



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE DENSÍMETRO DIGITAL PARA A
PRODUÇÃO ARTESANAL DE CERVEJA**

**Autor: Bruna Barreto de Aguiar Ferraz Vasconcelos
Orientador: Ricardo Zelenovsky**

Brasília, julho de 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROJETO DE DENSÍMETRO DIGITAL PARA A
PRODUÇÃO ARTESANAL DE CERVEJA**

Autor: Bruna Barreto de Aguiar Ferraz Vasconcelos
Orientador: Ricardo Zelenovsky

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

Banca Examinadora

Prof. Ricardo Zelenovsky, 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, Adriana e André.

Agradecimentos

Agradeço ao criador supremo da vida e maestro da providência divina, o qual assistiu todos os momentos mais difíceis desta importante jornada da minha vida, me dando força, caráter e honra para conquistar meus objetivos profissionais.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Adriana e André, que sempre estiveram ao meu lado me dando todo apoio, amor e confiança que eu precisava.

Agradeço ao meu orientador, Ricardo Zelenovsky, pela excelente orientação ao longo deste projeto.

Agradeço também ao meu companheiro, Allan, por toda paciência, incentivo e carinho.

Agradeço, por fim, a quem não mencionei, mas que de alguma forma me ajudou e incentivou ao longo dessa trajetória.

RESUMO

Este trabalho é a continuação do desenvolvimento de um densímetro digital capaz de estimar a densidade da cerveja durante o processo de fermentação. O projeto foi iniciado por PRIOTO, H.L. (2018), o qual elaborou os primeiros protótipos do dispositivo e estes faziam o uso de um módulo *Bluetooth* para enviar os dados coletados. Com a finalidade de aperfeiçoá-lo, aqui foi desenvolvido um modelo matemático para descrever o comportamento esperado para o densímetro, foi criada uma métrica que determina a qualidade dos dados coletados e foram elaborados diferentes métodos para estimar a densidade. Também foi feita a validação dos modelos anteriores, foram realizadas diversas melhorias na montagem deste dispositivo, o *Bluetooth* foi substituído por um rádio digital e foram feitos avanços significativos na redução do consumo de energia do sistema. Dessa forma, neste trabalho foi possível compreender melhor o funcionamento do densímetro e, como consequência, realizar melhorias importantes ao desempenho.

ABSTRACT

This work is the next step of the development of a digital densimeter designed to estimate the beer density during the fermentation process. It was initiated by PRIOTO, H.L. (2018), who developed the first prototypes of this device that used the Bluetooth to send the data collected. To improve it, in this project a mathematical model is developed in order to describe the behavior expected for the densimeter, a metric is proposed to estimate the quality of the data collected and different methods is developed to estimate the density. Besides that, the validation of the previous models is made, and several improvements are proposed to improve the assembly of the actual design. The Bluetooth device is replaced by a digital radio and significant advances are made in reducing the energy consumption of the system. Thus, in this work it is possible to better understand the operation of the densimeter and, therefore, to make important improvements in its performance.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 AMBIENTAÇÃO.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	3
1.3 PROPOSTA DE SOLUÇÃO.....	4
1.4 PROJETOS SIMILARES.....	4
1.5 METODOLOGIA.....	5
1.6 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	6
CAPÍTULO 2.....	8
FUNDAMENTAÇÃO.....	8
2.1 FLUTUABILIDADE	8
2.1.1 FLUTUABILIDADE DO DENSÍMETRO.....	11
2.2 DESCRIÇÃO FÍSICA DO DENSÍMETRO	11
2.3 PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS	14
2.4 MODELO SIMPLIFICADO	16
2.5 EQUACIONAMENTO	17
2.6 CURVAS.....	20
2.7 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE	22
CAPÍTULO 3.....	25
DESCRIÇÃO DA PROPOSTA DO DENSÍMETRO	25
3.1 INTRODUÇÃO E FUNCIONALIDADE	25
3.2 ESQUEMA ELÉTRICO.....	26
3.3 ARDUINO NANO.....	30
3.4 ACELERÔMETRO	31
3.5 SENSOR DE TEMPERATURA.....	32
3.6 RÁDIO.....	33
3.7 MEMÓRIA FLASH.....	34
3.8 ESTUDO SOBRE CONSUMO DE BATERIAS	35
CAPÍTULO 4.....	37
PROGRAMAÇÃO.....	37
4.1 MODELO DE USO	37
4.2 MODOS DE OPERAÇÃO.....	37
4.2.1 MODOS 0	38
4.2.2 MODOS 1	39
4.2.3 MODOS 2	40
4.2.4 MODOS 3	40
4.2.5 MODOS 4	40
4.2.6 MODOS 5	40
4.2.7 MODOS 6	41
4.2.7 MODOS 7	41
4.3 OPERAÇÃO EM BAIXO CONSUMO	42
4.4 OPERAÇÃO DO RÁDIO.....	44
4.5 ESTIMADOR DE AGITAÇÃO	45
CAPÍTULO 5.....	47
ENSAIOS.....	47
5.1 VALIDAÇÃO DAS MÉTRICAS e_j E a_g	47
5.1.1 VALIDAÇÃO DAS MÉTRICAS e_j	47
5.1.2 VALIDAÇÃO DAS MÉTRICAS a_g	48

5.2	VARIABILIDADE NA MONTAGEM E OPERAÇÃO DO DENSÍMETRO	50
5.3	EMPREGO DO DENSÍMETRO EM 5 FERMENTAÇÕES	55
5.3.1	EMPREGO 1 (TESTE 14).....	56
5.3.2	EMPREGO 2 (TESTE 15).....	58
5.3.3	EMPREGO 3 (TESTE 16).....	60
5.3.4	EMPREGO 4 (TESTE 17).....	62
5.3.5	EMPREGO 5 (TESTE 18).....	64
5.3.6	ANÁLISE CONJUNTA DOS TESTE 14, 15, 16 E 17	64
CAPÍTULO 6.....		66
	CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		68
APÊNDICE A – MODELO MATEMÁTICO DETALHADO DO DENSÍMETRO		70
APÊNDICE B – MÉTRICA PARA INDICAR AGITAÇÃO SUPERFICIAL DE UM LÍQUIDO ..		85
APÊNDICE C – TESTE SOBRE A VARIABILIDADE NA MONTAGEM E OPERAÇÃO DO DENSÍMETRO.....		129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – iSpindle	5
Figura 1.2 – Densímetro com Wi-Fi.....	5
Figura 2.1 – Forças presentes na flutuação de um navio.....	9
Figura 2.2 – Centro de gravidade e centro de empuxo de um navio	9
Figura 2.3 – Navio com centro de gravidade acima do centro de empuxo	10
Figura 2.4 – Três situações de equilíbrio possíveis quando o CG está acima do CE.....	11
Figura 2.5 – Versão atual do densímetro	12
Figura 2.6 – Vistas da placa onde estão fixados todos os componentes do densímetro.	12
Figura 2.7 – Primeira versão do densímetro.....	15
Figura 2.8 – Segunda versão do densímetro.....	15
Figura 2.9 – Proposta de um modelo simplificado a ser usado no equacionamento da inclinação do densímetro	17
Figura 2.10 – Modelo do densímetro com as convenções adotadas para o cálculo do seu centro de gravidade.....	18
Figura 2.11 – Geometria da parte submersa do densímetro e convenções adotadas para o cálculo do seu centro de empuxo.....	19
Figura 2.12 – Rotações dos eixos X', Y' e Z' em um ângulo α e sua translação da distância $d \cdot \sin \alpha$	19
Figura 2.13 – Gráfico com a curva simulada do ângulo α em função da densidade	21
Figura 2.14 – Gráfico com as curvas simuladas do ângulo α em função da densidade para diferentes massas de lastro	22
Figura 2.15 – Vetores usados no cálculo do SMDif.....	24
Figura 3.1 – Placa com circuito elétrico do densímetro	26
Figura 3.2 – Esquema do circuito elétrico do densímetro	27
Figura 3.3 – Esquema da alimentação do circuito elétrico do densímetro	27
Figura 3.4 – Esquema das conexões dos dispositivos empregados no circuito elétrico.	28
Figura 3.5 – Esquema usado para medir o consumo de corrente	28
Figura 3.6 – Arduino Nano.....	30
Figura 3.7 – Placa GY-521	32
Figura 3.8 – Sensor de temperatura LM35DZ.....	33
Figura 3.9 – Memórias Flash 24LC512 e 24LC1025	34
Figura 3.10 – Rádio digital nRF24L01.....	35
Figura 5.1 – Foto do ambiente usado para estudar o comportamento do densímetro quando imerso em um líquido que está em movimento agitado (na foto a água está parada)	47
Figura 5.2 – Fotos com os densímetros usados nos dois ensaios em questão. Elas foram obtidas com o líquido (água) em completa estabilidade.....	49
Figura 5.3 – Principais componentes do densímetro	51
Figura 5.4 – Recipientes com as diversas soluções utilizadas nos testes	52
Figura 5.5 – Curvas de inclinação (graus) versus densidade, para os 11 testes realizados	53
Figura 5.6 – Curvas de inclinação (graus) versus densidade. Na metade superior estão os casos convexos e na metade inferior, os casos côncavos	55
Figura 5.7 – Teste 14: Inclinação do densímetro sob as duas condições de referência..	57

Figura 5.8 – Teste 14: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 162 horas. As linhas horizontais tomam o Teste 11 como hipótese para a escala da densidade.....	57
Figura 5.9 – Teste 15: Inclinação do densímetro nas soluções de referência.....	58
Figura 5.10 – Teste 15: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 172 horas.....	59
Figura 5.11 – Variações semelhantes experimentadas pelo eixo ax e um segundo eixo. No caso da figura foi considerado o eixo az, sendo que o eixo ay é perpendicular ao plano da figura.	60
Figura 5.12 – Teste 16: Medidas das inclinações do densímetro nas soluções de referência.	61
Figura 5.13 – Teste 16: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 221 horas.....	62
Figura 5.14 – Teste 17: Medida da inclinação do densímetro em água comum.....	63
Figura 5.15 – Teste 17: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 211 horas.....	63
Figura 5.16 – Teste 18: Placa onde foram fixados todos os componentes do densímetro	64
Figura 5.17 – Testes 14, 15, 16 e 17: Inclinação do densímetro em função das horas ..	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Medições com o esquema da Figura 3.5.....	29
Tabela 3.2 – Medições usando o esquema da Figura 3.5 com a CPU em baixo consumo	29
Tabela 4.1 – Modos de operação do densímetro	38
Tabela 4.2 – Medição realizada apenas com o Arduino Nano e o MPU 6050.....	42
Tabela 5.1 – Duas classes de curvas.....	54
Tabela 5.2 – Teste 14: Configuração empregada	56
Tabela 5.3 – Teste 14: Resultados da calibração	56
Tabela 5.4 – Teste 15: Configuração empregada	58
Tabela 5.5 – Teste 15: Resultados da calibração do densímetro	58
Tabela 5.6 – Teste 16: Configuração empregada	60
Tabela 5.7 – Teste 16: Resultados da calibração do densímetro	61
Tabela 5.8 – Teste 17: Configuração empregada (idêntica à do Teste 16)	62
Tabela 5.9 – Teste 17: Resultados da calibração do densímetro	62

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (conversor analógico-digital)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface Bus</i> (barramento serial para periféricos)
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (circuito inter-integrado)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (barramento serial universal)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (unidade central de processamento)
MPU	<i>Mathematical Processing Unit</i> (unidade matemática de processamento)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Ambientação

Embora não se tenha uma data específica para o surgimento da cerveja, dados históricos indicam que a sua produção teve início na Suméria e na Assíria, há cerca de 8.000 anos (COIMBRA et al., 2009). Acredita-se que ela surgiu acidentalmente, quando se transportava pão e esse foi atingido por água de chuva. A água reagiu com os açúcares e com o fermento do pão, levando a fermentação deste produto, dando então origem à cerveja primitiva (MOSHER, 2004).

Anos depois, a cerveja chegou ao Egito, onde se deu início a produção de variedades dessa bebida. Os egípcios apresentaram a cerveja para os povos orientais e a disseminaram na bacia do Mediterrâneo e, depois, em toda a Europa (FERREIRA et al., 2011). A partir de então, a sua produção teve uma grande expansão, passando a ser desenvolvida por diversos povos, cada um do seu jeito, com os ingredientes e tecnologias que tinham, dando origem a diversos tipos de cerveja.

Na Idade Média, a cerveja era uma bebida nutritiva, com menor teor alcoólico que o vinho e também mais barata de produzir e, portanto, ela ganhou destaque. As primeiras produções em maior escala tiveram origem nos mosteiros a partir do século IV e, desde então, foram sendo construídas várias abadias para a sua fabricação (MORADO, 2009).

Com a Revolução Industrial o modo de produção e distribuição passou por grandes modificações (MEGA et al., 2011). A fabricação passou a ser feita em grande escala, expandindo ainda mais seu consumo (CRUZ et al., 2007). A produção em grande escala também fez com que a variedade das cervejas fosse reduzida, sendo fabricados produtos mais padronizados e que agradassem grande parte dos paladares.

Com o passar dos anos, houve uma sofisticação dos hábitos gastronômicos. O surgimento da culinária *gourmet* e o aprimoramento do paladar revolucionou também o setor das bebidas. Os consumidores de cerveja passaram a buscar por alternativas mais

originais (MORADO, 2009). Dessa forma, devido à pouca variedade das grandes cervejarias, as pessoas começaram a fabricar a sua própria cerveja, com sabores, aromas, cores e texturas diferenciados. Assim, teve-se início a produção do que hoje se conhece como cerveja artesanal.

As cervejas artesanais representam, portanto, uma releitura das cervejas tradicionais, só que agora com maior atenção à qualidade da produção e à inovação. Tem-se, contudo, que a principal característica que as definem é o processo não industrial de fabricação.

No Brasil, essa valorização das cervejas especiais se deu a partir da década de 1990. Enquanto as grandes fábricas se dedicavam em aumentar a quantidade produzida, surgiram as microcervejarias que passaram a fornecer um produto mais artesanal, seguindo as receitas tradicionais ao usar uma maior quantidade de malte, mas também inovando ao adicionar ingredientes especiais (ABRABE, 2014). Desde então, o consumo e práticas associadas à produção de cerveja artesanal passou a expandir cada vez mais.

Em 2018, foram inscritas 210 novas cervejarias no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (LAPOLLI, 2018). Também é perceptível o aumento do número de eventos associado às cervejas artesanais, seja para a sua divulgação, troca de experiência ou outros objetivos.

Em agosto de 2019, por exemplo, a ABRACERVA promoverá a Feira Brasileira da Cerveja Nacional Independente, ExpoBrew. Ela contará com uma feira de exposição dos fornecedores do setor e com um espaço destinado às novas cervejarias para exposição e venda de seus produtos. Além disso, serão realizadas palestras técnicas disponibilizadas para aprimorar conhecimentos técnicos e discutir os principais desafios do setor e também a competição denominada 2ª Copa Cerveja Brasil.

Aliada a essa expansão da produção e do consumo das cervejas especiais, tem-se o fator multiplicador da Internet. Diversos sites são especializados na venda destes produtos e há aqueles destinados à discussão e compartilhamento de receitas. As plataformas virtuais também oferecem cursos de cervejeiro artesanal, ampliando o número de pessoas que as produzem em suas residências para o consumo próprio.

1.2 Motivação

Na fabricação da cerveja artesanal é essencial que se tenha como acompanhar o processo de fermentação para saber como a produção está evoluindo e conhecer o momento de interrupção do processo. Uma das formas de se aferir a fermentação se dá através da medição da variação da densidade (ELMEHDI; PAGE; SCANLON, 2007).

O uso do densímetro é uma maneira usual, manual e econômica de se obter informação a respeito da fermentação. Dessa forma, os produtores de cervejas artesanais e as microcervejarias costumam acompanhar a fermentação através do método do densímetro de tipo “vareta de vidro”.

Neste método, o fabricante procede de modo semelhante ao descrito na ISO 649:1981. Inicialmente ele retira uma amostra do produto e a coloca em uma proveta de vidro transparente sem escala. Em sequência, ele introduz um termômetro na amostra e aguarda até a estabilização da temperatura para que ela seja anotada. Por fim, ele imerge um densímetro de “vareta de vidro” na amostra e aguarda até que ele esteja em equilíbrio e flutue livremente sem tocar a parede da proveta. O valor da graduação que coincide com a superfície do líquido corresponde à sua densidade. A essa medida, aplica-se o fator de correção em função da temperatura registrada para que a estimativa seja mais acurada.

Nota-se, da descrição acima, que erros de leitura e falta de precisão são alguns dos problemas decorrentes do emprego do método do densímetro de vidro para aferir a densidade da cerveja. Além disso, outro aspecto negativo é a necessidade de se ter acesso ao mosto para se retirar amostras para as diversas medições sendo que elas não são realizadas de maneira contínua. Também deve ser considerado o desperdício de uma porção significativa do produto além da perturbação do processo e risco de contaminação. Tem-se, portanto, que o método usual utilizado para acompanhar o processo de fermentação não é adequado.

Outro instrumento bastante utilizado pelos cervejeiros artesanais na medição da densidade é o refratômetro (ŠAVEL et al., 2009). Este equipamento refrata a luz em diferentes posições com a variação da densidade do líquido e, dessa forma, consegue estimar a sua densidade.

É preciso comentar que o uso do densímetro de “vareta de vidro” ou do refratômetro analógico também é permeado por erros de leitura, falta de precisão e os demais empecilhos já tratados. O refratômetro digital, por sua vez, é mais preciso, porém é muito mais caro e não soluciona problemas relacionados à necessidade de se ter acesso ao mosto.

Evidencia-se, portanto, que os aparelhos de existentes no mercado são simples demais, difíceis de utilizar ou possuem alto custo. Por esta razão, confirma-se a necessidade do desenvolvimento de dispositivos capazes de aferir a densidade de líquidos de maneira mais fácil, contínua, eficiente e que, acima de tudo, seja acessível.

1.3 Proposta de Solução

Para atender as novas exigências do mercado das cervejas especiais, neste projeto deu-se continuidade ao desenvolvido de um densímetro digital de baixo custo capaz de estimar a densidade de modo contínuo e informar quando o processo de fermentação chegou ao fim, o qual foi iniciado por PRIOTO (2018). Em contraste aos métodos comumente empregados, este equipamento afere a densidade através do seu ângulo de inclinação no líquido.

O dispositivo proposto faz uso de um módulo de rádio. Assim, os dados coletados podem ser acessados à distância a qualquer momento, o que permite acompanhar o processo de produção da cerveja. Outra vantagem adicional é a presença de um termômetro digital, permitindo uma análise de dados mais precisa.

1.4 Projetos Similares

Na busca por equipamentos similares, encontrou-se um projeto denominado iSpindle, que também utiliza a inclinação para determinar a densidade de líquidos. Este faz o uso das Equações de Euler para calcular o ângulo de inclinação e usa um módulo Wi-Fi para a transmissão de dados (GITHUB, 2018). A Figura 1.1 mostra o iSpindle.



Figura 1.1. iSpindle (GITHUB, 2019).

De modo similar, encontrou-se um trabalho acadêmico no qual foi desenvolvido um dispositivo para determinar a densidade da cerveja em fermentação através do seu ângulo de inclinação. Este emprega o microcontrolador ESP-12F/ESP8266MOD, o qual contém funcionalidade Wi-Fi para a transmissão de informações (PINTARELLI; MARCONDES, 2019). A Figura 1.2 o mostra este densímetro.



Figura 1.2. Densímetro com Wi-Fi (PINTARELLI; MARCONDES, 2019).

Por fim, é relevante citar um projeto de conclusão de curso que utiliza a princípio físico da refração para determinar a densidade de líquidos. Ele também busca o desenvolvimento de um aparelho de baixo custo e preciso para medir densidade, mas utiliza uma metodologia completamente diferente (SOUZA; ODORCZYK, 2013).

