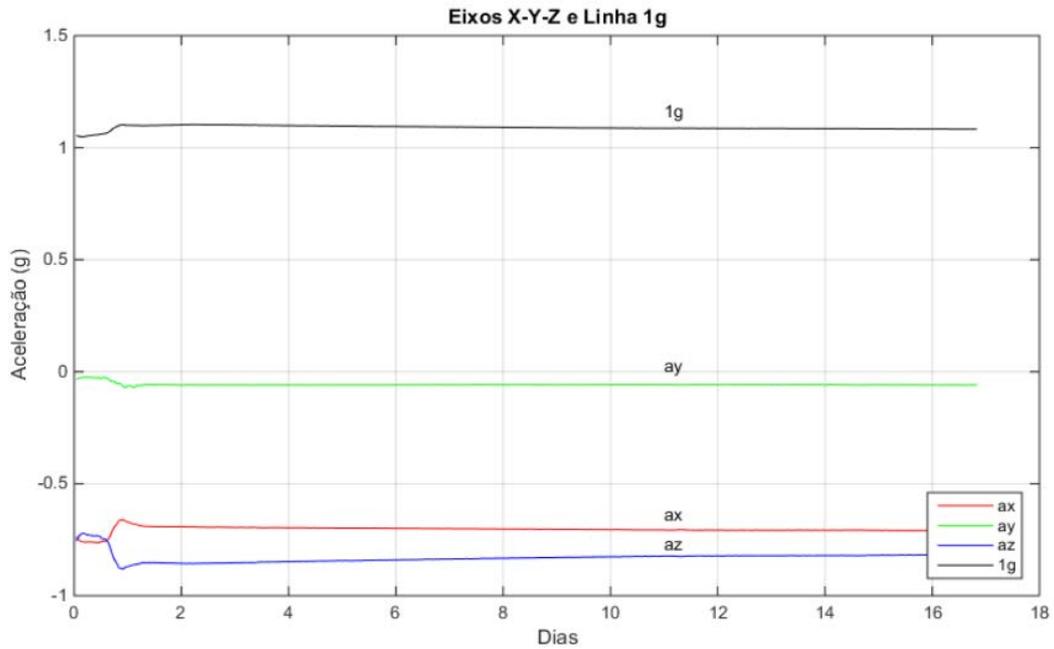


Figura 31 - Gráfico mostrando as leituras dos 3 eixos do acelerômetro e resultante vetorial em “1g”, ao longo dos 17 dias.

Para tentar entender o que aconteceu, é interessante estudar com detalhes a leitura de cada eixo. A Figura 32 apresenta as leituras de aceleração do eixo x (ax), que é o principal eixo do densímetro. Fica claro o comportamento constatado: o densímetro inicia flutuando, em seguida afunda para voltar a flutuar e em seguida entrar no comportamento esperado. Há uma ligeira diferença que será comentada um pouco mais adiante

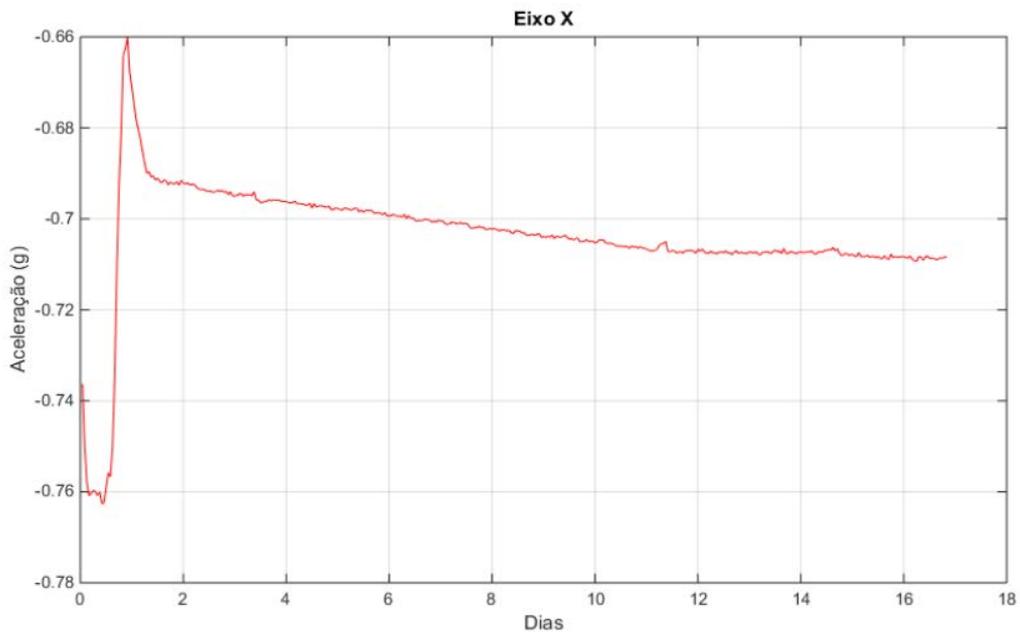


Figura 32 - Gráfico mostrando as leituras do eixo X do acelerômetro ao longo dos 17 dias