1.5 Metodologia

O ensaio e erro foi um tópico muito importante no desenvolvimento deste projeto. Procurou-se caracterizar os problemas e deficiências e foram feitas várias hipóteses de solução que depois foram validadas. Isso foi necessário porque este projeto consiste na continuação do Trabalho de Conclusão de Curso realizado por outro aluno.

O modelo matemático desenvolvido foi realizado para antecipar as respostas esperadas. Ao final, procurou-se reunir os melhores resultados em uma versão final do dispositivo.

1.6 Descrição dos Capítulos

Este trabalho está dividido em 6 capítulos:

Capítulo 1 – Introdução: neste capítulo é feita uma ambientação à cerca do tema do projeto e são apresentadas a motivação, a proposta de solução e os projetos similares. Nele também é descrita a metodologia empregada e é feita uma breve descrição dos capítulos e apêndices que o compõem.

Capítulo 2 – Estudo sobre fluutuabilidade e modelo matemático: neste capítulo é realizado um estudo sobre a fluutuabilidade usando o modelo de um navio como exemplo. Em seguida é feita a descrição física do densímetro e é proposto um modelo matemático simplificado e suas equações mais importantes. Com essas equações, são levantadas as curvas teóricas associadas ao modelo criado para que possa validar as medições colhidas na parte prática. Nele também são apresentados os métodos empregados para estimar a densidade.

Capítulo 3 – Descrição da proposta do densímetro: neste capítulo é feita uma breve introdução ao densímetro e sua funcionalidade e, então, é apresentado o seu esquema elétrico. Nele também são descritos os principais componentes de hardware desse equipamento e é feito um estudo sobre consumo de baterias.

Capítulo 4 – Programação: neste capítulo são apresentados os principais algoritmos desenvolvidos e as principais dificuldades encontradas.

Capítulo 5 – Ensaio: neste capítulo são apresentados os ensaios realizados, os resultados obtidos em diversos processos de fermentação e também as análises correspondentes.

Capítulo 6 – Conclusão: neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas através deste projeto e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

Além dos 6 capítulos recém listados, têm-se 3 apêndices:

Apêndice A – Descrição do modelo matemático cujos resultados são usados no Capítulo 2.

Apêndice B – Ensaio e modelamento para ser propor uma métrica para caracterizar a agitação do mosto no instante da medida e também um processo que indique quando o mosto atinge a estabilidade mecânica.

Apêndice C – Fotos, curvas e resultados de 11 ensaios que foram realizados para verificar a funcionalidade do densímetro proposto.

Capítulo 2

Fundamentação

2.1 Flutuabilidade

Este projeto propõe um dispositivo mais leve que a água, cujas condições de fluabilidade variam de acordo com a densidade do líquido no qual está imerso. O principal parâmetro será a variação de sua inclinação em relação ao eixo vertical.

Para estudar como o projeto foi realizado, deve-se primeiramente compreender as características associadas à flutuação dos corpos. Portanto, é imprescindível conhecer as forças que estão agindo sobre objetos quando flutuando em um líquido e também saber como elas influenciam na sua posição de equilíbrio.

Uma boa descrição das forças presentes na flutuação de corpos pode ser feita tomando-se como exemplo um navio. Quando está flutuando na água, uma parte da embarcação encontra-se submersa, deslocando certa quantidade de água, o que gera um empuxo. O peso do navio (P_{navio}) é compensado pela força vertical para cima que a água exerce sobre ele, ou seja, pelo empuxo (E). Portanto, tem-se que:

$$P_{navio} = E \quad . \quad (2.1)$$

Se o navio flutua, então o empuxo tem intensidade igual ao peso do fluido deslocado e a equação acima pode ser reescrita como (AMÉRICO, 2009):

$$P_{navio} = P_{fluido,deslocado} \quad . \quad (2.2)$$

De forma resumida, para um navio que flutua em equilíbrio, a parte submersa desloca um volume de água do mar cujo peso é igual ao peso dessa embarcação.

Na Figura 2.1 estão ilustradas a atuação das forças peso e empuxo sobre um navio flutuando. Nela também está destacado o volume do fluido deslocado.

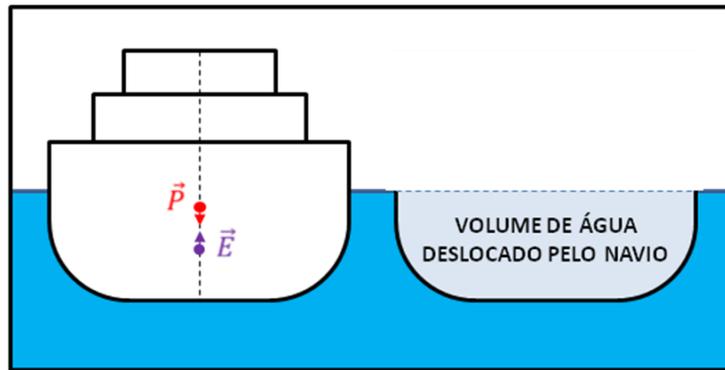


Figura 2.1. Forças presentes na flutuação de um navio.

Tem-se, contudo, que a estabilidade de um navio não depende somente da igualdade $P_{navio} = E$. Ela também depende do ponto de aplicação dessas forças, ou seja, do centro de gravidade do navio e do seu centro de empuxo.

O centro de gravidade de um corpo (CG) corresponde ao ponto de concentração do peso do corpo (AMÉRICO, 2009) e, portanto, é o ponto onde pode ser considerada a aplicação da força peso deste corpo. Ele depende da distribuição de massa do corpo, ou seja, da sua geometria. Como o navio é um corpo rígido, o seu centro de gravidade é fixo.

O centro de empuxo (CE) corresponde ao centro de gravidade do líquido deslocado pelo corpo (AMÉRICO, 2009). Sendo assim, ele depende da geometria da parte submersa deste corpo. Por consequência, este centro de empuxo pode variar em função da porção do corpo que está submersa.

A ilustração abaixo mostra o centro de gravidade e o centro de empuxo de um navio. Nota-se que o centro de gravidade, como já foi afirmado, é fixo, mas o centro de empuxo varia de acordo com o formato da parte do navio que se encontra submerso.

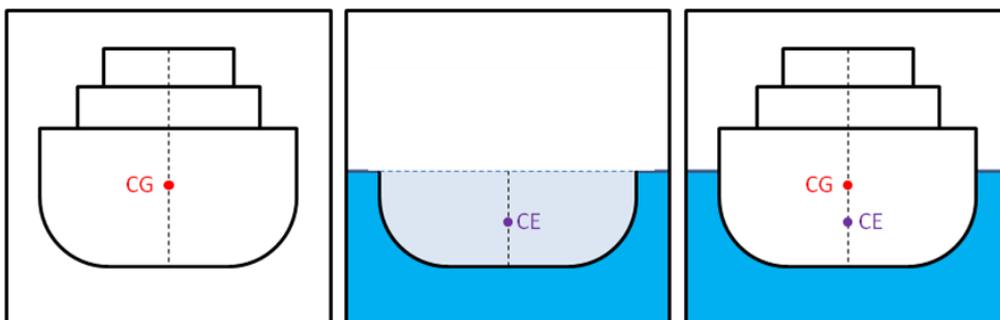


Figura 2.2. Centro de gravidade e centro de empuxo de um navio.

Na posição de equilíbrio, o centro de gravidade e o centro de empuxo estão alinhados em relação à vertical. Todavia, ao sofrer oscilações laterais, o volume da parte do fluido deslocado se altera e, como consequência, o centro de empuxo muda de posição. A estabilidade do navio vai depender da posição relativa entre o seu centro de gravidade e o centro de empuxo.

Projetar um navio com o centro de gravidade abaixo do centro de empuxo garante que ele esteja em equilíbrio estável. Portanto, ao se inclinar em um pequeno ângulo, ele tende a voltar à posição inicial de equilíbrio.

No caso de um navio com centro de gravidade acima do centro de empuxo, o equilíbrio pode ser estável ou não. A sua estabilidade vai depender da posição relativa entre o seu centro de gravidade e o metacentro na nova posição.

O metacentro corresponde à intersecção do eixo de simetria do corpo com a direção do empuxo (AMÉRICO, 2009) e está indicado pela letra “M” na Figura 2.4, que é abordada logo a seguir. Quando o metacentro estiver acima do centro de gravidade do navio, ele estará em equilíbrio estável e, portanto, retornará à sua posição inicial. Em contrapartida, se o metacentro estiver abaixo do centro de gravidade do navio, ele estará em equilíbrio instável e, por consequência, se afastará ainda mais da posição inicial. Caso o metacentro coincida com o centro de gravidade do navio, ele estará em equilíbrio indiferente, permanecendo na posição em que se encontra, estando estável.

A Figura 2.3 ilustra um navio com centro de gravidade acima do centro de empuxo. Por sua vez, a Figura 2.4 apresentada as três situações de equilíbrio nas quais a embarcação da Figura 2.3 pode ficar ao sofrer uma oscilação lateral.

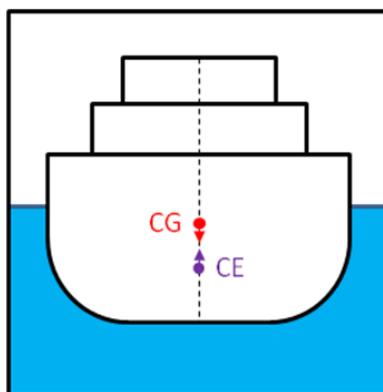


Figura 2.3. Navio com centro de gravidade acima do centro de empuxo.

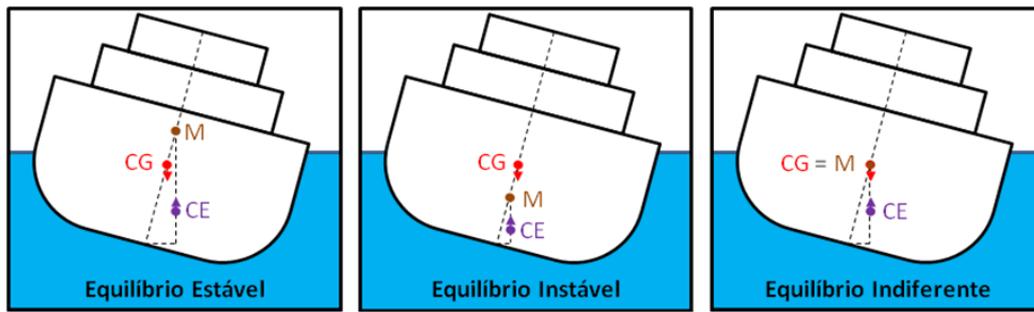


Figura 2.4. Três situações de equilíbrio possíveis quando o CG está acima do CE.

2.1.1 Estudo da Flutuabilidade do Densímetro

Do exposto, tem-se agora o conhecimento necessário para se compreender a proposta de funcionamento do densímetro e também suas características de flutuabilidade.

Como o densímetro deve estar flutuando sobre o líquido, o seu peso (P_d) deve ser compensado pelo empuxo ($E_d = P_{líquido, deslocado}$). Sendo assim, a igualdade abaixo deve ser satisfeita:

$$P_d = P_{líquido, deslocado} \quad (2.3)$$

Variações na densidade do líquido fazem o empuxo variar. Para compensar a mudança da densidade, o dispositivo altera sua inclinação de modo que o novo volume de líquido deslocado seja capaz de manter a igualdade. Além disso, como o objeto deve estar em equilíbrio na nova posição, a variação na inclinação ocorre de tal forma que o metacentro coincida com o centro de gravidade.

Tem-se, então, que para cada densidade o corpo apresentará uma inclinação e estará em equilíbrio nela. Assim, utilizando essas características, consegue-se obter a densidade do fluido em cada situação. O detalhamento dos cálculos será apresentado mais adiante.

2.2 Descrição Física do Densímetro

O modelo físico do densímetro foi desenvolvido de modo a atender a algumas restrições geométricas além de oferecer características de flutuabilidade específicas.

Também foram levadas em consideração a importância de se garantir a integridade dos componentes elétricos e eletrônicos que constituem o hardware e a facilidade para higienização, pois deve-se evitar a contaminação do líquido cuja densidade se está medindo. Diversos tipos de montagens e inúmeros ajustes foram realizados até que se chegou ao modelo apresentado nas Figuras 2.5 e 2.6.



Figura 2.5. Versão atual do densímetro.



Figura 2.6. Vistas da placa onde estão fixados todos os componentes do densímetro.

Como pode ser observado nas Figuras 2.5 e 2.6, o densímetro é formado pelos seguintes componentes:

- Tubo plástico aproximadamente cilíndrico com tampa;
- Placa para circuito impresso;
- Arduino Nano;
- MPU 6050;
- Rádio digital NRF24L01;
- Memória Flash externa (24LC1025);

- Componentes elétricos (resistores, LEDs, etc.);
- Bateria formada pelo conjunto de quatro pilhas AAA;
- Lastro.

O tubo abriga todos os elementos do densímetro e, portanto, ele é o responsável por garantir a integridade destes materiais. Sendo assim, ele deve ser bem vedado para que os componentes elétricos e eletrônicos não entrem em contato com o líquido. Além disso, seu formato facilita a higienização, o que garante que o líquido não será contaminado.

A escolha de um tubo cilíndrico para encapsular os demais elementos do densímetro foi feita pela simetria ao longo do seu eixo principal. Por isso, ao flutuar ele não tem uma posição preferencial. O formato cilíndrico simplificou o equacionamento matemático, uma vez que as suas variáveis são apenas o raio e o comprimento. Constatou-se que o tubo utilizado não é um cilindro perfeito, pois não havia no mercado um material neste formato cujas dimensões fossem capazes de comportar todos os componentes do densímetro.

Um dos fatores determinantes na escolha das dimensões do tubo foi a bateria, que é composta por quatro pilhas AAA. Assim, o material deveria possuir um diâmetro grande o suficiente de modo a caber o soquete com as baterias do densímetro. Dentre as opções encontradas no mercado, o tubo plástico aproximadamente cilíndrico mostrado na Figura 2.5 foi a que melhor se aproximou das especificações desejadas.

Foram compradas 10 unidades e se constatou que elas possuem pequenas variações dimensionais. O tamanho aproximado é de 4,2 cm de diâmetro (medido pela parte interna) e 16 cm de comprimento. Outra particularidade, que pode ser observada na Figura 2.5, é a tampa numa extremidade e o formato ogival na outra extremidade.

Por ocasião da construção do modelo matemático, a bem da simplicidade do modelo, essas particularidades e imperfeições serão desconsideradas. Tem-se, contudo, que os resultados continuam válidos e precisos uma vez que os equacionamentos são feitos com valores relativos e, dessa forma, esses defeitos deixam de ter influência.

Com relação à disposição dos componentes do densímetro dentro do tubo, tem-se que ela foi determinada de modo a fornecer características de flutuabilidade que melhor

se ajustem à proposta do projeto. O lastro deveria estar próximo do fundo do tubo, onde foram alojadas as baterias, que também desempenham o papel de lastro. Por consequência, na parte mais próxima à tampa estão posicionados os componentes de hardware do densímetro, que são mais leves.

O lastro é utilizado para se realizar o ajuste da inclinação do densímetro quando imerso em água. Sendo assim, foram feitos diversos ensaios para que fossem verificados quais valores de inclinação forneciam melhor condição de trabalho. Como resultado foi obtido que para valores de massa de lastro entre 20g e 25g têm-se boas inclinações, ou seja, o dispositivo não fica nem muito próximo da posição horizontal nem muito próximo da posição vertical.

A bateria foi colocada mais próxima ao fundo por ser mais pesada, com massa igual a 52g enquanto os componentes de hardware pesam 31g. Essa disposição garante que o centro de gravidade esteja mais baixo e, portanto, o dispositivo apresenta maior estabilidade na posição em que se encontra.

A decisão de posicionar os componentes elétricos e eletrônicos que formam o hardware do aparelho na parte mais acima do tubo cumpre duas finalidades: atende às condições de fluutuabilidade e facilita o acesso ao conector USB do Arduino Nano para a comunicação e programação do dispositivo. A chave liga/desliga foi posicionada no todo do circuito para permitir seu acesso sem que se tenha de desmontar o conjunto.

É importante ressaltar que a forma de distribuir os componentes na montagem do tubo altera completamente sua fluutuabilidade, uma vez que modifica o seu centro de gravidade. Portanto, a montagem do densímetro deve ser feita cuidadosamente e para cada uma tem-se a curva teórica que deverá ser utilizada para validar os dados encontrados.

2.3 Protótipos Construídos

Diversos tipos de montagens e inúmeros ajustes foram realizados até se obter o modelo atual do densímetro, que foi descrito anteriormente. A Figura 2.7 apresenta a primeira versão construída durante esse processo e a Figura 2.8 mostra a segunda versão. O modelo atual pode ser visto na Figura 2.5.



Figura 2.7. Primeira versão do densímetro.

A primeira versão já utilizava um tubo cilíndrico para encapsular os demais elementos do densímetro, mas seu diâmetro era menor do que o atual. Como consequência, a bateria usada para alimentar o sistema era composta por apenas três pilhas AAA. A experimentação demonstrou que somente 3 baterias (4,5 V) eram suficientes para garantir o funcionamento do sistema por um período mínimo e, portanto, foi necessário aumentar o número de baterias. Em contrapartida, o tubo utilizado não conseguia comportar um soquete com 4 pilhas AAA. Diante desse impasse, optou-se por procurar um tubo com um diâmetro grande o suficiente para alojar 4 baterias AAA, surgindo assim a segunda versão do densímetro.

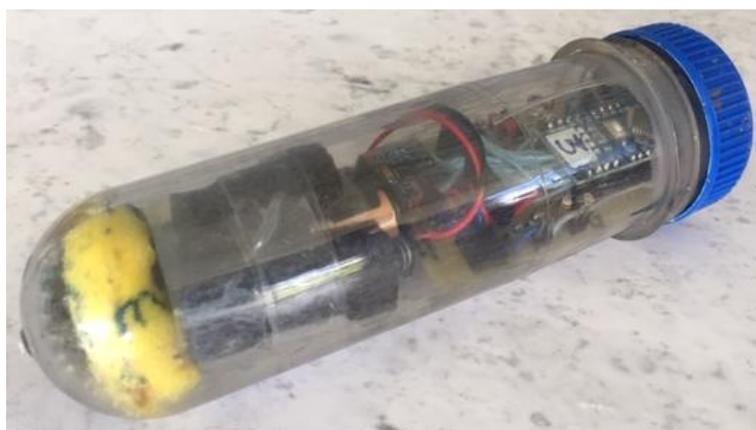


Figura 2.8. Segunda versão do densímetro.

O uso de um tubo maior em diâmetro e comprimento permitiu solucionar o problema de alimentação da primeira versão. Essa modificação possibilitou também

mais espaço para posicionar os componentes do dispositivo e a bateria ficava alojada na parte inferior, junto com o lastro, numa posição com certo grau de mobilidade.

Os ensaios demonstraram que a posição das baterias é extremamente crítica. Um deslocamento vertical de 1 ou 2 mm é o suficiente para levar o densímetro de uma posição quase vertical para a horizontal. Isso se explica pelo fato de as baterias representarem a parte mais pesada de todo o conjunto. Esperava-se que as condições de fluabilidade fossem sensíveis para com a posição das baterias, mas havia a esperança de se compensar isso com o lastro. Isso é possível, mas resulta em um grande trabalho de calibração.

Ficou então clara a necessidade de se construir uma estrutura rígida onde cada componente fique numa posição fixa, como mostrado na Figura 2.6. A nova placa de sustentação dos componentes foi cortada de forma a se ajustar às paredes do tubo e num comprimento tal que tocasse o fundo deste tubo. Em especial, o soquete das baterias foi fixado junto à placa principal do densímetro. O lastro também foi amarrado à placa e se colocou um parafuso sobre o eixo principal para a adição ou remoção de porcas que fazem a sintonia fina do lastro.

2.4 Modelo Simplificado

Neste tópico é apresentado o modelamento matemático de um densímetro hipotético, simplificado de forma a facilitar a construção das equações, mas que ainda traz a influência dos parâmetros que são importantes para o projeto em questão. Pretende-se chegar a uma equação que relacione a inclinação do densímetro com a densidade do líquido no qual ele está imerso. O detalhamento completo deste equacionamento é apresentado no Apêndice A. Para a proposta do modelo simplificado, optou-se por dividi-lo em duas partes com densidade uniforme, como mostrado na Figura 2.9.

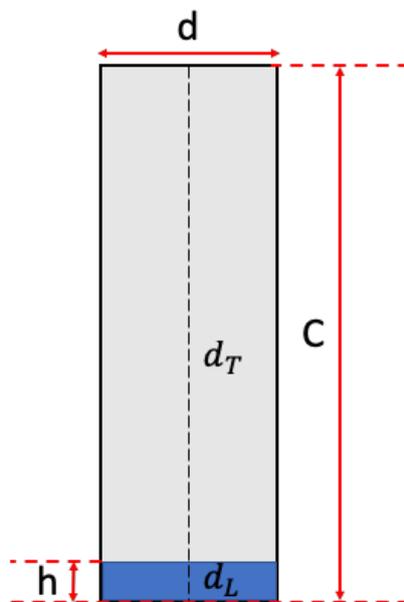


Figura 2.9. Proposta de um modelo simplificado a ser usado no equacionamento da inclinação do densímetro.

Como pode ser observado na Figura 2.9, o modelo faz uso de um cilindro de comprimento “C” e diâmetro “d”, que possui uma densidade uniforme “ d_T ”. A porção inferior do cilindro é preenchida com um lastro de altura “h” e densidade “ d_L ”. Por simplicidade, se considera que esta densidade “ d_L ” já incorpora a massa da parede e fundo do tubo que envolvem o lastro.

Essa divisão em duas porções, apesar de simples, é suficiente para modelar o comportamento do densímetro proposto e ainda permite a análise da posição vertical. Com o modelo pronto, será possível verificar como o densímetro se comporta ao se variar a densidade do lastro, por exemplo. Dessa forma, é possível determinar quais fatores levam às condições de flutuabilidade desejadas.

2.5 Equacionamento

A expressão que relaciona a densidade do líquido com o ângulo de inclinação do densímetro é obtida através da análise matemática do equilíbrio vertical e rotacional deste dispositivo. Dessa forma, para determiná-la foi necessário encontrar as equações que definem o centro de gravidade do densímetro (CG_d) e o centro de empuxo (CE_d) e, então, verificar como elas se relacionam com a flutuabilidade deste equipamento.

O CG_d foi determinado pela análise da geometria do modelo simplificado do dispositivo, colocando-o em uma posição favorável para o equacionamento. A figura abaixo mostra as convenções adotadas.

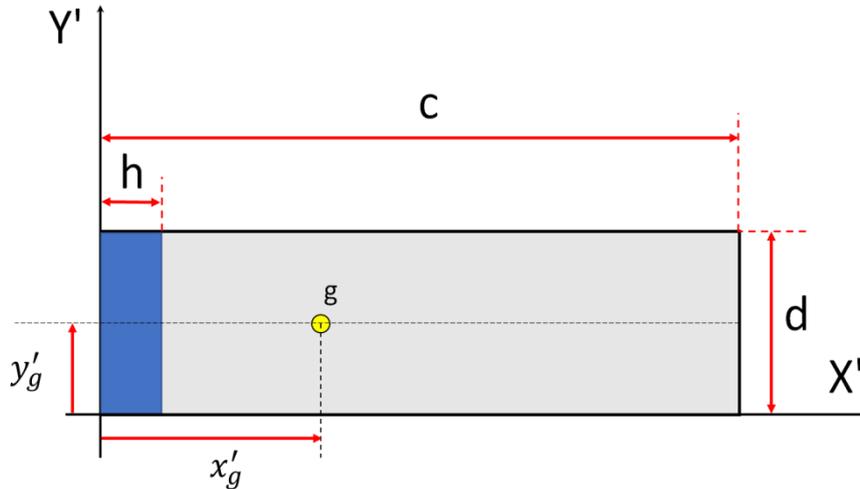


Figura 2.10. Modelo do densímetro com as convenções adotadas para o cálculo do seu centro de gravidade.

Como resultado, obteve-se que:

$$X'_g = \frac{h}{2} + \frac{(c - h) \cdot d_T \cdot c}{2 \cdot d_L \cdot h + 2 \cdot (c - h) \cdot d_T} , \quad (2.4)$$

$$Y'_g = \frac{d}{2} , \quad (2.5)$$

onde X'_g e Y'_g correspondem à projeção do CG_d nos eixos X' e Y' , respectivamente.

O CE_d foi encontrado por meio da análise da geometria do volume do líquido deslocado pelo dispositivo, lembrando que o tubo deve ficar inclinado em relação à linha d'água, daí a forma trapezoidal considerada. Novamente, usou-se um posicionamento que facilitasse a construção das equações. A Figura 2.11 mostra as convenções adotadas.

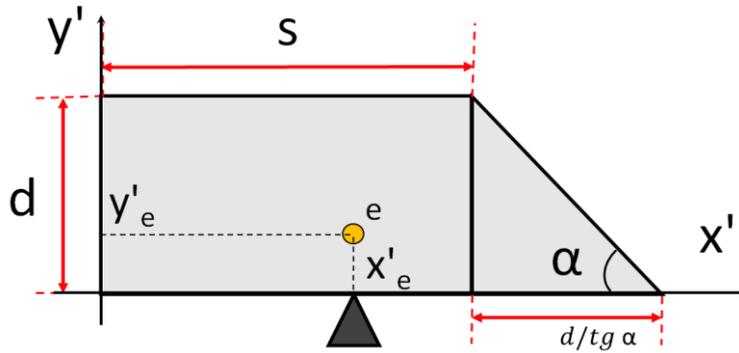


Figura 2.11. Geometria da parte submersa do densímetro e convenções adotadas para o cálculo do seu centro de empuxo.

Como resultado, obteve-se que:

$$X'_e = \frac{s}{2} + \frac{3 \cdot d \cdot s \cdot \tan \alpha + 2 \cdot d^2}{12 \cdot s \cdot \tan \alpha + 6 \cdot d \cdot \tan \alpha} \quad (2.6)$$

$$Y'_e = \frac{d(3 \cdot s \cdot \tan \alpha + d)}{3 \cdot d + 6 \cdot s \cdot \tan \alpha} \quad (2.7)$$

onde X'_e e Y'_e correspondem à projeção do CE_d nos eixos X' e Y' , respectivamente.

Entretanto, é preciso fazer uma rotação e uma translação dos eixos para que o densímetro ocupe a posição verdadeira, considerando-as a aceleração da gravidade. A imagem abaixo mostra essas operações.

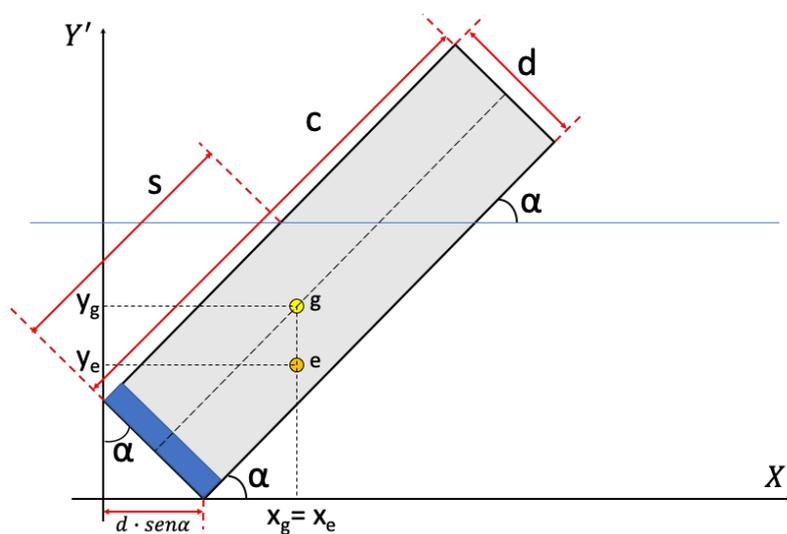


Figura 2.12. Rotação dos eixos X' , Y' e Z' em um ângulo α e sua translação da distância $d \cdot \sin \alpha$.

A rotação dos eixos X' e Y' de um ângulo α e a translação da distância d . $\text{sen } \alpha$ obtêm-se as novas equações, agora referenciadas aos eixos denominados X e Y :

$$X_g = (d - Y'_g) \cdot \sin a + X'_g \cdot \cos a \quad , \quad (2.8)$$

$$Y_g = X'_g \cdot \sin a + Y'_g \cdot \cos a \quad , \quad (2.9)$$

$$X_e = (d - Y'_e) \cdot \sin a + X'_e \cdot \cos a \quad , \quad (2.10)$$

$$Y_e = X'_e \cdot \sin a + Y'_e \cdot \cos a \quad , \quad (2.11)$$

onde X_g e Y_g correspondem à projeção do CG_d nos eixos X e Y , respectivamente. Por sua vez, X_e e Y_e correspondem à projeção do CE_d nos eixos X e Y , nesta sequência.

Para atender às condições de flutuação especificadas no projeto é necessário que o peso total do densímetro (P_d) seja igual ao peso do volume de líquido deslocado (E_d), ou seja, é preciso $P_d = E_d$. Além disso, para ser ter a estabilidade, é preciso $X_g = X_e$. Resolvendo essas igualdades utilizando as expressões encontradas para CG_d e CE_d , obtém-se a equação da densidade em função do ângulo de inclinação mostrada abaixo.

$$\alpha = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{\frac{24 \cdot CTE \cdot X'_g}{d^2 \cdot d_{fluido}} - \frac{12 \cdot CTE^2}{d^2 \cdot d_{fluido}^2} - 2}} \quad , \quad (2.12)$$

$$CTE = h \cdot d_L + (c - h) \cdot d_T \quad , \quad (2.13)$$

onde α corresponde ao ângulo de inclinação do densímetro com relação à linha d'água e d_{fluido} corresponde à densidade do líquido no qual este se encontra.

Citamos novamente que o Apêndice A apresenta o desenvolvido mais detalhado dos resultados apresentados. Neste anexo é desenvolvido cada etapa dos cálculos realizados e são especificadas quais considerações foram adotadas para esse fim.

2.6 Curvas

Para verificar a validade da equação 2.12, diversas simulações foram realizadas utilizando o *software* MATLAB. Inicialmente, criou-se um *script* que implementa essa

equação e, portanto, ele permite simular como o modelo criado se comporta às variações de densidade. A imagem abaixo mostra a curva que relaciona o ângulo α com a densidade do líquido. Nessa simulação considerou-se um lastro com massa igual 23g e para os demais elementos atribui-se massa igual a 160g.

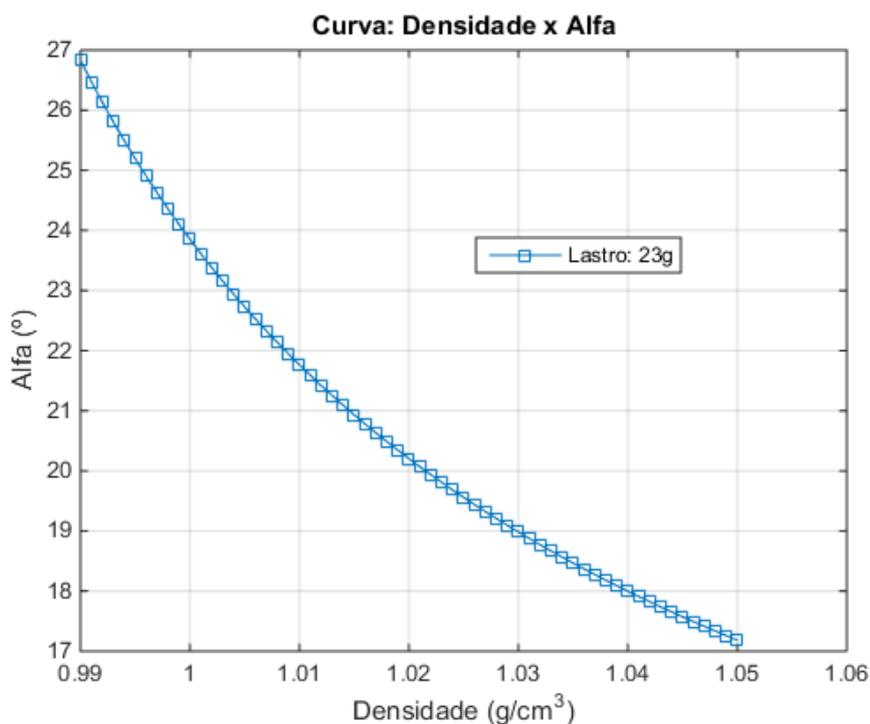


Figura 2.13. Gráfico com a curva simulada do ângulo α em função da densidade.

A análise da curva acima permite verificar que a expressão matemática encontrada parece retratar o comportamento esperado para o densímetro. Observa-se a queda do ângulo de inclinação com o aumento da densidade do líquido e essa conduta corresponde à prevista.

Com a finalidade de se observar como variações do lastro afetam a curva de inclinação do densímetro, desenvolveu-se outro script no MATLAB. O gráfico da Figura 2.14 contém as curvas de densidade obtidas através do programa mencionado. Nessa simulação consideram-se lastros de diferentes pesos e aos demais elementos atribui-se massa igual a 160g.

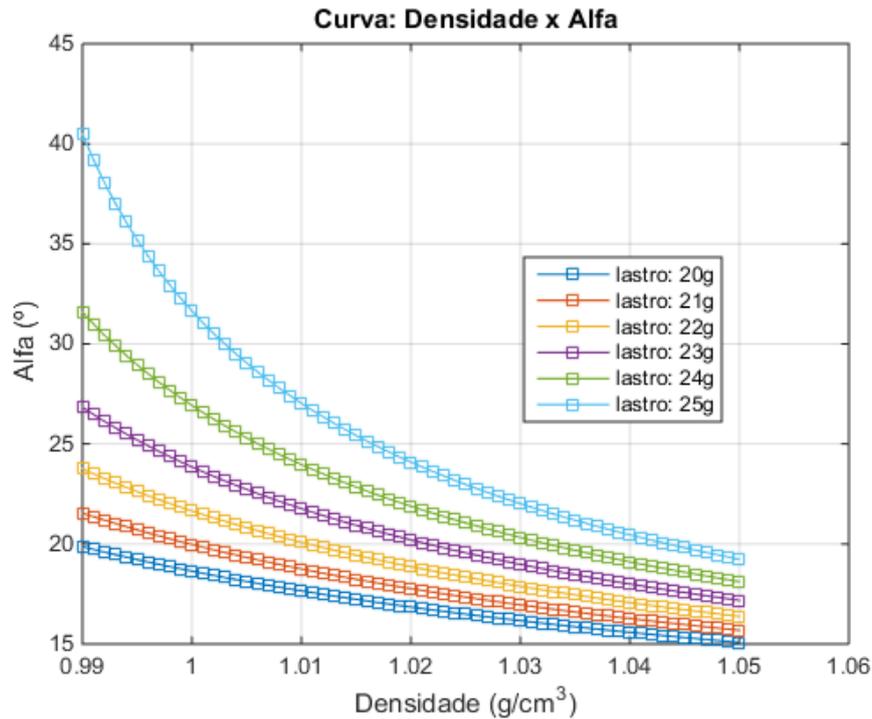


Figura 2.14. Gráfico com as curvas simuladas do ângulo α em função da densidade para diferentes massas do lastro.

As curvas do gráfico mostram que para lastros com peso menor a curva é mais linear, já para aqueles mais pesados o comportamento é mais próximo ao decaimento exponencial. Além disso, nota-se que essas variações geram deslocamentos verticais da curva. Os lastros mais pesados possuem ângulo de inclinação maior, considerando a mesma densidade e, além disso, possuem uma maior faixa de variação em graus. Tem-se então que esse comportamento corresponde ao esperado e, portanto, a equação obtida para o modelo simplificado é capaz de retratar como diferentes fatores afetam a fluabilidade do densímetro.

2.7 Métodos de Estimação da Densidade

Um das formas simples, barata e precisa de se inferir a inclinação de um dispositivo é utilizando um acelerômetro de 3 eixos, que fornece a aceleração da gravidade nos eixos X, Y e Z. Sendo assim, utilizando os dados obtidos por um acelerômetro, foram empregados 3 métodos para estimar a densidade :

- 1) Variação da projeção da aceleração da gravidade no eixo X.

- 2) Cálculo do ângulo de inclinação do tubo em relação à vertical como uma função da variação da projeção da aceleração da gravidade no eixo X.
- 3) Soma do valor absoluto das diferenças entre as medidas e os valores de referência tomados em água comum.

Para o primeiro método, se convertem as leituras numéricas da projeção da aceleração da gravidade no eixo X (ax) no correspondente valor da aceleração da gravidade:

$$g_x = ax \cdot \left(\frac{2}{32767} \right) . \quad (2.14)$$

Como será demonstrado mais adiante, a redução da densidade leva a uma redução de ax e, por consequência, de g_x .

Para o segundo método, g_x é convertido em ângulo de inclinação:

$$ang = \cos^{-1}(g_x) . \quad (2.15)$$

Tem-se que a queda da densidade levará a uma queda desse ângulo inclinação, como será apresentado nos ensaios mais à frente.

No terceiro método, o vetor referência (V_R) é a projeção da aceleração da gravidade quando o densímetro está mergulhado na água pura (CAESB). Ele é caracterizado por X_R , Y_R e Z_R . O vetor medido (V_m) quando a densidade varia é caracterizado por X_m , Y_m e Z_m . Pelo certo, deveriam ser usadas as equações de Euler para verificar o ângulo entre os dois vetores. Entretanto, a solução mais simples é usar o módulo do vetor diferença definido na equação 2.16 e que está ilustrado na Figura 2.15.

$$|V_d| = |V_m - V_R| = \sqrt{(x_m - x_R)^2 + (y_m - y_R)^2 + (z_m - z_R)^2} . \quad (2.16)$$

Esta conta envolve a biblioteca de ponto flutuante do Arduino e consome tempo de CPU. Uma solução ainda mais simples, denominado de Somatório do Módulo das Diferenças (SMDif), e que oferece um valor numérico relacionado com o módulo da diferença é dada pela equação:

$$SMDif = |x_m - x_R| + |y_m - y_R| + |z_m - z_R| . \quad (2.17)$$

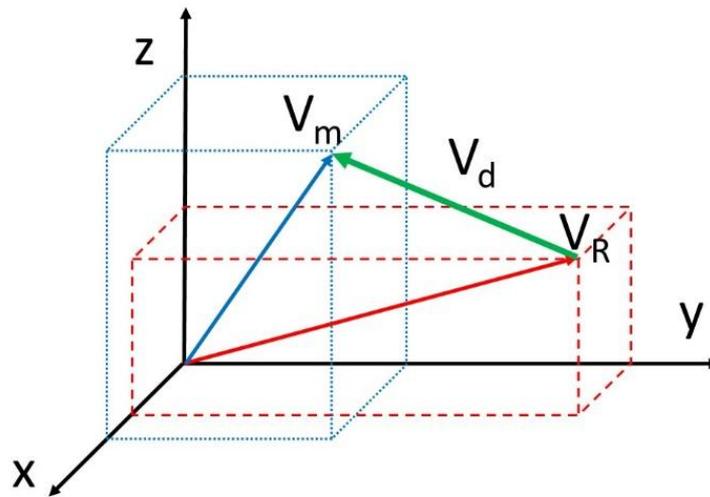


Figura 2.15. Vetores usados no cálculo do SMDif.