As leituras nos outros dois eixos (a_y e a_z), não deveriam ter grande importância. Pela geometria, a excursão deveria ser pequena. Uma variação grande só seria esperada no caso de uma rotação do densímetro ao longo de seu eixo. Neste caso, a leitura sobre um dos eixos deveria diminuir enquanto a leitura sobre o outro eixo aumentaria. Pelo que se observa na Figura 33 não houve rotação. A variação brusca inicial está no mesmo sentido em ambos os gráficos. Após essa perturbação, as medidas ao longo do eixo y ficaram praticamente constantes e as medidas ao eixo z apresentaram uma lenta variação.

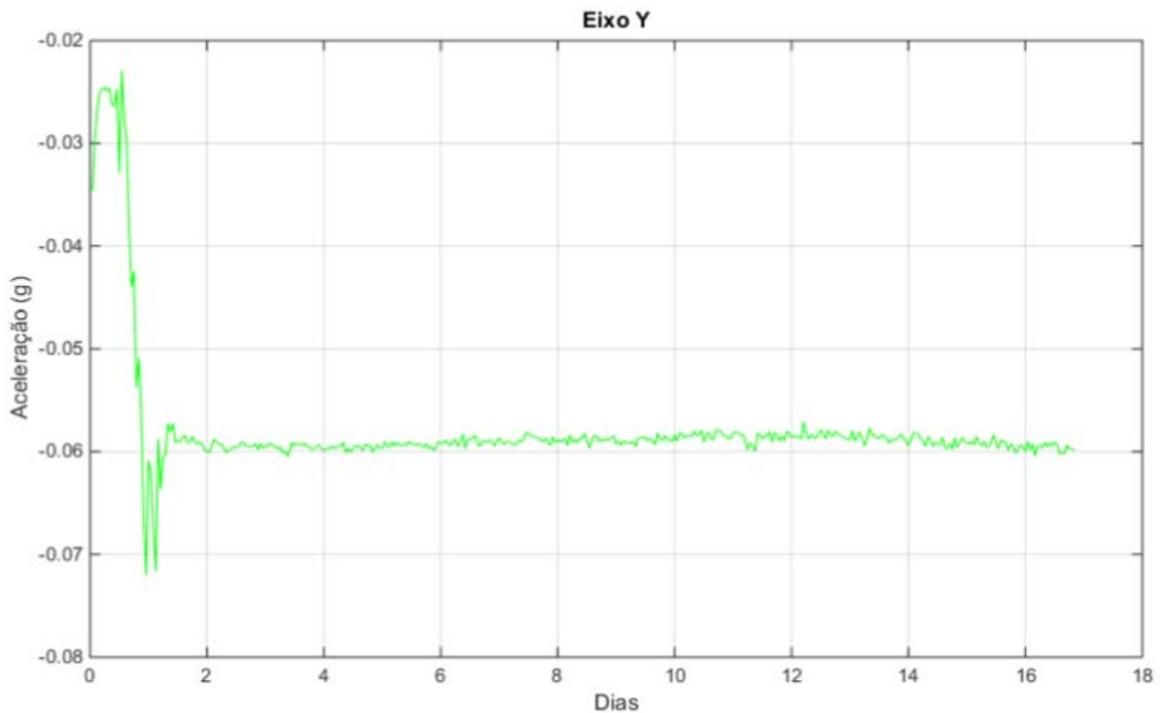


Figura 33 - Gráficos mostrando as leituras nos eixo y ao longo dos 17 dias.

A principal hipótese para tentar explicar esse comportamento estranho durante os dois primeiros dias tem a ver com a intensa produção de gases no início dias da fermentação. Essa quantidade de gases poderia provocar a adesão de bolhas nas paredes do densímetro, o que alteraria sua fluatuabilidade. Na Figura 34 nota-se duas variações bruscas (linhas quase verticais) indicando um “afundamento” do densímetro. Seriam essas duas variações provocadas por um súbito desprendimento das bolhas? Outra possibilidade é que a quantidade de dióxido de carbono liberado durante os primeiros estágios da fermentação tenha sido tão intensa a ponto de causar perturbações na flutuação do densímetro. Ainda é necessário investigar.