Será comprovado nos ensaios apresentados mais adiante que a redução da densidade leva a uma redução do SMDif.

Capítulo 3

Descrição da Proposta do Densímetro

3.1 Introdução e Funcionalidade

Este projeto tem por objetivo a criação de um dispositivo capaz de monitorar o processo de fermentação da cerveja através da medição da densidade. Todavia, em contraste aos métodos usualmente empregados, este deve aferir a densidade através do seu ângulo de inclinação no líquido. Além disso, ele deve possuir um sistema de alimentação que o dê autonomia para acompanhar toda a etapa de fermentação de maneira contínua. Por fim, este densímetro deve ser capaz de se comunicar com o meio externo para que os dados coletados possam ser acessados periodicamente e à distância para serem analisados.

Tem-se, portanto, que para implementar as funcionalidades descritas são necessários uma CPU para automatizar o processo, um acelerômetro para medir a inclinação do densímetro, um termômetro para estimar a temperatura da cerveja em fermentação, uma memória externa para armazenar as medições, um módulo *wireless* para transmitir os dados e uma bateria para alimentar o sistema. A escolha desses componentes levou em consideração duas condições importantes. A primeira é que esses elementos devem ser acessíveis e de baixo custo para viabilizar o projeto. A segunda é que esses materiais devem ser de dimensões pequenas para caberem no tubo escolhido para abrigá-los.

Os componentes escolhidos foram:

- Arduino Nano;
- MPU-6050;
- Sensor de temperatura LM35DZ;
- Memória Flash 24LC1025 ou 24LC512;
- Rádio digital NRF24L01;
- Bateria formada pelo conjunto de quatro pilhas AAA.

3.2 Esquema Elétrico

O que se apresenta aqui é o esquema elétrico correspondente à terceira versão do densímetro, que é a mais aperfeiçoada e que traz um maior cuidado no controle do consumo de energia. No momento da finalização deste texto, esta versão do densímetro estava, pela primeira vez, acompanhando uma fermentação. É importante alertar que todos os testes apresentados no presente trabalho fazem uso da segunda versão, cuja grande diferença é a ausência dos transistores MOSFET.

Nesta versão, o circuito elétrico do densímetro foi montado sobre uma placa de circuito impresso. Sendo assim, foram necessários diversos testes até se encontrar a geometria mais eficiente para a disposição de cada elemento na placa. A imagem abaixo mostra a versão atual da montagem desse circuito.

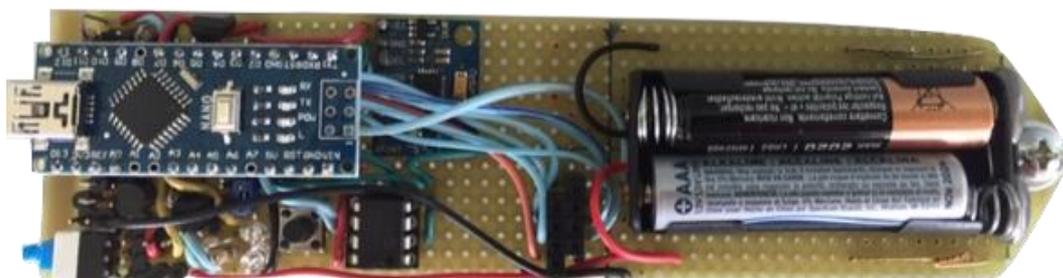


Figura 3.1. Placa com circuito elétrico do densímetro.

Os esquemas elétricos da versão atual do circuito estão apresentados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4. Esses esquemas permitem uma melhor compreensão de como os componentes são conectados uns aos outros, o que não é possível ao se observar uma imagem do circuito.

A Figura 3.2 mostra como os componentes do circuito estão integrados, de forma a favorecer a economia de energia. Nela também é observada a presença de dois transistores MOSFET. O transistor Q1 é empregado para fazer um curto circuito nos diodos D1 e D2 ao ser detectada uma queda da tensão elevada na alimentação. Esses diodos foram introduzidos para reduzir a tensão da bateria durante a operação. Porém, quando as baterias começam a se esgotar, eles devem ser removidos, o que é conseguido com Q1. O Transistor Q2 é empregado para cortar a alimentação dos periféricos quando o Arduino Nano entra no modo de baixo consumo (Modo *Sleep*).

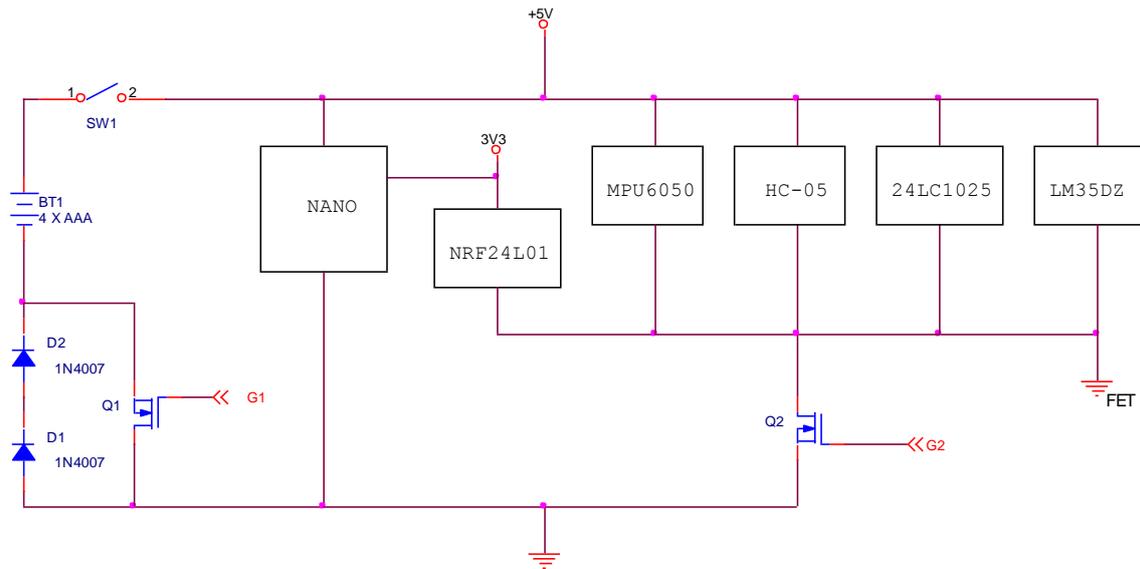


Figura 3.2. Esquema do circuito elétrico do densímetro.

A Figura 3.3 traz detalhes de como é feita a alimentação do circuito, junto com as conexões dos transistores Q1 e Q2. O divisor resistivo (R3 e R4) é empregado para monitorar o nível da tensão que está energizando o circuito, permitindo saber quando é necessário ativar o MOSFET Q1, para fechar um curto sobre os diodos. Nota-se também o uso de diversos *jumpers* para facilitar o teste e operação das diversas opções disponíveis.

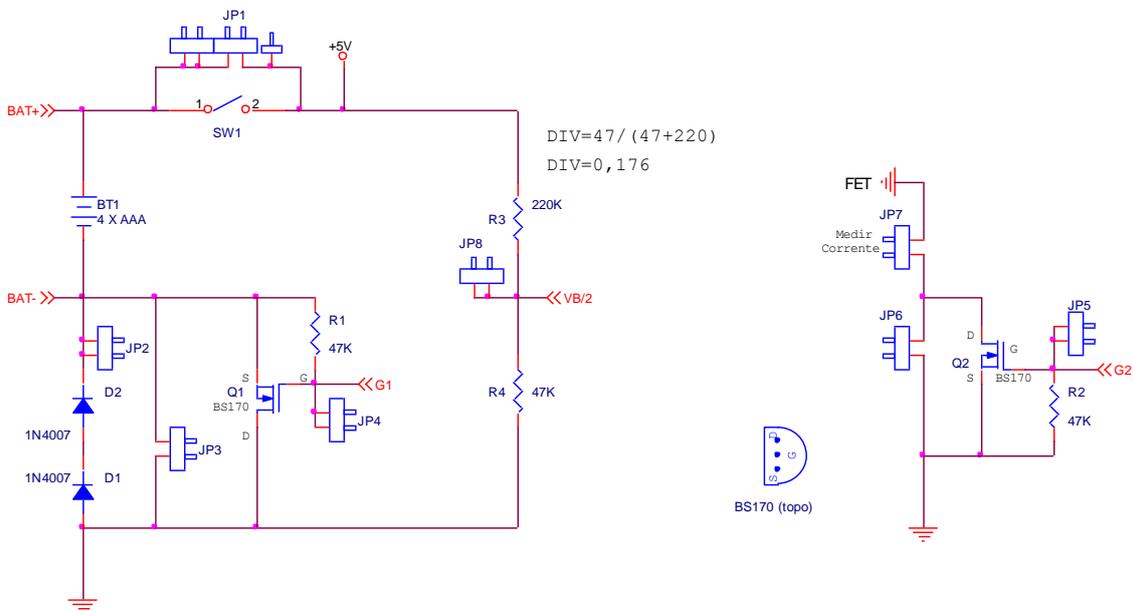


Figura 3.3. Esquema da alimentação do circuito elétrico do densímetro.

Em um primeiro ensaio, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.1, foi verificado o efeito do relógio da CPU, sem entrar em modo de baixo consumo, e da atuação de G1. Nesta tabela nota-se que a redução do relógio para 1 MHz reduz bastante o consumo de corrente em quase 50% (de 9,62 para 5,01 mA). Assim, é importante reduzir o relógio da CPU.

O segundo ponto a se notar é que o consumo de corrente aumenta com o aumento da tensão de alimentação, como seria esperado. Considerando apenas o caso do relógio de 1 MHz, se a chave G1 está aberta, a tensão sobre a CPU é de 4,31 V (queda de 1,23 V sobre os diodos), o que resulta num consumo de 5,01 mA. Quando se fecha a chave G1, a tensão sobe para 5,54 V e consumo vai para 10,56 mA. Quase o dobro do caso anterior. Evidencia-se assim a importância de se usar os diodos enquanto a bateria é nova. Porém, com o desgaste, a tensão da bateria cai, e num determinado momento será necessário fechar Q1 (MOSFET) para eliminar os diodos e aumentar a tensão aplicada sobre a CPU.

Tabela 3.1. Medições com o esquema da Figura 3.5

Clock	G1	Volts	mA
16 MHz	Aberta	4,08	9,62
	Fechada	5,35	17,5
1 MHz	Aberta	4,31	5,01
	Fechada	5,54	10,56

O teste da Figura 3.5 foi repetido, mas agora com a CPU no modo baixo consumo. A Tabela 3.2 resume as medições. Também se verificou que o custo de se habilitar o conversor A/D é de 0,11 mA. Já o MPU-6050 consome 5,09 mA quando acordado e apenas 1,41 mA quando dormindo.

Tabela 3.2. Medições usando o esquema da Figura 3.5 com a CPU em baixo consumo

G1	Volts	Consumo
Aberta	5,69	1,73 mA
Fechada	5,69	2,41 mA

O circuito da Figura 3.2 mostra o MOSFET Q2 que é usado para desconectar todos os periféricos e sob estas condições, como mostrado na Tabela 3.2. Pode-se concluir que o mínimo consumo que se consegue com este circuito do densímetro está perto de 1,73 mA.

3.3 Arduino Nano

Diante da necessidade de se escolher um processador de tamanho reduzido, com modos de operação de baixo consumo, que pudesse ser alimentado por uma fonte de tensão externa e que tivesse recursos para a comunicação com computadores ou outros microcontroladores, optou-se pelo uso do Arduino Nano. Esse dispositivo costuma ser uma boa opção para projetos compactos por ser funcionalmente igual ao Arduino Uno, mas com tamanho reduzido e também por ser acessível e de baixo custo.

O Arduino Nano é uma placa pequena, fácil de usar e que utiliza o microcontrolador Atmel Atmega328P. A imagem abaixo traz um registro deste dispositivo.

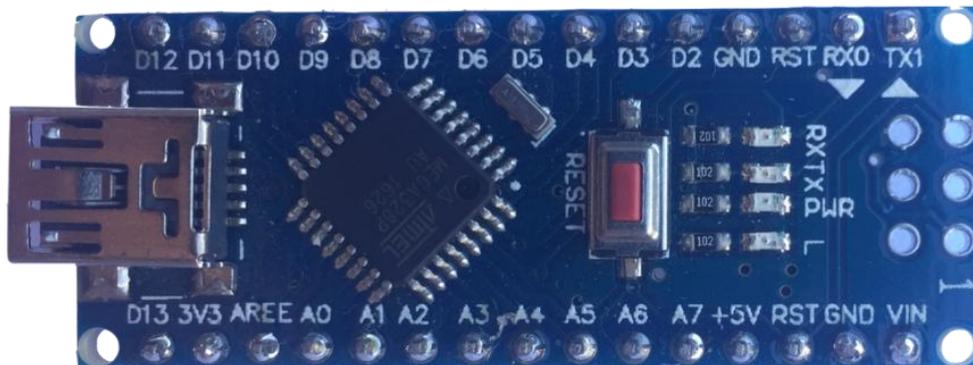


Figura 3.6. Arduino Nano.

As suas principais características são:

- Memória Flash: 32 KB, sendo 2 KB usados pelo *bootloader*
- EEPROM: 1KB
- SRAM: 2KB
- Tensão de alimentação (recomendada): 7 – 12V
- Velocidade do relógio: 16 MHz

- Pinos digitais (I/O): 22, sendo 6 PWM
- Pinos de entrada analógica: 8
- Corrente DC por pino (I/O): 40 mA
- Conversor A/D de 10 bits
- Porta Serial síncrona e assíncrona
- Interface I2C
- Interface SPI
- Temporizador: um de 16 bits e dois de 8 bits

3.4 Acelerômetro

Este projeto propõe que a densidade da cerveja em fermentação seja estimada pelo ângulo de inclinação do densímetro. Dessa forma, verificou-se que umas das formas simples, barata e precisa de se inferir a posição angular deste dispositivo seria utilizando um acelerômetro de 3 eixos. Esse equipamento mede a projeção da aceleração da gravidade nos 3 eixos (X, Y e Z) e através dos valores obtidos determina-se a inclinação do objeto.

Dentre as opções existentes no mercado, decidiu-se usar o MPU-6050. Essa escolha foi feita com base em alguns fatores importante. Uma das razões foi a desse equipamento ser acessível, de baixo custo e fácil uso. Outro motivo é que este componente possui dimensões pequenas. Também foi um fator de grande relevância a compatibilidade de suas características elétricas e de comunicação com as do Arduino Nano.

O MPU-6050 é um chip fabricado pela InvenSense. Ele disponibiliza ao usuário um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio de 3 eixos. As escalas do acelerômetro são +/- 2 g, +/- 4 g, +/- 8 g e +/- 16 g e as escalas do giroscópio são +/- 250 gr/s, +/- 500 gr/s, +/- 1000 gr/s e +/- 2000 gr/s (gr/s = graus/segundo). Os valores são entregues como inteiros de 16 bits com sinal e, portanto, eles que varrem a faixa de -32.768 até 32.767.

Em geral, esse chip é encontrado soldado em pequenas placas para facilitar o seu uso. A placa mais comum no Brasil é a GY-521, mostrada na Figura 3.7 e empregada neste projeto.

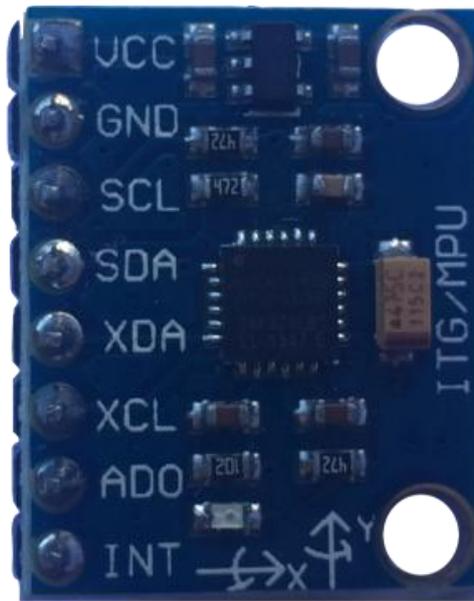


Figura 3.7. Placa GY-521

O dispositivo GY- 521 possui um regulador interno de 3,3 V e, assim, pode ser alimentado com 5 V. Outra característica importante dessa placa é que ela possui uma interface de comunicação I2C e, portanto, tem comunicação compatível com o Arduino Nano. Nos demais tópicos deste trabalho esse componente será chamado apenas de MPU-6050.

3.5 Sensor de Temperatura

Um dos fatores que influencia a medição da densidade é a temperatura. Dessa forma, notou-se a necessidade do uso de um termômetro para fazer medições periódicas da temperatura da cerveja em fermentação. Embora o MPU-6050 tenha um termômetro, este só faz leituras internas desse CI para compensar os erros do acelerômetro e do giroscópio. Assim, foi necessário acrescentar outro sensor de temperatura ao sistema.

Dentre as opções disponíveis, escolheu-se o LM35DZ, o qual é fabricado pela Texas Instrument. Além de fornecer tensão de saída linearmente proporcional a temperatura em Celsius, possui menor custo e seu consumo de energia é de apenas 60 μ A. Ele também possui ampla faixa de medição (-55 °C a 150 °C) com resultados precisos. A Figura 3.8 mostra esse componente.

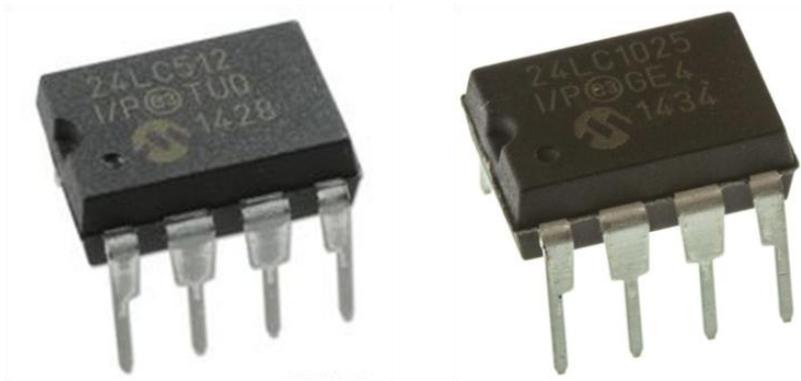


Figura 3.9. Memórias Flash 24LC512 e 24LC1025.

As memórias Flash 24LC1025 e 24LC512 são fabricadas pela Microchip. Elas operam na faixa de tensão de 2,5 V a 5,5 V, possuem baixo consumo de energia e apresentam interface serial I2C. As dimensões pequenas e custo acessível foram outros atrativos para a escolha dessas Flash.

3.7 Rádio

No processo de fermentação da cerveja, a cada hora são feitas leituras e os dados coletados são armazenados nas memórias EEPROM do Arduino e na Flash externa. Para acompanhar o desenvolvimento da fermentação, é necessário acessar as informações que estão sendo gravadas nessas memórias. No projeto de conclusão de curso desenvolvido pelo aluno Hugo Prioto foi utilizado o módulo Bluetooth HC-05 para a transmissão desses dados. Todavia, neste projeto optou-se pelo uso do rádio NRF24L01.

O HC-05 possui especificações compatíveis com este trabalho, mas por dois motivos de grande relevância foi preciso substituí-lo por outro módulo *wireless*. O primeiro motivo foi a necessidade de reduzir o consumo de energia. Através de ensaios foi verificado que esse módulo apresenta consumo elevado, aproximadamente 54 mA, enquanto a CPU consome 7,6 mA. Isso sem entrar na comunicação. O segundo motivo se deve à perda do pareamento quando ele é desligado. Como o densímetro só liga a cada hora, não é prático para quem deseja obter os dados ter que ‘adivinhar’ quando o densímetro liga para poder parear e só então pegar os dados.