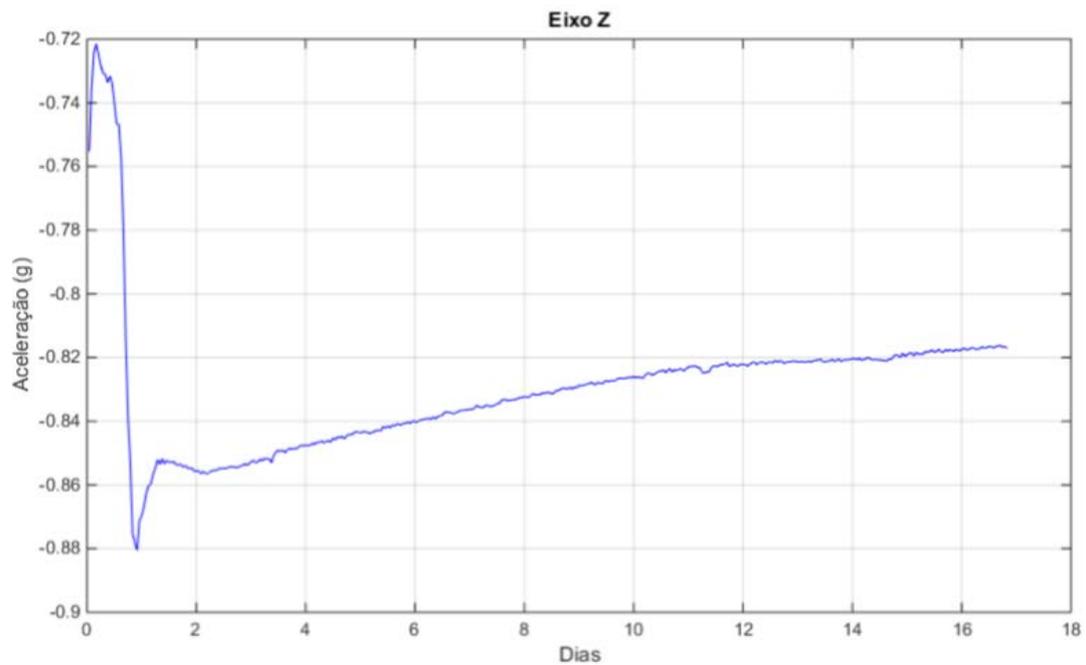


Figura 34 - Gráficos mostrando as leituras no eixo z, ao longo dos 17 dias.

A Figura 35 mostra as primeiras 48 horas de leituras segundo o eixo x. É possível observar com detalhes o comportamento atípico e as variações bruscas. A hipótese da adesão de bolhas, em parte, pode explicar esse comportamento.

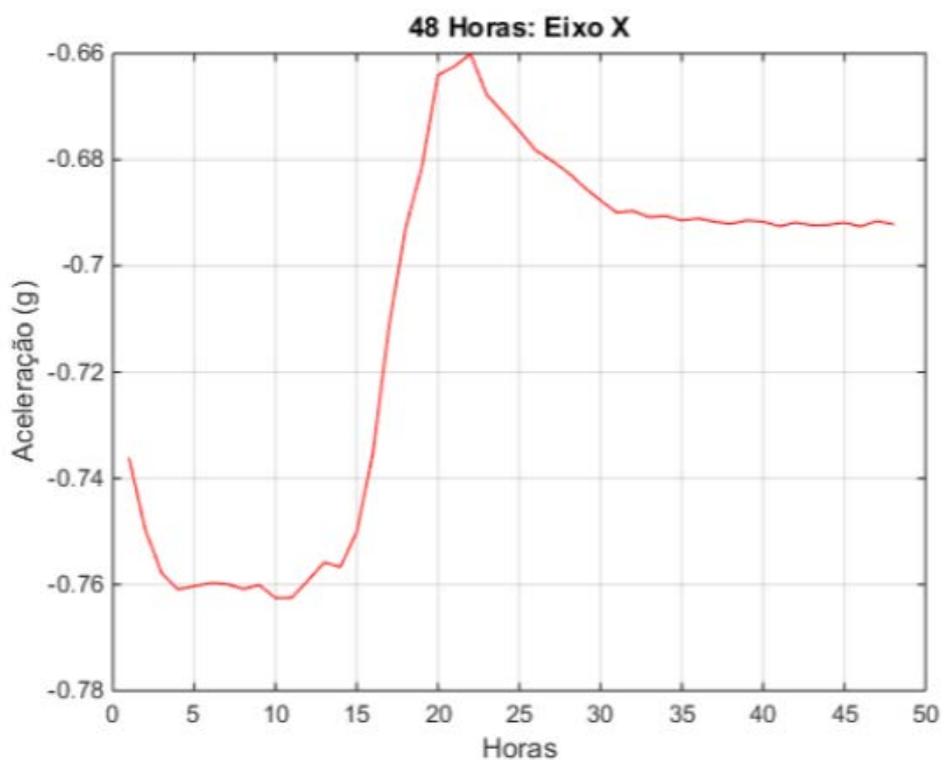


Figura 35 - Leituras de aceleração no eixo x durante as primeiras 48 horas.