Dentre as alternativas existentes no mercado, o rádio NRF24L01 foi o que melhor atendia as necessidades do projeto. Esse módulo é fabricado pela Nordic Semiconductor e trabalha na faixa de frequência ISM (2,4 - 2,485 GHz). A imagem abaixo apresenta uma foto deste dispositivo.



Figura 3.10. Radio digital nRF24L01

O nRF24L01 opera com baixo consumo, demandando 11,3 mA na transmissão de dados, 11,5 mA na recepção de dados, 26 μ A em *standby-I* e 900 nA em *power-down*. Embora opere na faixa de tensão de 1,9 V a 3,6 V, ele possui um regulador de tensão interno podendo ser alimentado por uma fonte de 5V. Esse módulo apresenta interface SPI, tem recursos que fazem checagem automática da transmissão e recepção de dados e há um grande número de bibliotecas que facilitam o seu uso. Tem-se como vantagem adicional, o seu preço acessível. Assim, ele satisfaz os requisitos do projeto e ajuda na redução do consumo de energia do sistema.

3.8 Estudo sobre Consumo de Baterias

A CPU do Arduino Nano solicita uma alimentação na faixa de 2,7 V a 5,5 V. Dentre as fontes disponíveis, foi necessário escolher uma cujas dimensões eram compatíveis com o tubo utilizado para encapsular os elementos do densímetro. Dessa forma, inicialmente utilizou-se uma bateria formada por 3 pilhas AAA, as quais têm 1,5 V cada, fornecendo ao sistema 4,5 V.

A experimentação demonstrou que somente 3 baterias (4,5 V) eram suficientes para garantir o funcionamento do sistema por um período mínimo. Isso porque a tensão das pilhas cai com o uso, fornecendo uma tensão menor do que necessária para o funcionamento do dispositivo. Dessa forma, foi preciso aumentar o número de baterias.

Em contrapartida, o tubo utilizado não conseguia comportar um soquete com 4 pilhas AAA e, então ele foi substituindo por um com diâmetro grande o suficiente para alojá-las.

O uso de 4 pilhas AAA fornece ao sistema uma tensão de alimentação de 6 V. Como o limite máximo permitido pela CPU é de 5,5 V foi necessário reduzir a tensão que chega nesse componente. Inicialmente optou-se por adicionar um diodo de silício em série com a bateria uma vez que esse gera uma queda de 0,7 V, resultando em uma tensão de 5,3 V e essa está dentro da faixa de operação do Atmega328p.

Ao se realizarem testes após essa mudança na alimentação, verificou-se que o Arduino estava queimando. Isso ocorreu porque embora as pilhas utilizadas tenham tensão nominal de 1,5 V, elas fornecem 1,6 V no início do seu uso. Dessa forma o sistema estava recendo na verdade 5,7 V e, por isso queimava. Para solucionar o problema foi acrescentado mais um diodo em série com a bateria, resultando em uma tensão de 5 V.

Após um bom tempo funcionando, há uma grande queda na tensão fornecida pelas pilhas. Para elevar essa tensão foi conectado um MOSFET (Transistor Q1) em paralelo com os diodos e outro associado à alimentação do sistema, vide Figura 3.2. Quando o sistema experimentar uma grande redução da tensão de alimentação, ficando perto do limite inferior solicitado, o MOSFET Q1 é acionado e para fechar um curto sobre os diodos, acionando assim, 1,4 V extra ao circuito de alimentação. Consegue-se assim utilizar a bateria durante mais algum tempo.

Capítulo 4

Programação

4.1 Modelo de Uso

A proposta do densímetro foi baseada na ideia de se ter um tubo simples, fácil de higienizar e transportar e que mudasse de modo de operação através de um movimento específico com ele fechado. Esse tubo seria colocado dentro do fermentador no modo de baixo consumo e, então, periodicamente ele acordaria, coletaria os dados, os armazenaria nas memórias EEPROM e Flash, transmitiria o conteúdo dessas memórias para um radio receptor e voltaria a dormir. O dispositivo só seria retirado do fermentador quando o processo de fermentação chegasse ao fim.

Para implementar essa ideia foram criados 8 modos de operação. O software que implementa cada um dos modos foi construído com IDE do Arduino. Esse ambiente de desenvolvimento utiliza uma linguagem baseada em C/C++, possui monitor serial, tem um compilador e faz *upload* do programa pela sua porta USB.

Na versão final não serão disponibilizados todos os modos de operação. Isso porque alguns deles foram criados somente para facilitar o desenvolvimento do densímetro. Tem-se também que na última versão a memória Flash externa será removida, visto que só será entregue ao usuário dados da densidade na fermentação e a EEPROM do Arduino tem espaço suficiente para armazená-los.

4.2 Modos de Operação

Como o densímetro deve permanecer fechado durante seu uso, tornou-se imprescindível o desenvolvimento de uma maneira fácil de mudar o modo de operação desse dispositivo. Na busca por soluções, verificou-se que esse dispositivo nunca fica de “ponta-cabeça” durante seu funcionamento. Dessa forma, ficou padronizado que essa posição indicaria a mudança de modo.

O programa de detecção de mudança de modo de operação foi desenvolvido com o uso dos recursos do acelerômetro. Se as medidas obtidas pelo acelerômetro indicarem

que o densímetro está posicionado de ponta- cabeça, ele muda para o próximo modo. No caso de estar no modo 3 ele passa para o modo 4, mas se estiver no modo 7 ele passa para o modo 0, reiniciando o ciclo.

Devido à importância de se saber em que modo o densímetro está operando, foram adicionados dois leds ao seu circuito. A tabela abaixo mostra número de vezes que esses leds piscam em um intervalo de 2 segundos e traz um breve resumo do que cada modo faz. Nessa tabela “Pi” significa piscar i vezes e “S” significa estar aceso sempre.

Tabela 4.1 - Modos de operação do densímetro.

Modo	Pisca		Função
	Az	Vm	
0	0	-	Medição: depois de 1 hora inicia as medições a cada hora
1	P1	-	Densidade = 1000. Aguarda 10 min e grava referência
2	P2	-	Densidade = 1050. Aguarda 10 min e grava referência
3	P3	-	Mostrar leituras do MPU e SMDif
4	-	P1	Mostrar conteúdo da EEPROM interna
5	-	P2	Mostrar conteúdo da Flash externa
6	-	P3	Apagar memórias EEPROM e FLASH
7	S	P1	Xereta – Receber dados até o momento

A seguir será feita uma descrição mais detalhada de cada modo de operação.

4.2.1 Modo 0

Este é o modo criado para monitorar o processo de fermentação da cerveja. Nele os leds permanecem desligados para economizar energia. Ao entrar nesse modo o densímetro envia um alerta e aguarda 1 min. Se o usuário não mudar de modo, só será possível sair deste quando as baterias forem exauridas ou por ação do usuário (pressionar reset).

Ao iniciar esse modo, o densímetro espera uma hora para realizar as primeiras medições. Depois, elas são repedidas a cada hora, sendo que o densímetro entra no modo de baixo consumo (dorme) durante o intervalo entre essas medições. A cada hora, o densímetro acorda, faz quatro medidas espaçadas 1 segundo, grava as informações e volta a dormir. Para evitar ruído, cada medida gravada é a média de um conjunto de 32 leituras consecutivas do acelerômetro.

Após realizar a medição e armazená-la, o densímetro verifica se tem algum dispositivo (rádio) para receber os dados. Se houver, ele transmite todos os dados da EEPROM e da Flash até o momento. Assim, o dispositivo externo, denominado de “Xereta” pode receber esses dados e permitir que o usuário acompanhe os dados da fermentação até o momento.

Como se trata de um protótipo, o SMDif é gravado na EEPROM do Arduino, como deve acontecer na versão final, porém, nesta fase de desenvolvimento, as leituras do acelerômetro, do giroscópio e dos dois termômetros são gravados na Flash externa. A versão final só terá a memória EEPROM e quando o densímetro perceber que a fermentação estabilizou (densidade parou de cair) o led verde irá piscar uma vez a cada 5 segundos.

4.2.2 Modo 1

Este é o modo criado para medir a referência de densidade 1.000 mg/cm^3 . Ao entrar nesse modo o usuário deve colocar o densímetro em um recipiente com água da torneira e aguardar. Após 5 minutos, o programa calcula a agitação superficial desse líquido. Em sequência, ele faz a medição da projeção da gravidade nos 3 eixos do acelerômetro. As medidas são realizadas na taxa de 1 Hz, durante 4 segundo, sendo que cada medida é a média de 16 leituras consecutivas. Esta referência é gravada nos 6 primeiros endereços (0 a 5) da EEPROM e da FLASH externa e a agitação é gravada no endereço 11 dessas memórias. Por fim, o programa calcula o SMDif para esta referência e a exibe no monitor serial.

4.2.3 Modo 2

Este é o modo criado para medir uma segunda referência de densidade, a sugestão é para a densidade de 1.050 mg/cm^3 . Ele foi pensado pela necessidade de se ter um segundo ponto na curva de inclinação versus densidade para que se pudesse verificar o seu deslocamento.

Ao entrar nesse modo o usuário deve colocar o densímetro em um recipiente com solução aquosa na densidade escolhida. Após 5 minutos, o programa calcula a agitação superficial desse líquido. Em sequência, ele faz a medição da projeção da gravidade nos 3 eixos do acelerômetro. As medidas são coletadas da mesma forma que no Modo 1.

4.2.4 Modo 3

Este é o modo criado para se fazerem leituras de uma forma simples. Ao entrar nesse modo, o densímetro faz uma medição (média de 16 leituras consecutivas) por segundo e, após cada medição, ele envia as leituras de aceleração e de densidade ao monitor serial para que elas possam ser acompanhadas. Por fornecer um volume grande de dados, ele é muito útil para a curva traçar a curva SMDif versus densidade.

Como não são feitas alterações nas memórias EEPROM e Flash, ao ser ligado o densímetro inicia neste modo de operação.

4.2.5 Modo 4

Este é o modo criado para que se possa consultar o conteúdo da EEPROM. Neste modo o densímetro mostra todo o conteúdo da EEPROM através do monitor serial. Cada byte é exibido em hexadecimal e ele ainda imprime em decimal o SMDif.

4.2.6 Modo 5

Este é o modo criado para que se possa consultar o conteúdo da FLASH externa. Neste modo o densímetro mostra todo o conteúdo da FLASH através do monitor serial.

Cada byte é exibido em hexadecimal e ele ainda imprime em decimal as diversas leituras de aceleração que foram gravadas.

4.2.7 Modo 6

Este é o modo criado para que se possa apagar as memórias FLASH e EEPROM. Ao entrar nesse modo, o densímetro envia um aviso de apagamento da EEPROM e aguarda 30 segundos. Se o usuário não alterar o modo, o programa apaga toda essa memória. Em sequência, ele envia um aviso de apagamento da FLASH e aguarda 30 segundos. Caso o usuário não pule esta etapa, o programa apaga toda essa memória.

Para não apagar a memória, basta virá-lo de ponta cabeça, assim como é feito para mudar de modo. Se o tempo de 30 segundos ainda não tiver acabado, ele avança para etapa seguinte.

4.2.8 Modo 7 – “Xereta”

Este é o modo criado para receber do outro densímetro (do que está dentro do fermentador) os dados das memórias até o momento. Ao entrar nesse modo o densímetro envia um alerta e aguarda 30 segundos. Se o usuário não mudar de modo, só será possível sair deste quando as baterias forem exauridas ou por ação do usuário (pressionar reset).

O densímetro que está dentro do fermentador faz uma medição a cada hora. Ao final de cada medição ele verifica se tem um receptor presente (Xereta). Se ele detectar a presença do Xereta, ele transmite todos os dados da EEPROM e da Flash.

Por sua vez, o Xereta que está do lado de fora do fermentador fica esperando a chegada do conjunto de dados para gravá-los na EEPROM e na Flash. Caso receba os dados, ele acende o led azul para sinalizar este fato. Assim, o usuário pode analisar os dados recebidos pelo Xereta e verificar como está a fermentação até o momento. Após receber os dados, se nada for feito, o Xereta, dorme, acordando 55 minutos após uma última recepção. Ele apaga todas as memórias, coloca os leds azul e vermelho para

piscar de acordo com o modo e fica aguardando uma nova transmissão de dados. Desta forma, ele sempre tem a última versão dos dados.

4.3 Operação em Baixo Consumo

Quando o densímetro é colocado dentro do fermentador para a coleta de dados, é desejável que a sua bateria seja capaz de mantê-lo funcionando durante toda a fermentação. A meta está sendo o funcionamento durante 21 dias. Sendo assim, esse dispositivo deve operar no modo de baixo consumo.

Dentre os modos de baixo consumo disponíveis na CPU Atmega 328, o Power-Down é o que mais economiza energia, uma vez que permite que seja desligado o maior número de recursos internos dessa CPU. Dessa forma, esse foi o modo utilizado para acompanhar a fermentação. Para despertar a CPU foi usado o Watchdog Timer (WDT).

Ainda para economizar energia, o relógio da CPU foi reduzido de 16 MHz para 1 MHz, o que se revelou produtivo, de acordo com as medições apresentadas na tabela a seguir.

Tabela 4.2. Medição realizada apenas com o Arduino Nano e o MPU 6050.

Clock	Ativo	Power-Down	Período do WDT
16 MHz	~13,4 mA	~2,4 mA	8,683 seg / Vcc = 4,7 V
1 MHz	~5,7 mA	~2,4 mA	8,694 seg / Vcc = 4,7 V

Um ensaio somente com o Arduino Nano, do qual se removeu o led de “power-on” demonstrou que era possível reduzir o consumo para 1,76 mA, quando dormindo. Este então é consumo mínimo que se consegue com esta CPU alimentada com 4,7 V.

Para realizar as medições a cada hora, é necessário despertar o Arduino. Dentre as ferramentas existentes, o Watchdog Timer é a mais adequada. Isso porque ele permite que CPU durma da forma mais profunda ao admitir que mais alguns recursos sejam desligados, o que não é possível com as outras opções e é também o que permite um maior período entre os despertares da CPU. Dessa forma, o WDT foi selecionado para acordar periodicamente o Arduino do modo Power-Down.

De acordo com o manual do fabricante o maior intervalo para se despertar com o WDT máximo de 8 segundos, isto com a alimentação em 5 V. A tabela citada mostra que se mediu um intervalo aproximadamente de 8,7 segundos, com a alimentação de 4,7 V. Por isso, ao entrar no Modo 0 que é o que acompanha a fermentação o programa calcula quantos despertar pelo WDT são necessários para gerar 1 hora. É claro que, de acordo com o consumo da bateria e a conseqüente queda de tensão, o intervalo WDT deverá mudar, porém isso não é levado mais em consideração. Em outras palavras, haverá um pequeno erro na geração dos intervalos de 1 hora.

Tem-se então que o densímetro fica dentro do fermentador no modo de baixo consumo e a cada 8,683 segundos uma interrupção do WDT acorda a CPU. Ao despertar, ela incrementa um contador de hora e verifica se este já atingiu o valor correspondente ao intervalo de uma hora. Se ainda não passou uma hora desde a última medida, ela volta a dormir. Caso tenha passado o intervalo de uma hora, ele zera o contador de hora, faz as medições e verifica se tem receptor presente (Xereta). Se não houver receptor presente ele volta a dormir. Caso contrário, ele transmite todos os dados das memórias Flash e EEPROM e volta a dormir.

A verificação da presença do Xereta é bem simples. Usando o rádio o densímetro que está dentro do fermentador envia uma mensagem simples e espera pela confirmação de recepção (ACK, *acknowledge*) de parte do Xereta. Se esta confirmação não chegar, é porque o Xereta não está presente. Se a confirmação chegar, ele envia todos os dados da EEPROM e da Flash.

Um detalhe importante a ser comentado é que quando se passou uma hora desde a última medição, todo o circuito é energizado através MOSFET Q2, como mostrado na Figura 3.2 do Capítulo 3. Então o densímetro faz as medições da fermentação através do MPU e do LM35DZ, grava esses dados nas duas memórias e checa a tensão na bateria. Se a tensão estiver muito próxima ao limite inferior estabelecido, ele ativa o transistor Q1 (ver Figura 3.2), que curto-circuita os diodos, adicionando em 1,4 V na alimentação.

Essa estratégia de verificar a bateria foi necessária, pois os ensaios mostraram que quanto maior a tensão fornecida ao sistema, maior o consumo do Arduino. Então era interessante usar os diodos no início do funcionamento do sistema para reduzir o

consumo de energia, mas também era necessário removê-los quando a tensão baixasse para se conseguir tirar um pouco mais de energia da bateria.

4.4 Operação do Rádio

Para que a comunicação que se propõe fazer durante a etapa de fermentação possa ser acompanhada, selecionou-se o NRF24L01. O densímetro que está dentro do fermentador usa esse módulo para transmitir a medição feita a cada hora. Por sua vez, o Xereta que está do lado de fora utiliza esse módulo para receber os dados.

A fim de que o rádio transmissor saiba se o dado enviado chegou ao destino, ativou-se o recurso de autorreconhecimento. Com esse recurso habilitado, o rádio receptor responde com uma mensagem de confirmação ACK ao receber um dado do transmissor. A seguir será detalhado um pouco mais o envio e a recepção de dados feitos com o NRF24L01.

Em seu funcionamento, o densímetro que está dentro do fermentador faz uma medição a cada hora. Após cada medição ele verifica se tem um receptor presente. Para tanto, ele configura o rádio como transmissor e envia um byte de teste para averiguar se o Xereta está disponível. Caso ele receba uma mensagem de confirmação ACK, ele envia a informação da quantidade dados das memórias EEPROM e Flash que serão transmitidos a seguir. Se receber um novo ACK, ele envia os dados da EEPROM e em sequência os da Flash. Na hipótese de não receber alguma dessas confirmações, o densímetro volta a dormir e tenta enviar os dados na próxima medição.

Um detalhe importante de ser esclarecido é que, para economizar energia, o rádio transmissor não envia toda a memória. Ele transmite blocos de 32 bytes que contêm dados de medições. São usados blocos de 32 bytes, pois esse é o maior tamanho da carga útil de um pacote transmitido pelo rádio. O manual indica que quanto maior o tamanho do pacote, menor o número de transmissões a serem feitas, o que economiza tempo e energia.

O densímetro quando usado para receber os dados da fermentação deve estar no Modo 7, que é denominado Xereta. Ao entrar nesse modo, o NRF24L01 é configurado como rádio receptor e, então fica verificando se recebeu alguma mensagem. Ao receber,

ele verifica se o dado é o byte de teste. Caso positivo, ele volta a escutar para receber mais informações. Após a recepção seguinte, ele verifica se o dado que chegou é formado por dois bytes os quais indicam a quantidade total de blocos de 32 bytes para se receber o conteúdo das duas memórias. Caso positivo, ele volta a escutar para receber os dados das memórias. Durante esta recepção, ele fica em um laço até chegar a quantidade de blocos previstos. Os dados recebidos vão sendo gravados nas memórias correspondentes. Após receber todos os dados ou se acontecer algum erro, o Xereta sai do modo recepção dados e só retorna 55 minutos depois, quando então espera novos dados enviados pelo densímetro que está dentro do fermentador.

Neste projeto foi incluída a biblioteca RF24.h, a qual contém funções que tornam mais fácil o uso do rádio. A sua configuração como transmissor ou receptor, a transmissão e a recepção de dados, assim como as demais tarefas foram feitas utilizando-se funções dessa biblioteca.