A Figura 36 apresenta a projeção da aceleração da gravidade no eixo x (ax) e a curva de densidade durante as primeiras 48 horas. Ambas curvas foram escalonadas para se ajustarem entre 0 e 1. Isto foi feito para facilitar a comparação, já que o eixo x é o mais importante para o densímetro. Durante as primeiras 15 horas pode-se observar que as duas curvas apresentam um comportamento oposto. Na verdade, esta oposição é apenas aparente. Como o cálculo da densidade é feito com valores absolutos, o resultado sempre é positivo. Assim, essa curva que parece subir, está na verdade descendo, acompanhando o eixo ax. Nota-se na 15ª hora que a curva se inverte e começa a acompanhar ax.

Dois pontos ainda não foram compreendidos. Na primeira hora, como pode ser observado na figura, o registro de densidade (dist) foi igual a zero, o que indica que neste momento a densidade era igual ao valor de referência (1.000). Isto é um absurdo, já que a densidade inicial é sabida ser igual a 1.046. Da 16ª hora até 20ª há uma variação brusca, depois da qual o densímetro passa a apresentar o comportamento esperado.

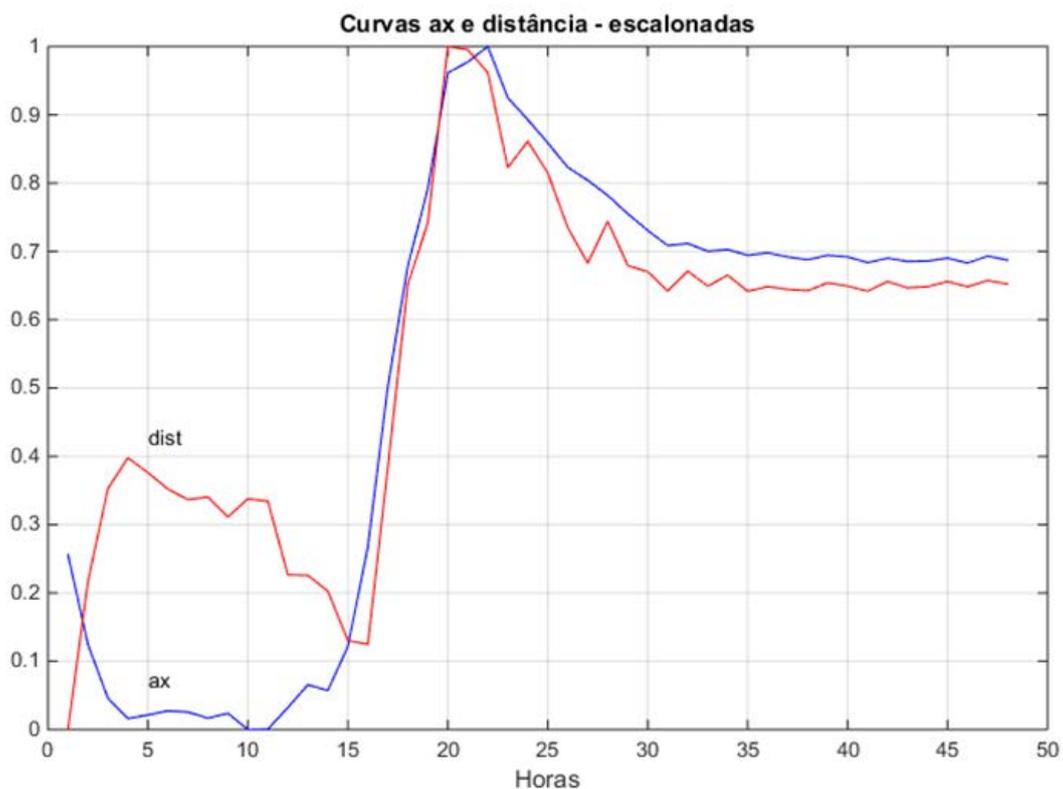


Figura 36 - Curvas da aceleração da gravidade no eixo x (ax) e a curva da densidade (dist) nas primeiras 48 horas. Ambas as curvas foram escalonadas para excursionar entre 0 e 1.

As Figuras 37, 38 e 39 apresentam a projeção da aceleração da gravidade nos planos “x-y”, “x-z” e “y-z”. Essas projeções foram feitas com a intenção de se visualizar

em 3 dimensões o que aconteceu no início da fermentação. Os números que aparecem nessas figuras indicam a hora da medida e assim permitem seguir a evolução das curvas em cada plano. Em todas as figuras, nota-se uma variação brusca entre as horas de número 10 e 20.

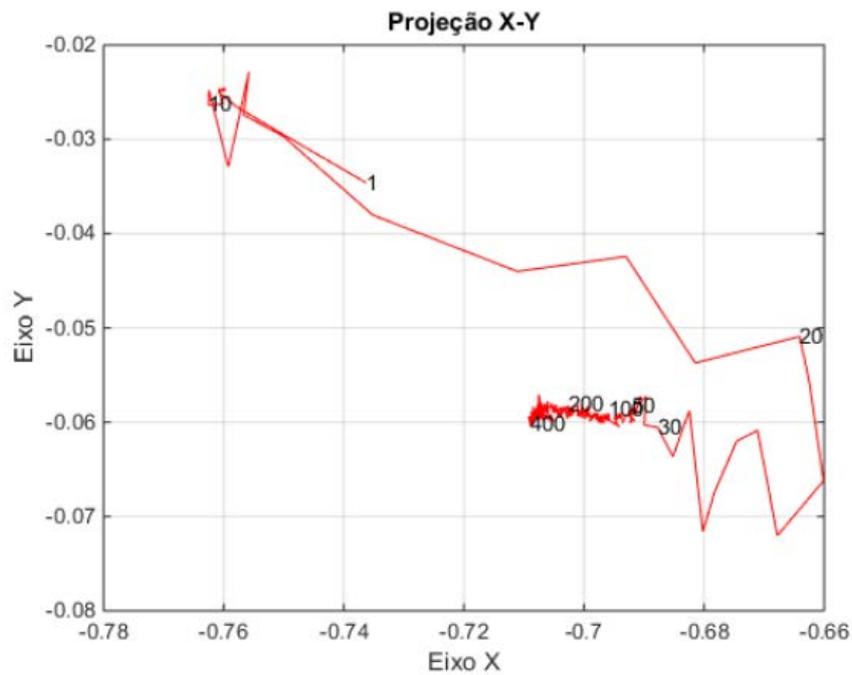


Figura 37 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano x – y.

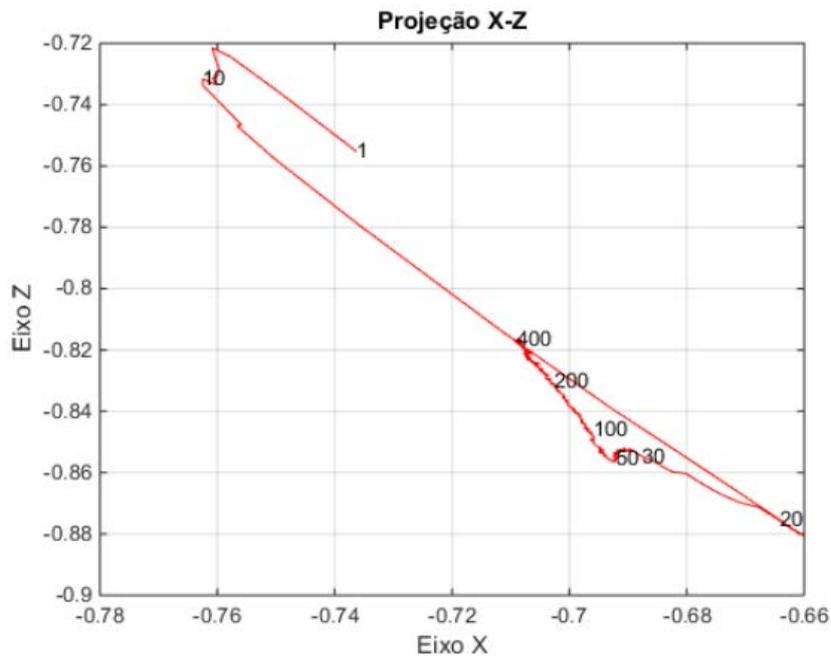


Figura 38 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano x – z.