4.5 Estimador de Agitação

Para a medição realizada pelo densímetro ser confiável, o meio em análise precisa estar estático. Entretanto, algumas situações podem perturbar o ambiente de medição, provocando oscilações na superfície do líquido. Isto é muito comum quando se introduz o densímetro dentro de um recipiente para se fazer uma medida, como é o caso da calibragem. Neste caso, surgem oscilações que podem durar alguns minutos e é preciso esperar que elas desapareçam antes de se fazer qualquer medida. Outro caso de perturbação surge durante o acompanhamento de uma fermentação onde, ao longo dos dois ou três primeiros dias, a atividade da levedura produz uma grande quantidade de bolhas que se deslocam na vertical e podem provocar agitação da superfície do mosto e movimentar o densímetro.

A fim de se estimar a estabilidade do líquido, foram feitas duas considerações. A primeira é a de analisar a excursão da projeção da gravidade nos 3 eixos em um intervalo de 4 segundos. A segunda é de considerar um fator de ponderação igual a 50. As razões para essas escolhas estão apresentadas no Apêndice B.

A amplitude da excursão do sinal dentro da janela de tempo de 4 segundos (4 Hz de amostragem), denominada ej , é calculada pela equação 4.1.

$$e_{j_{eixo}} = \max(\text{vetor}_{eixo}) - \min(\text{vetor}_{eixo}) , \quad (4.1)$$

onde $\max(.)$ e $\min(.)$ retornam, respectivamente, a maior e a menor medida do vetor e a palavra *eixo* indica um dos três possíveis eixos: x, y ou z.

Por indicar valores numa faixa muito ampla, era interessante que essa amplitude da excursão fosse relativizada de forma a simplificar a análise. Assim, e_j foi ponderada por um fator FT igual a 50, resultado no parâmetro agitação, representado por ag .

$$ag_{eixo} = \frac{e_{j_{eixo}}}{FT} . \quad (4.2)$$

Com base em dados experimentais, definiu-se a seguinte avaliação qualitativa:

- $ag = 0 \rightarrow 0 < e_j < 50$: estabilidade plena;
- $ag = 1 \rightarrow 50 < e_j < 100$: estabilidade boa;
- $ag = 2 \rightarrow 100 < e_j < 150$: estabilidade razoável;
- $ag = 3 \rightarrow 150 < e_j < 200$: estabilidade crítica;
- e assim por diante.

Dessa forma, foi arbitrado que para valores de agitação igual a 0, 1 ou 2 a medição é confiável. Para valores maiores, ela deve ser descartada.

O Apêndice B apresenta o desenvolvido mais detalhado da métrica usada. Neste anexo é explicado o desenvolvido da métrica proposta para avaliar a agitação do mosto e também é apresentada sua validação.

Capítulo 5

Ensaíos

5.1 Validação das Métricas e_j e a_g

5.1.1 Validação da Métrica e_j

Para a validação da métrica e_j foram realizados três ensaios que consistiram em perturbar a água de três formas diferentes: vertical, circular e horizontal (no sentido da maior dimensão do recipiente). Foi usada a mão para provocar essas perturbações, que foram intensas o suficiente para provocar na superfície ondulações de alguns centímetros. Após cada perturbação, foram colhidas leituras dos 3 eixos do acelerômetro até a água voltar à estabilidade.

Os resultados foram obtidos com o densímetro imerso em água contida num recipiente aproximadamente cúbico com dimensões horizontais de 20 x 27 cm e altura da coluna de água de 20 cm, como mostrado na Figura 5.1. O intervalo de tempo entre as medidas com o acelerômetro foi de 200 ms (5 Hz), sendo que cada medida é o resultado da média de 8 leituras consecutivas (leituras seguidas, sem qualquer intervalo de tempo entre elas). Para cada perturbação foram feitas análises com três tamanhos de janela: 5, 10 e 20 amostras.



Figura 5.1. Foto do ambiente usado para estudar o comportamento do densímetro quando imerso em um líquido que está em movimento agitado (na foto a água está parada).

Através desses ensaios foi possível avaliar a proposta e verificou-se que uma janela pequena indica a estabilidade muito cedo, as janelas maiores parecem indicar estabilidade mais coincidente com a observação visual. Assim, recomenda-se o uso de janelas 4 segundos.

Embora os ensaios tenham resultados satisfatórios, devido à faixa de valores de ej ser muito ampla, o julgamento da estabilidade do líquido torna-se difícil. Assim, para tornar mais prática a indicação da qualidade da medida foi necessária uma análise adicional que resultou na criação da métrica agitação (ag), que é a métrica ej dividida por um fator de ponderação.

Por fim, deve-se citar que como esses ensaios mostraram muitas oscilações, realizou-se um estudo espectral das oscilações na superfície do líquido de cada um deles para verificar se havia uma frequência natural de oscilação e se o tipo de perturbação interfere nessas frequências. O ponto mais importante desta análise foi a constatação de que realmente existe uma frequência natural de oscilação e que para o recipiente empregado (com) água ela é de 0,8 Hz.

O Apêndice B traz mais detalhes da realização de cada teste. Nele são apresentados os gráficos obtidos pelo processamento das amostras através do MATLAB e é feita uma análise completa destes gráficos.

5.1.2 Validação da Métrica a_g

Com o intuito de validar a proposta da métrica para a agitação do líquido e verificar sua repetibilidade foram realizados dois ensaios, denominados de Teste 12 e Teste 13. Essa numeração tem a ver com a sequência usada para identificar os diversos testes e ensaios realizados com o densímetro.

Nos dois testes, o densímetro foi imerso na água e submetido a 4 perturbações: vertical pequena, vertical grande, circular pequena e circular grande. O densímetro permaneceu coletando as amostras dos três eixos do acelerômetro e giroscópio continuamente durante toda a duração dos ensaios e as perturbações foram realizadas em sequência, uma após a outra, mas antes esperando pela estabilização da água.

É importante comentar que as perturbações foram realizadas com a própria mão e os termos pequeno e grande são meramente qualitativos. Para evitar uma grande quantidade de dados, não se realizou a perturbação horizontal, já que se espera que ela nunca aconteça durante o emprego normal do densímetro. A perturbação mais provável é a vertical, pois ela acontece quando se imerge o densímetro (movimento vertical) e durante a fermentação, quando surgem bolhas que se deslocam na vertical. A perturbação circular foi estudada devido à demora para sua estabilização.

Nestes dois ensaios foram usados dois densímetros diferentes para poder verificar uma possível variação de um equipamento para o outro. A Figura 5.2 apresenta a posição dos dois densímetros antes de iniciar o teste e com a água em completa estabilidade, onde se indica também a inclinação do tubo do densímetro.

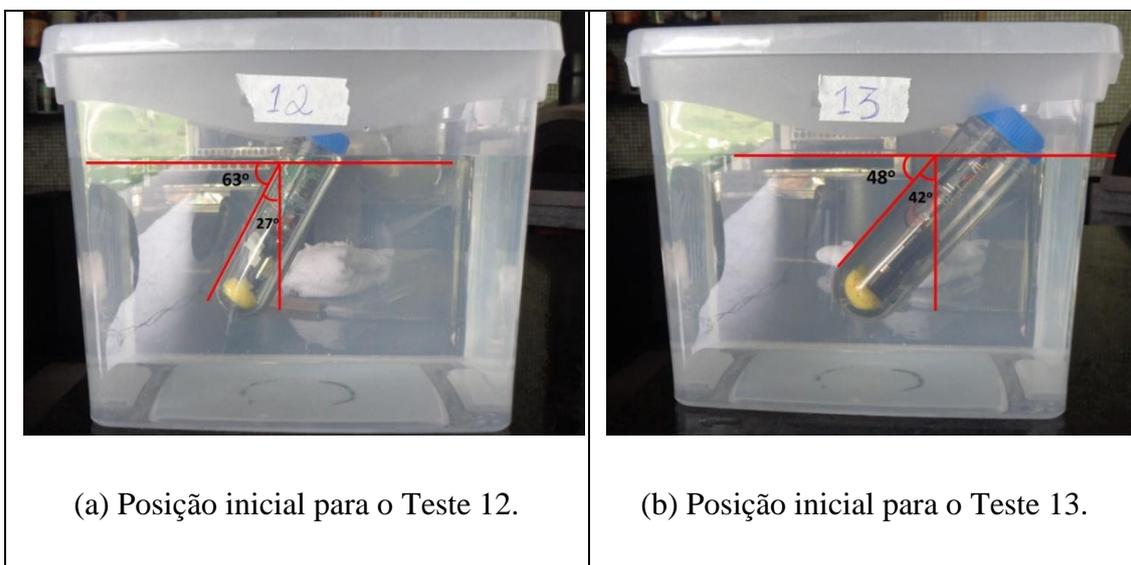


Figura 5.2. Fotos com os densímetros usados nos dois ensaios em questão. Elas foram obtidas com o líquido (água) em completa estabilidade

Ao contrário dos ensaios feitos para a validação de *ej*, nestes se trabalhou com uma medida por segundo sendo cada uma dessas medidas a média de 16 leituras consecutivas. Essa média com 16 leituras consecutivas reduz bastante o ruído intrínseco de cada eixo do acelerômetro e é muito rápida quando comparada com o período da oscilação natural da água (0,8 Hz, que corresponde a um período de 1,25 seg). A função excursão dentro da janela *ej* foi calculada de forma sequencial usando uma janela de 4 amostras (a amostra atual e as três anteriores) sem superposição, ou seja, janela de 4 segundos seguindo a equação abaixo. Foram usadas apenas as medidas do eixo *x* do

acelerômetro e giroscópio. O parâmetro agitação foi gerado com uma ponderação de FT igual a 50 e teve seu valor limitado (saturado) em 255.

Apesar de sua excursão de 0 até 255, os valores baixos são os mais importantes para se acompanhar ou estimar a estabilidade do líquido. Assim, se considerou apenas os valores de ag iguais a 0, 1, 2 ou 3. Acima de 3, já se pode considerar a medida não confiável e, portanto, foi transformado em 3. Isso facilitou muito a visão simultânea da movimentação percebida pelos acelerômetros e a medida da agitação quando o líquido está quase estável.

Como resultado desses testes, tem-se que foi possível validar métrica ag e através deles se demonstrou que só são interessantes os valores de $ag < 3$. Acima de 3, já se pode considerar a medida não confiável.

Uma constatação prática dos Testes 12 e 13 é a necessidade de se conseguir uma disposição rígida dos componentes internos do densímetro. Isto foi levado em conta e uma nova proposta foi feita com todos os componentes solidários a uma única placa.

O Apêndice B traz mais detalhes da realização de cada teste. Nele são apresentados os gráficos obtidos pelo processamento das amostras através do MATLAB e é feita uma análise completa destes gráficos.

5.2 Variabilidade na Montagem e Operação do Densímetro

Este ensaio teve como objetivo experimentar a variabilidade na montagem de um densímetro e levantar suas curvas de inclinação versus densidade. Sendo assim, foram realizados testes com diversas montagens para ver o perfil das medidas e também sua repetibilidade.

A Figura 5.3 identifica os principais módulos intercambiáveis do densímetro submetido aos experimentos.

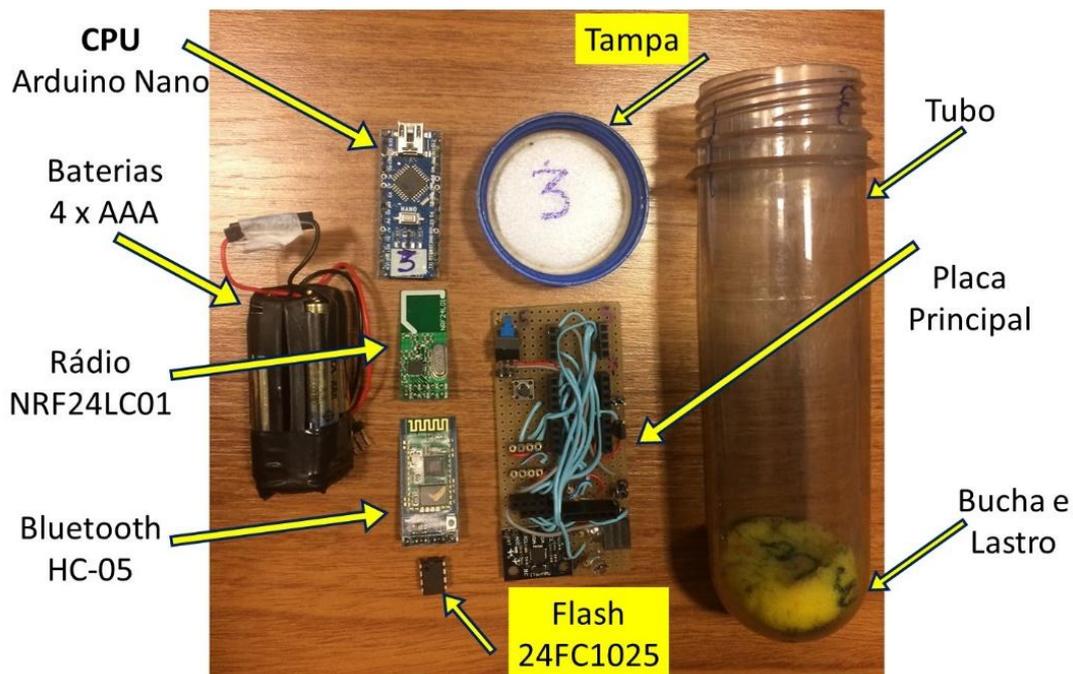


Figura 5.3. Principais componentes do densímetro.

Por ocasião deste ensaio estavam disponíveis 5 placas mãe. Os componentes internos, tais como, módulo Bluetooth, Rádio Digital, memória, soquete de baterias, placa de CPU, tubo etc., são intercambiáveis e foram misturados durante os experimentos. Não se tinha disponibilidade de 5 unidades de cada item. Por exemplo, existia a disponibilidade de apenas dois módulos *Bluetooth* e dois rádios. Por isso, nos diversos testes, alguns módulos foram repetidos.

Para cada montagem foi necessário ajustar a quantidade de lastro para se conseguir que o densímetro ficasse numa posição levemente inclinada quando colocado em água com densidade próxima de 1.000 mg/cm^3 , a qual foi representada por $R_{1.000}$.

Para realizar medições foram preparadas soluções salinas com as típicas densidades encontradas na fermentação de cerveja: 1.000, 1.010, 1.020, 1.030, 1.040, 1.050, 1.060 e 1.070 mg/cm^3 . Essas soluções foram obtidas através da adição de sal em água. Inicialmente colocou-se água pura (CAESB) em oito recipientes. O primeiro foi mantido somente com água, e a densidade medida foi de 1.000 mg/cm^3 . Aos demais foi adicionado sal até atingirem as densidades almeçadas. Na Figura 5.4 são mostrados os oito recipientes, cada um com solução salina numa determinada densidade.

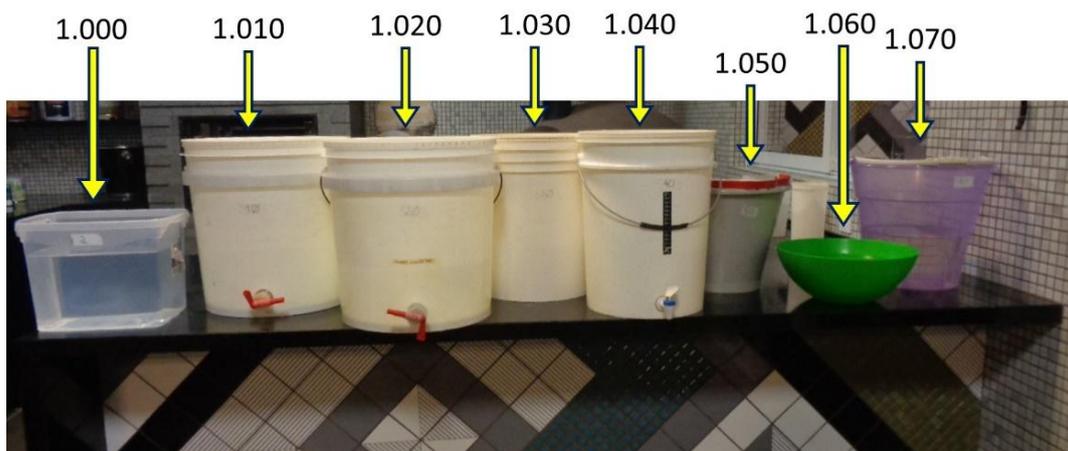


Figura 5.4. Recipientes com as diversas soluções utilizadas nos testes.

Nestes experimentos, o acelerômetro foi programado para a escala de maior resolução, que é a de ± 2 g. O giroscópio também usou sua maior resolução que é a escala de ± 250 graus/s. A taxa de medição foi de 1 Hz (1 medida por segundo), sendo que cada medida é a média de 16 leituras consecutivas (sem intervalos) do acelerômetro.

Como os ensaios tinham a finalidade investigativa, a cada segundo todas essas informações (7 leituras = 6 eixos + agitação) eram disponibilizadas. Para facilitar a comunicação com o computador, foi usado apenas o Bluetooth. O rádio digital ainda não funcionava corretamente por ocasião dos testes. Assim, a cada segundo o densímetro transmite as medidas via Bluetooth e o computador as armazena num arquivo ASCII padrão. Isso facilitou o processamento posterior, feito com o Matlab, para traçar as curvas que descrevem o comportamento do densímetro em função da densidade.

Ao todo foram realizados 11 testes. A Figura 5.5 apresenta os 11 gráficos de inclinação (graus) versus densidade obtidos através deles. As imagens estão pequenas, porém a intenção é classificar as curvas e por isso é importante que todas estejam em uma única página. Para saber detalhes de cada teste, vide Anexo C.

O que se constata de pronto é que as curvas dos Testes 02 e 09 apresentam grandes irregularidades e devem ser descartadas.

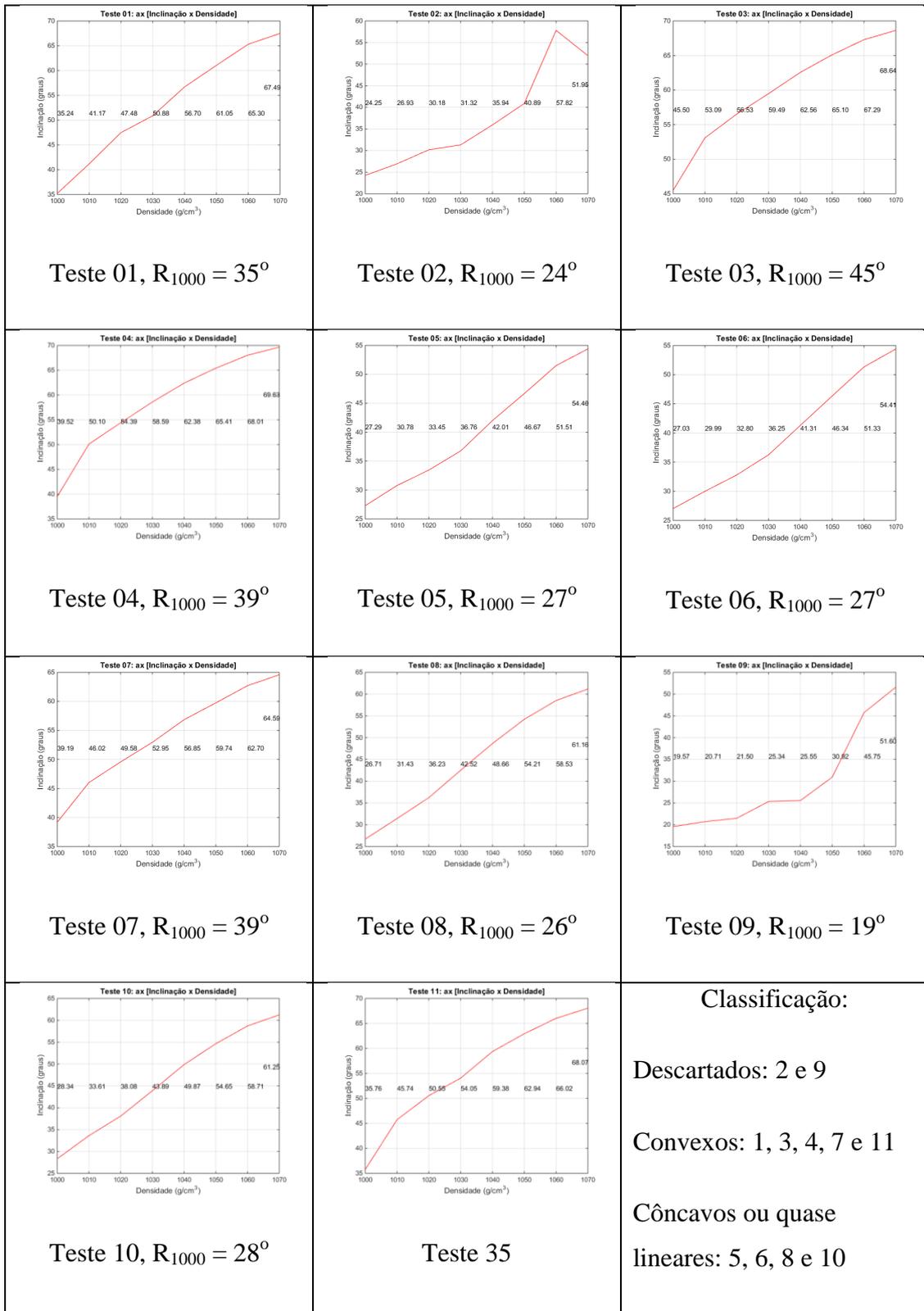


Figura 5.5. Curvas de inclinação (graus) versus densidade, para os 11 testes realizados.