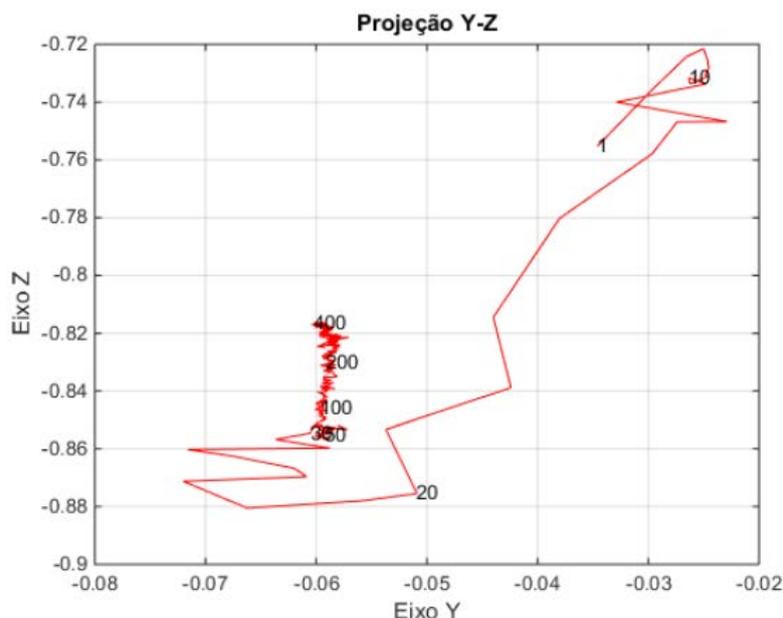


Figura 39 - Projeção das medidas de aceleração da gravidade no plano y – z.

Ainda com a intenção de melhor entender o comportamento, a Figura 40 apresenta um gráfico tridimensional da posição da aceleração da gravidade determinada segunda as leituras obtidas nos 3 eixos. Cada reposicionamento do densímetro dentro líquido, implica numa nova direção para a aceleração da gravidade. Nota-se, novamente, duas variações bruscas. Uma variação no instante inicial (hora 1) e uma súbita variação entre as horas 10 e 25.

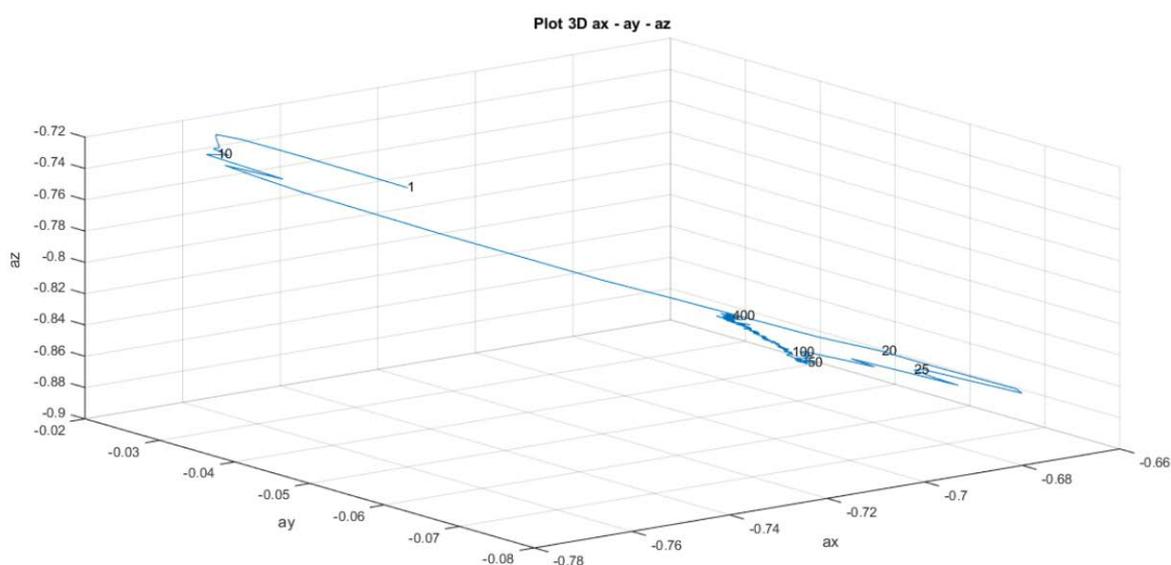


Figura 40 - Gráfico tridimensional indicando a posição da aceleração da gravidade com a medidas colhidas nos 3 eixos.

Apesar de todas as conjecturas, ainda não se conseguiu explicar o comportamento inicial (48 horas) que foi completamente diferente do esperado. Depois deste início, apesar do erro de escala, as medidas foram bem coerentes. Tudo isso sugere a necessidade de novos ensaios. Seria interessante um segundo ensaio usando 4 baterias AAA. Isto dispensaria a necessidade do flutuador externo. Além disso, como a memória Flash externa é grande, poder-se-ia aumentar a taxa de medição. Uma outra sugestão mais drástica é a incorporação de um vibrador para forçar o desprendimento das bolhas. Na hipótese de isso acontecer, ele seria acionado antes de cada medição. Entretanto implica num aumento de consumo.

A seguir são apresentadas algumas fotos do densímetro ao ser retirado de dentro do fermentador, vide Figura 41 e 42.



Figura 41 - Foto do densímetro após os 17 dias de fermentação.



Figura 42 - Foto do densímetro após os 17 dias de fermentação.

4.4 Ensaio IV – Testes para verificar o consumo dos componentes

O consumo de bateria é um ponto crítico para este projeto, por isso foi feito um ensaio de consumo de corrente com a adição ou remoção dos diversos componentes do densímetro. A Tabela 4 apresenta o resumo das medidas realizadas. Como a tensão de alimentação pode ser considerada constante, apenas a medida do consumo de corrente foi usada para caracterizar o consumo.

Tabela 4 - Resumo das medidas realizadas

Seq	CPU	MPU	Flash	HC-05	Timers e ADC	Corrente mA
1	16 MHz	Estado Inicial	-	-	-	15,8
2	1 MHz	Estado Inicial	-		-	9,8
3	Power Save	Estado Inicial	-		-	9,8
4	1 MHz	MPU acorda	-		-	13,3
5	1 MHz	MPU dorme	-		-	9,8
6	1 MHz	Estado Inicial	No soquete		-	10,0
7	1 MHz	Estado Inicial	-	No soquete	-	52 ~ 54
8	1 MHz	Estado Inicial	No soquete	No soquete	-	52 ~ 54
9	1 MHz	Estado Inicial	No soquete	-	Configurados	10,5

A linha de número 1 indica o consumo do Arduino Nano, sem fazer qualquer intervenção para minimizar o consumo, portanto, operando em 16 MHz, que é a frequência nominal de seu relógio. Vê-se que nessa condição ele consome 15,8 mA. Uma ação simples para minimizar o consumo é reduzir a velocidade do relógio. Como o densímetro não precisa realizar grandes operação, considerou-se viável a operação em 1 MHz (linha 2) e com isso o consumo de corrente caiu em 1/3. Uma outra ação simples para economizar energia é usar os modos de baixo consumo. Neste ponto parece haver um problema na programação pois a ativação do modo “*Power Save*” em nada alterou o consumo de corrente. Este ponto será verificado nas versões futuras.

Sobre o consumo do acelerômetro, o MPU, a diferença entre as linhas 4 e 5 permite concluir que quando ligado ele consome 3,5 mA (o manual indica 3,9 mA). Ao ser colocado para “dormir” o consumo deve cair para 500 μ A, que é indicado pelo seu manual. Não foi possível verificar diretamente o consumo isolado do MPU, pois isto implicaria em remoção dos fios de alimentação deste dispositivo, o que poderia comprometer o funcionamento do densímetro. Numa versão futura poderá ser incluído um jumper especial só para medir a corrente consumida pelo MPU. Pode-se concluir que o MPU não é um problema para a duração das baterias do densímetro.

A comparação entre as linhas 5 e 6 permite concluir que a memória Flash externa consome 200 μ A, o que também é um valor baixo e não deve ser preponderante para a duração da bateria.

Como os ensaios já pareciam indicar, o grande consumidor de energia deste projeto é o dispositivo Bluetooth HC-05. Pela diferença entre as linhas 6 e 7 é possível concluir que ele consome perto de 40 mA. Não foi possível medir o valor exato, pois o consumo sempre ficou oscilando entre dois limites. Entretanto, é possível concluir que seu consumo está perto de 40 mA. Algo 4 vezes maior que o consumo da CPU. Realmente, é um valor elevado e este dispositivo não tem modo de baixo consumo. Uma possível solução seria cortar sua alimentação quando a CPU entrasse no modo “*Power Save*”, porém, sem alimentação ele perde o pareamento. Por essa razão, o HC-05 foi removido do ensaio de longa duração. Ele só foi usando nos ensaios de calibração.

Uma próxima versão do densímetro pretende substituir o HC-05 pelo rádio NRF24I01 que possui modo de operação de baixo consumo. Porém, isto vai implicar na construção de um receptor que possa fica perto do densímetro e capturar as leituras. Tal

dispositivo ainda deverá ser passível de ser conectado à porta USB de um computador para entregar as medidas até então realizadas.

4.5 Ensaio V – Testes para verificar duração das baterias

Este é um teste simples em que o densímetro é ligado e sem ativar qualquer dispositivo assim permanece até as baterias serem esgotadas. Para este teste o HC-05 foi removido. Foi então preparada uma versão especial para o modo 0, no qual, a cada hora, o valor do contador de horas é gravado na EEPROM previamente apagada. Assim, o último valor registrado indica a quantidade de horas de funcionamento. Tal teste indicou que 4 baterias AAA garantiram o funcionamento contínuo por 108 horas ou 4,5 dias. Isto mostra que, com o modo de baixo consumo corretamente configurado, 4 baterias AAA seriam suficientes para medir a densidade de diversas fermentações.