Na Figura 5.5, notam-se dois tipos de curvas: as convexas e as côncavas ou quase lineares. Parece haver uma forte relação entre a inclinação em água pura e o formato da curva. A tabela abaixo relaciona esses dois parâmetros.

Tabela 5.1. Duas classes de curvas

Tipo de curva	Inclinação em água pura: R_{1000}
Convexa (1, 3, 4, 7 e 11)	35° , 45° , 39° , 39° e 35°
Côncava ou quase linear (5, 6, 8 e 10)	27° , 27° , 26° e 28°

A Figura 5.6 apresenta as curvas de inclinação para esses dois casos. As duas curvas na parte superior correspondem às curvas convexas. A parte da direita apresenta as mesmas curvas, mas descontado o valor de referência R_{1000} , por isso todas elas partem do valor zero. As duas curvas na parte inferior correspondem às curvas côncavas ou quase lineares.

Analisando as curvas da Figura 5.6 é de se notar que as chamadas convexas apresentam uma dispersão maior. Já as côncavas parecem ter um comportamento mais próximo. Entretanto, vale lembrar que as curvas 05 e 06 devem ser semelhantes pois correspondem à mesma montagem.

A análise da Figura 5.6 demonstra que ainda há muita variabilidade no comportamento do densímetro. Os testes comprovaram que a disposição interna dos componentes tem uma influência muito grande no seu comportamento. Da análise das duas classes de curvas, percebe-se que se a inclinação do densímetro em água comum for entre 20 ou 30 graus, a curva da inclinação se aproxima do caso linear desejado.

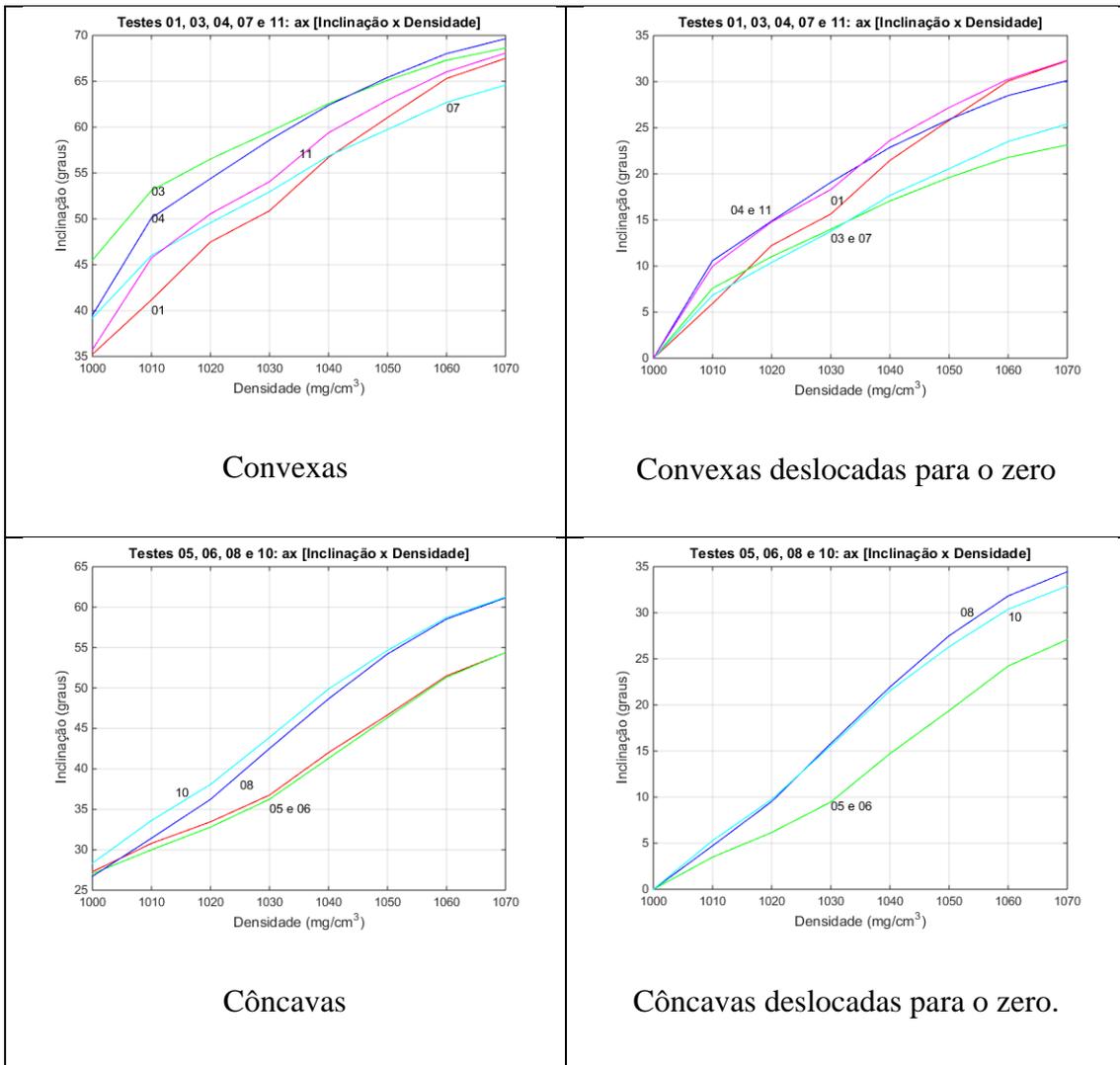


Figura 5.6. Curvas de inclinação (graus) versus densidade. Na metade superior estão os casos convexos e na metade inferior, os casos côncavos.

5.3 Emprego do Densímetro em 5 Fermentações

Até o momento, o Densímetro foi empregado para acompanhar 5 fermentações e os resultados serão aqui analisados. Nos 4 primeiros casos, as baterias não foram suficientes para sustentar o funcionamento durante o tempo necessário. Portanto, será feita uma análise limitada dos dados coletados. O último acompanhamento ainda está sendo realizado. Conseqüentemente, só serão apresentados detalhes da montagem utilizada nele.

5.3.1 Emprego 1 (Teste 14)

Uma primeira versão do densímetro foi preparada para acompanhar a fermentação do Prof. Mintsu, que foi iniciada no dia 17/03/2019 e recebeu o nome de Teste 14. Nesta versão não foram montados o módulo Bluetooth e o rádio digital. As características do dispositivo estão apresentadas na tabela abaixo, sendo que o peso total foi de 192,6 g.

Tabela 5.2 – Teste 14: Configuração empregada

Tubo/Tampa	Placa+Flash	Nano	Soq+Bat	Lastro
3	3	3	3-Duracell	
91,4	24,3	4,4	53,2	19,0

As referências com as respectivas inclinações obtidas durante a calibração do densímetro estão apresentadas na Tabela 5.3. A Figura 5.7 apresenta a conferência destas inclinações a partir das fotos e nota-se que elas estão próximas, a diferença é pequena e ficou abaixo de 4 graus. Com a configuração indicada, o densímetro foi capaz de operar apenas durante 162 horas, o que corresponde a 6,75 dias. Esta duração está muito longe da meta pretendida que é de 21 dias. Uma conferência do programa descobriu que havia uma falha no controle do MPU-6050 (acelerômetro) que nunca era colocado no modo de baixo consumo.

Tabela 5.3 – Teste 14: Resultados da calibração

	ax	ay	az	Ângulo (ax)
1.000 g/cm ³	-13571	-05139	-03255	34,1°
1.052 g/cm ³	-07221	-10856	-06315	63,8°

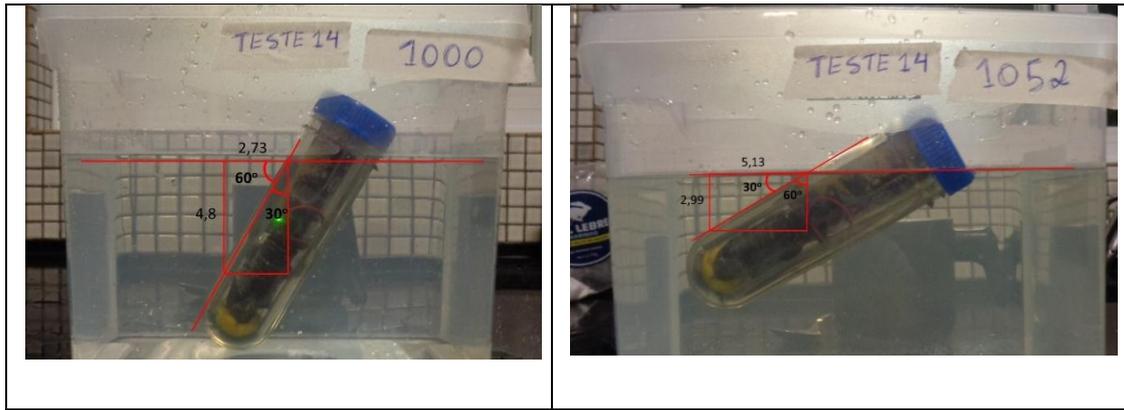


Figura 5.7. Teste 14: Inclinação do densímetro sob as duas condições de referência.

A Figura 5.8, na porção da esquerda, apresenta a evolução da inclinação do densímetro ao longo das 162 horas. Nota-se um comportamento estranho entre as horas 60 e 100. A julgar pelos valores de calibração, esta montagem do densímetro ficou próximo dos resultados do Teste 11. Assim, as linhas horizontais indicam os valores de densidade tomando este Teste 11 como referência. A densidade original do mosto foi de 1.062 g/cm^3 , medida com um densímetro tipo vareta, o que na figura está bem fora da escala sugerida. Ainda na Figura 5.8, na porção da direita, tem-se a projeção da gravidade nos três eixos. Notam-se grandes variações. Curiosamente, a métrica de agitação sempre indicou zero.

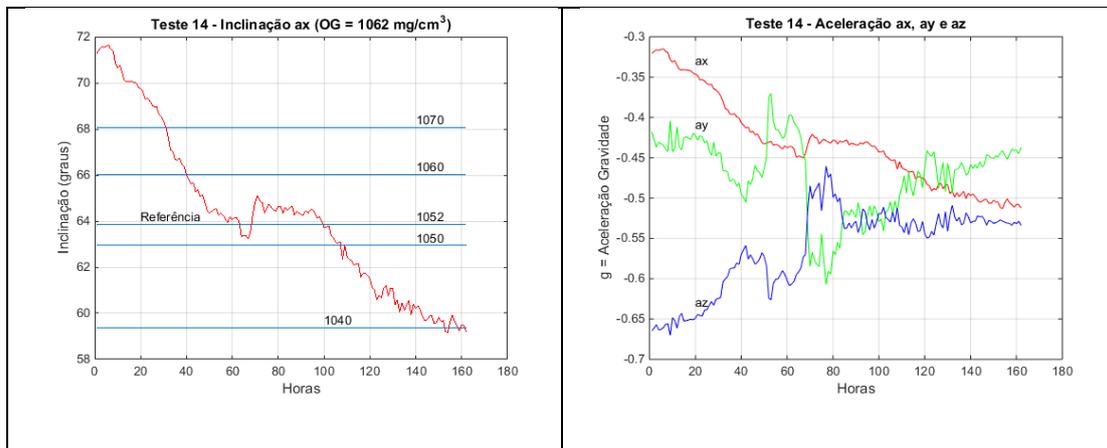


Figura 5.8. Teste 14: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 162 horas. As linhas horizontais tomam o Teste 11 como hipótese para a escala da densidade.

5.3.2 Emprego 2 (Teste 15)

Uma nova versão do densímetro foi preparada para acompanhar uma fermentação iniciada no dia 30/03/2019, que recebeu o nome de Teste 15. Nesta versão, novamente, não foram usados o módulo Bluetooth e o rádio digital. O programa ainda trazia o erro de não colocar o MPU-6050 no modo baixo consumo quando ele não era necessário. As características do dispositivo estão apresentadas na tabela abaixo, sendo que o peso total foi de 194,8 g.

Tabela 5.4 – Teste 15: Configuração empregada

Tubo/Tampa	Placa+Flash	Nano	Soq+Bat	Lastro
5	4	4	Ray-o-Vac	-
91,8	23,6	4,5	Não pesado	Não pesado

A Tabela 5.5 apresenta as acelerações e inclinações medidas em cada solução de referência. A Figura 5.9 indica uma razoável proximidade (5 graus) entre as medidas obtidas pelas fotos e as calculadas a partir da leitura do eixo ax.

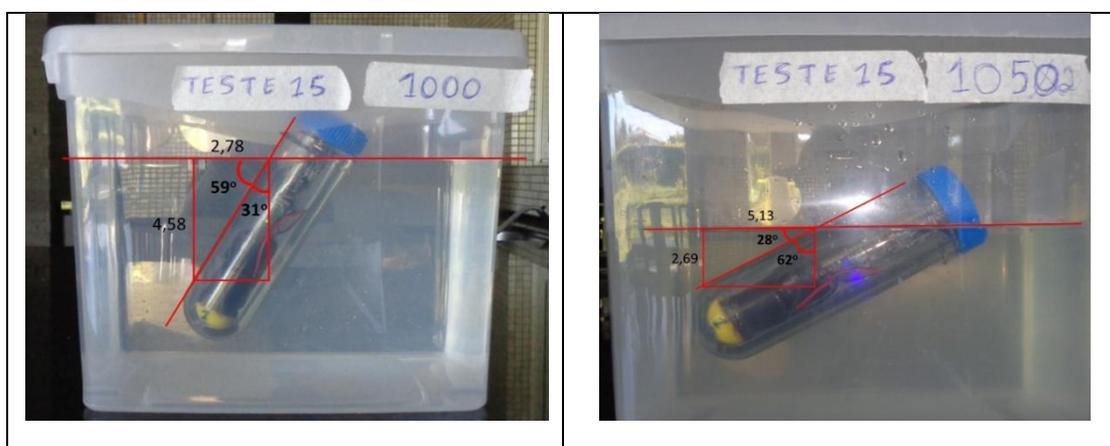


Figura 5.9. Teste 15: Inclinação do densímetro nas soluções de referência.

Tabela 5.5 – Teste 15: Resultados da calibração do densímetro

	ax	Ay	az	Ângulo (ax)
1.000 g/cm ³	-13140	-01246	-09638	36,7°
1.052 g/cm ³	-06363	-02592	-15624	67,1°

No mosto que foi acompanhado, a densidade inicial (OG) medida foi de 1.049 mg/cm³, sendo que a final, após 21 dias chegou a 1.021 mg/cm³. As baterias conseguiram sustentar o densímetro por 172 horas, o que corresponde a 7,16 dias. A Figura 5.10 (porção da esquerda) apresenta as inclinações em função das horas. Pode-se observar uma variação brusca nas primeiras 24 horas e depois uma estabilização. Isto pode parecer um pouco inesperado, entretanto, um comportamento semelhante foi identificado no próximo teste (Teste 16). Ainda nesta figura pode-se notar que houve um pouco de agitação do mosto nas primeiras 24 horas, aproximadamente.

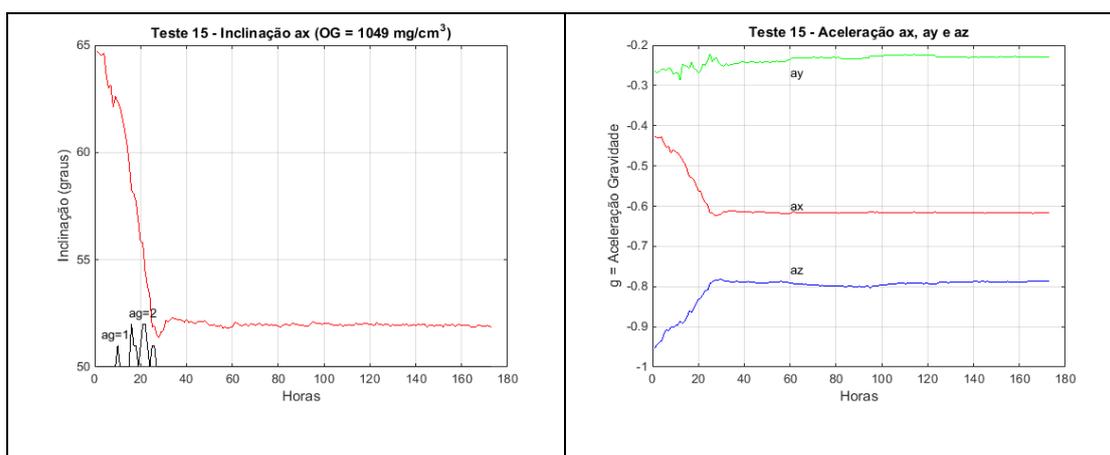


Figura 5.10. Teste 15: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 172 horas.

Ainda na Figura 5.10 (porção da direita) tem-se a projeção da aceleração da gravidade nos três eixos. Nota-se que as variações experimentadas pelo eixo ax foram também experimentadas pelo eixo az quase na mesma intensidade. Isto pode acontecer quando os dois eixos ficam num plano que contém (ou quase contém) o vetor gravidade. A Figura 5.11 apresenta a ilustração deste esquema. Nesta figura, para ilustrar a ideia, o plano formado pelos eixos ax e az contém o vetor gravidade. O eixo ay está perpendicular ao plano da figura. Assim, com a variação da densidade, o eixo ax “afunda” no líquido e com isso a projeção da aceleração em ambos eixos sofre alteração. Neste caso ideal, o eixo ay não vai experimentar qualquer alteração. Nota-se, na Figura 5.10 que o eixo ay pouco variou, o que coincide com a hipótese apresentada.