Capítulo 5 - Conclusão

5.1 Considerações Finais

A inspiração deste trabalho veio das dificuldades financeiras enfrentadas pelos micros cervejeiros e hobbystas em obter equipamentos para a produção de cerveja em pequena escala, tendo em vista que parte desses equipamentos possui perfil industrial e, por tanto, preços menos acessíveis para o pequeno produtor. Entre eles, existe o densímetro, tema deste trabalho. O densímetro é um equipamento utilizado para medir a densidade da cerveja, o que possibilita calcular indiretamente a fermentação da mesma. Em geral, se usa um densímetro manual e se fazem medições: uma no início e outra no final da fermentação. Daí surge a ideia de um densímetro eletrônico que medisse a variação da densidade durante a fermentação.

Assim, o trabalho teve como o objetivo desenvolver um protótipo de baixo custo, baseado no hardware livre Arduino, capaz de medir a densidade no meio aquoso. Neste caso, ele será empregado para aferir a densidade de cervejas durante o processo de fermentação. O protótipo desenvolvido estima a densidade da solução a partir de cálculos que envolvem a inclinação do próprio protótipo. As informações são então transmitidas via *bluetooth* para um sistema final.

Foram construídos diversos protótipos e cada um deles trazia uma pequena melhoria em relação ao anterior. A solução final chegou a um densímetro embarcado num tubo de 16cm por 4cm de diâmetro e empregando 4 baterias AAA.

Os ensaios feitos para levantar a curva de inclinação versus densidade mostraram resultados animadores. Entretanto, o teste em uma fermentação durante 17 dias revelou alguns comportamentos estranhos. São necessários mais ensaios para entender o que aconteceu, mas existe uma grande possibilidade de que a quantidade de dióxido de carbono eliminada durante o processo de fermentação, tenha alterado a flutuação do densímetro, modificando os valores de densidade obtidos.

O teste de duração de bateria, mostrou-se que 4 pilhas AAA conseguem alimentar o dispositivo por 4,5 dias contínuos (sem o HC-05). O ensaio de consumo indicou que o HC-05 é o grande consumidor de energia e ele foi removido durante os ensaios.

Em resumo, a proposta apresenta alguns bons resultados, mas necessita ainda de novos ensaios para se entender melhor o comportamento do dispositivo.

Para futuros trabalhos, indica-se, obviamente, a substituição do HC-05. A sugestão é tentar com o rádio NRF24L01 que opera com baixo consumo. Sugere-se uma série de ensaios para comprovar as curvas de densidade x inclinação e também para descobrir o comportamento errático no ensaio de fermentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cerveja artesanal - um mercado em expansão no Brasil - <https://www.administradores.com.br/artigos/negocios/cerveja-artesanal-um-mercado-crescente-no-brasil/107062>
- [2] Densímetro eletrônico - https://www.amazon.com/BAOSHISHAN-Electronic-Analytical-Densimeter-Gravimeter/dp/B07GB184LF/ref=sr_1_10?ie=UTF8&qid=1543512863&sr=8-10&keywords=dens%C3%ADmeter
- [3] How to Brew, John Palmers – 4ª Edição
- [4] Design Great Beers, Ray Daniels
- [5] Mosto - <https://noticias.bol.uol.com.br/bol-listas/conheca-12-etapas-e-tecnicas-da-fabricacao-artesanal-da-cerveja.htm>
- [6] Flor do lúpulo - <https://avozdaserra.com.br/noticias/festa-da-flor-do-lupulo-acontece-no-dia-31-de-marco>
- [7] Módulo MPU- <http://www.mtmtv.info/future-electronics-egypt-c4625ed/>
- [8] Módulo MPU - <https://www.marinostore.com/sensores/acelerometro-e-giroscopio-triaxial-mpu6050>
- [8] Módulo Bluetooth - <http://blog.eletrogate.com/modulos-bluetooth-hc05-e-hc06-para-comunicacao-com-dispositivos-moveis-com-arduino>
- [9] Emblema Bluetooth - <https://www.pcworld.com/article/3122256/browsers/chrome-53-gets-web-bluetooth-as-google-phases-out-chrome-apps.html>
- [10] HC-05 https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-684825975-modulo-bluetooth-hc-05-serial-master-e-slave-arduino-pic-_JM
- [11] Módulo Bluetooth - <https://multilogica-shop.com/modulo-bluetooth-hc-05>
- [12] Arduino Nano - <http://www.circuitstoday.com/arduino-nano-tutorial-pinout-schematics>
- [13] Sensor de Temperatura - https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-712580700-sensor-de-temperatura-lm35dz-nota-fiscal-lm35-_JM?quantity=1
- [14] Manual do Fabricante LM35DZ - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [15] Manual EEPRO - <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21754m.pdf>
- [16] – Geometria e Cálculo Vetorial, Antônio Carlos Carañon Viera
- [17] – Microeletrônica, Sedra - Smith

[18] – Aceleração da gravidade em Brasília -
https://www.researchgate.net/publication/282913685_Determinacao_Experimental_da_Aceleracao_da_Gravidade_com_Pendulo_Simples_e_Cameras_Digitais