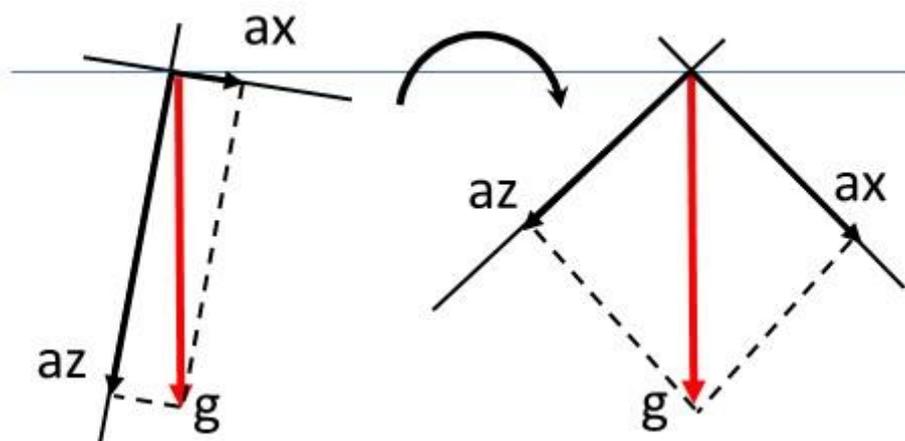


Figura 5.11. Variações semelhantes experimentadas pelo eixo ax e um segundo eixo. No caso da figura foi considerado o eixo az, sendo que o eixo ay é perpendicular ao plano da figura.

5.3.3 Emprego 3 (Teste 16)

Uma nova versão do densímetro foi preparada para acompanhar uma fermentação iniciada no dia 27/04/2019 e recebeu o nome de Teste 16. O programa foi corrigido para colocar o MPU-6050 em baixo consumo quando ele não fosse necessário e foi removido o led de “power” do Arduino Nano, pois ele ficava sempre aceso. Sob essas condições, o consumo do sistema caiu para 2,1 mA com todos os módulos “dormindo”. As características do dispositivo estão apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 5.6 – Teste 16: Configuração empregada

Tubo/Tampa	Placa+Flash	Nano	Soq+Bat	Lastro
3	3	3	Duracell	-
91,8	23,6	4,5	Não pesado	Não pesado

A Tabela 5.7 apresenta as aceleração e inclinação medidas em cada solução salina de referência. A Figura 5.12 indica uma grande diferença entre as medidas feitas pelas fotos e as calculadas a partir da leitura do eixo ax. Não foi possível encontrar explicação para esta grande diferença.

Tabela 5.7 – Teste 16: Resultados da calibração do densímetro

	ax	ay	az	Ângulo (ax)
1.000 g/cm ³	-14047	-07117	04910	30,9°
1.062 g/cm ³	-05815	-13304	10201	69,2°

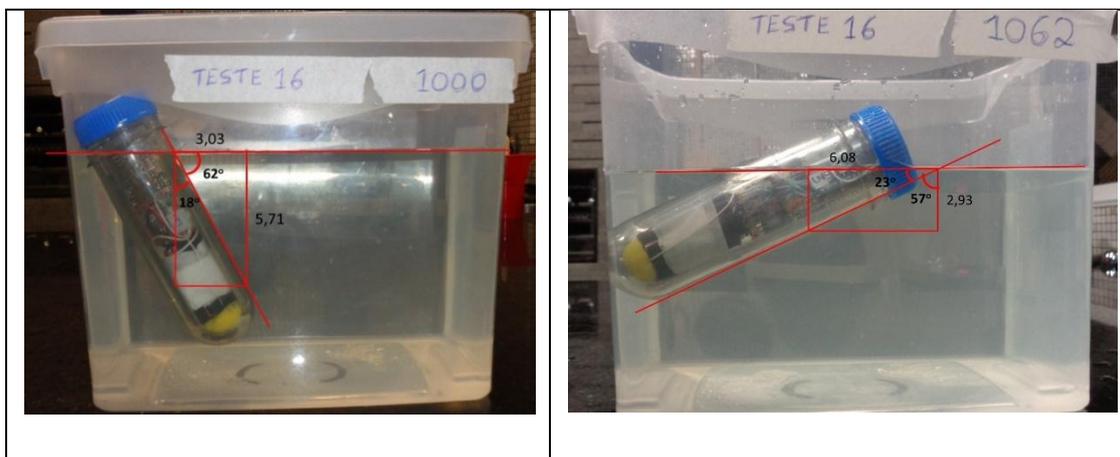


Figura 5.12. Teste 16: Medidas das inclinações do densímetro nas soluções de referência.

No mosto que foi acompanhado, a densidade inicial (OG) medida foi de 1.049 mg/cm³, sendo que a final, após 21 dias, foi de 1.021 mg/cm³. As baterias conseguiram sustentar o densímetro por 221 horas, o que corresponde a 9,2 dias. Um aumento de quase 30% em relação ao teste anterior. A Figura 5.13 (porção da esquerda) apresenta as inclinações em função das horas. Pode-se observar uma variação brusca nas primeiras 24 horas e depois uma estabilização, semelhante ao que ocorreu no teste anterior (Teste 15). Como o mesmo comportamento se apresenta pela segunda vez, ele não pode mais ser considerado inesperado. Parece que a fermentação intensa durante as primeiras 24 horas faz a densidade cair rapidamente e depois inicia uma segunda fase de caimento mais lento. Ainda, nesta figura, pode-se notar que houve um pouco de agitação do mosto nas primeiras 24 horas, aproximadamente.

Ainda na Figura 5.13 (porção da direita), tem-se a projeção da aceleração da gravidade nos três eixos. Nota-se que as variações experimentadas pelo eixo ax foram agora experimentadas pelo eixo ay, mas com uma menor excursão, isso aconteceu porque o vetor gravidade não estava no plano formado pelos eixos ax e ay. Com isso, o eixo az também experimentou alteração.

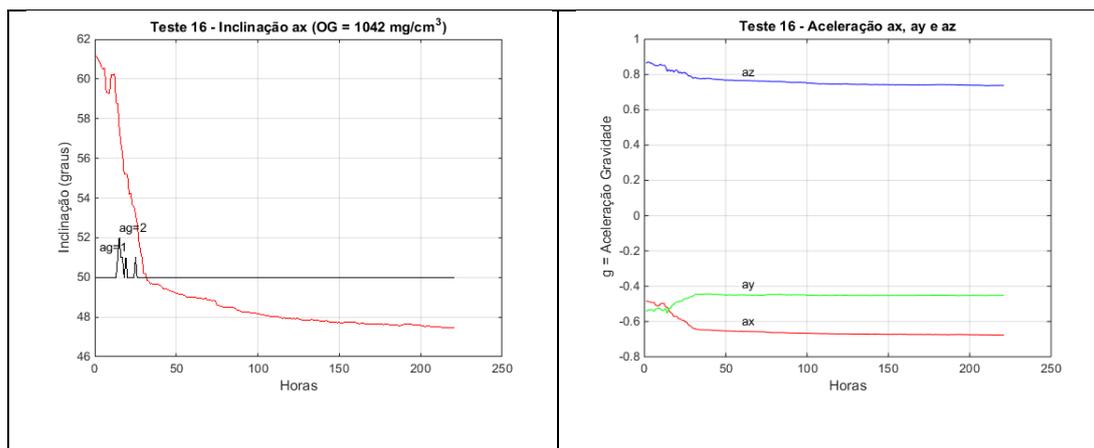


Figura 5.13. Teste 16: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 221 horas.

5.3.4 Emprego 4 (Teste 17)

Uma versão do densímetro foi preparada para acompanhar uma fermentação iniciada no dia 18/05/2019 e recebeu o nome de Teste 17. O programa usado já estava corrigido. O densímetro ficou operacional por 211 horas, o que corresponde a 8,79 dias. As características do dispositivo estão apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 5.8 – Teste 17: Configuração empregada (idêntica à do Teste 16)

Tubo/Tampa	Placa+Flash	Nano	Soq+Bat	Lastro
3	3	3	Duracell	-
91,8	23,6	4,5	Não pesado	Não pesado

A Tabela 5.9 apresenta as aceleração e inclinação medida em água comum. Para este teste não foi coletada a segunda referência. A Figura 5.14 indica uma grande coincidência entre a medida feita na foto e a calculada a partir da leitura do eixo ax.

Tabela 5.9 – teste 17: Resultados da calibração do densímetro

	ax	ay	az	Ângulo (ax)
1.000 g/cm ³	-12917	01904	-06028	37,9°

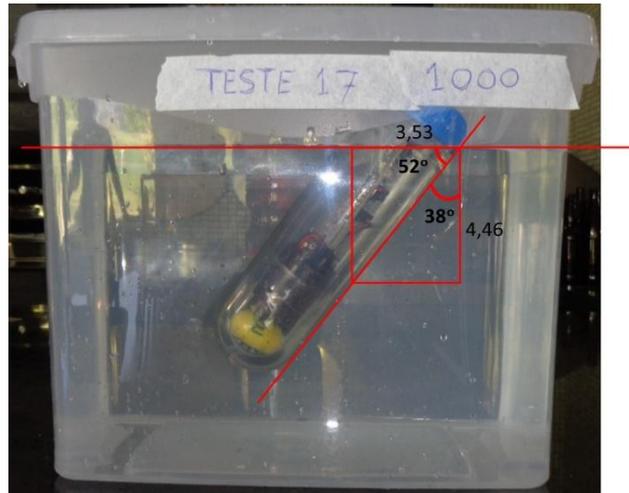


Figura 5.14. Teste 17: Medida da inclinação do densímetro em água comum.

No mosto que foi acompanhado, a densidade inicial (OG) medida foi de 1.049 mg/cm^3 , sendo que a final, após 21 dias foi de 1.011 mg/cm^3 . A Figura 5.15 (porção da esquerda) apresenta as inclinações em função das 211 horas de funcionamento. Pode-se observar uma variação acentuada nas primeiras 100 horas e depois uma estabilização, semelhante ao que ocorreu nos testes anteriores (Testes 15 e 16). Novamente se apresenta o mesmo comportamento: uma rápida caída, seguida por uma aparente estabilização. Tenta-se explicar isso por uma fermentação intensa durante as primeiras 100 horas, o que faz a densidade cair rapidamente e depois inicia-se uma segunda fase de decaimento mais lento. Para este teste, nenhuma das medidas acusou agitação diferente de zero.

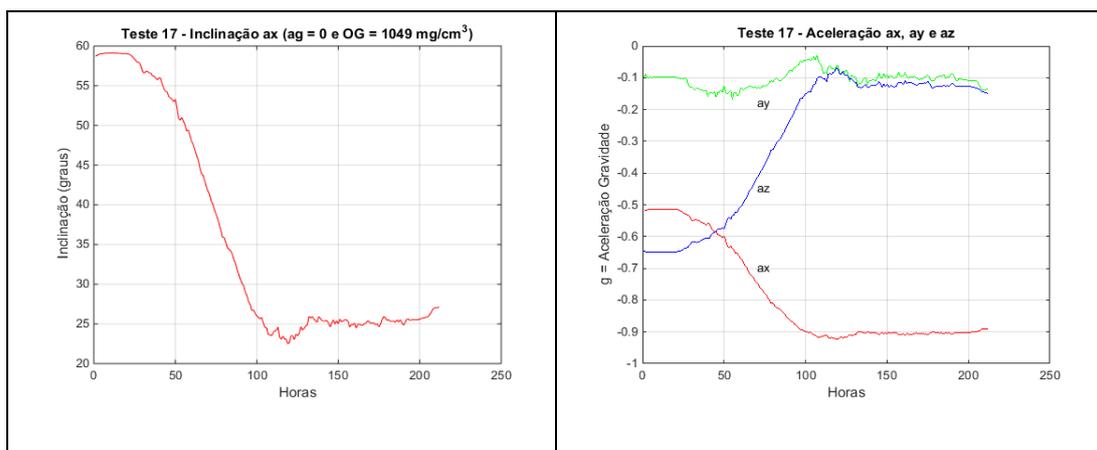


Figura 5.15. Teste 17: Inclinação do densímetro e as projeções da aceleração da gravidade nos três eixos, em função das 211 horas.

Ainda na Figura 5.15 (porção da direita) observa-se que os eixos ax e az experimentam variações semelhantes e que o eixo ay quase não variou. Como já se explicou, isto aconteceu porque a aceleração da gravidade estava contida nos planos ax e az.

5.3.5 Emprego 5 (Teste 18)

Uma nova versão do densímetro foi preparada para acompanhar uma fermentação iniciada no dia 16/06/2019, que recebeu o nome de Teste 18. Nesta versão, o soquete das baterias foi fixado junto à placa principal do densímetro. O lastro também foi amarrado à placa e se colocou um parafuso sobre o eixo principal para a adição ou remoção de porcas que fazem a sintonia fina do lastro. O densímetro ainda está fazendo a coleta de dados e, portanto, os dados deste ensaio serão apresentados somente na apresentação do trabalho. A imagem que mostra a placa na foram fixados todos esses componentes pode ser vista na Figura 5.16.



Figura 5.16. Teste 18: Placa onde foram fixados todos os componentes do densímetro.

5.3.6 Análise Conjunta dos Testes 14, 15, 16 e 17

Aqui é feita uma breve análise dos resultados coletados com os diversos testes. A Figura 5.17 apresenta a reunião de todas as curvas de inclinação. Em cada uma delas está marcado o instante em que a coleta de dados foi interrompida pela exaustão da bateria. A observação desta figura mostra que há uma grande variação no comportamento das diversas curvas. Por enquanto, não é possível levantar uma regra geral que permita arbitrar uma escala de densidade. Evidencia-se a necessidade de garantir uniformidade na montagem do densímetro e também de aumentar a duração das baterias.

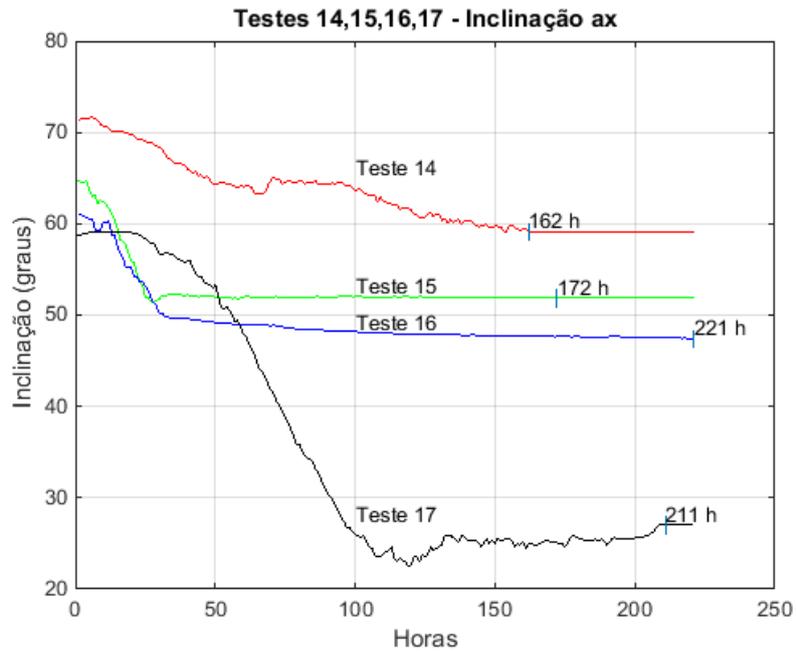


Figura 5.17. Testes 14, 15, 16 e 17: Inclinação do densímetro em função das horas.

Capítulo 6

Conclusão

A criação de um densímetro capaz de estimar a densidade da cerveja durante o processo de fermentação através do ângulo de inclinação deste dispositivo foi iniciada pelo aluno Hugo Prioto. Embora o protótipo criado pelo Hugo tenha apresentado bons resultados, ainda era necessário reduzir o consumo de energia do sistema, saber explicar os dados obtidos e fazer outras melhorias. Assim, o trabalho aqui desenvolvido teve por objetivo o aperfeiçoamento deste densímetro.

Neste projeto foi desenvolvido um modelo matemático capaz de caracterizar o densímetro, foi criada uma métrica que determina a agitação do líquido e foram elaborados métodos para estimar a densidade: SMDif, inclinação e aceleração da gravidade, mas ainda não se determinou qual deles é o mais adequado neste projeto. Também foi feita a validação dos modelos anteriores e foram realizadas melhorias na montagem com a medição dos pesos de cada componente.

Para verificar a repetibilidade na montagem do densímetro, foram feitos diversos ensaios. Através desses ensaios se constatou a necessidade de uma montagem rígida com a fixação de todos os componentes. O uso do dispositivo em 4 fermentações também demonstrou a necessidade de melhoria da montagem.

Neste projeto foram feitas melhorias no consumo de energia, ao colocar a CPU para operar no modo de baixo consumo (Power-Down) e utilizando-se a interrupção do WDT para acordá-la periodicamente. Tem-se, contudo, que, ainda é necessário reduzir o consumo.

Testes feitos com o módulo de rádio NRF24L01 permitiram confirmar seu baixo consumo de energia. Esse módulo se mostrou eficiente no envio e recepção de dados das memórias e tem a vantagem de ser fácil de configurar após ser ligado. Infelizmente não foi possível testá-lo em uma fermentação, mas do que foi apresentado ele se mostra promissor.

Tem-se então que este projeto trouxe muitas melhorias para o densímetro, mas ainda são necessários alguns ajustes para que se tenha uma redução ainda mais significativa no consumo de energia e para que o comportamento do densímetro seja mais previsível.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma melhoria na fixação dos componentes do densímetro, melhorando o comportamento das curvas de obtidas. Indica-se o uso de um relógio permanente, o qual permitiria que todo o sistema ficasse desligado por uma hora, possibilitando uma grande economia de energia. Propõe-se uma montagem que leve a um modo preferencial de flutuação, facilitando a interpretação dos dados. Por fim, recomenda-se o aperfeiçoamento do rádio para uma melhora na transmissão dos dados obtidos da fermentação e também a sua instalação de modo que a antena fique na parte flutuante do densímetro, evitando atenuações do sinal no meio aquoso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COIMBRA, A.R.; MELO, F.; AGOSTINHO, P. Cerveja e Saúde. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/187797098/Cerveja-Saude>>. Acesso em: jun. 2019.
- [2] MOSHER, R. Radical Brewing. Boulder: Brewers publications, 2004.
- [3] FERREIRA, R.H.; VASCONCELOS, M.C.R.L.; JUDICE, V.M.M.; NEVES, J.T.R. Inovação na fabricação de cervejas especiais na região de Belo Horizonte. Perspectivas em Ciência da Informação, n. 16, p. 171-191, 2011.
- [4] MORADO, R. Larousse da cerveja. São Paulo: Larousse, 2009.
- [5] MEGA, J. F. , NEVES, E., Andrade C. J. de. A produção da cerveja no Brasil. Citino, Número 1, 2011.
- [6] CRUZ, J. M. M. et al. Produção de cerveja. Reactores Biológicos Fundamentos e Aplicações, 2007.
- [7] ABRABE. Um Brinde à vida – A história das bebidas. São Paulo, 2014.
- [8] LAPOLLI, C. Mercado da Cerveja 2018. 2018. 24 slides. Disponível em: <<https://abracerva.com.br/rascunho-automatico/>>. Acesso em: jun. 2019.
- [9] ELMEHDI, H. M.; PAGE, J. H.; SCANLON, M. G. Evaluating Dough Density Changes During Fermentation by Different Techniques. Cereal Chemistry Journal, v. 84, n. 3, p. 250–252, maio 2007.
- [10] ŠAVEL, J.; KOŠIN, P.; BROŽ, A.; SIGLER, K. Convenient Monitoring Of Brewery Fermentation Course By Refractometry. Kvasny Prumysl, v. 55, n. 4, p. 94–99, 1 abr. 2009.
- [11] PRIOTO, H. L. Proposta de Densímetro com Acelerômetro. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- [12] GITHUB. iSpindel. Disponível em: <http://www.ispindel.de/docs/README_pt.html>. Acesso em: jun. 2019.

[13] PINTARELLI, G. B.; MARCONDES, H. Desenvolvimento de um Densímetro Eletrônico para Produção de Cerveja. Revista Ilha Digital, Florianópolis, 2019. Disponível em: <<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/>>. Acesso em: jun. 2019.

[14] SOUZA, B. T.; ODORCZYK, R. S. Medidor Eletrônico de Densidade de Líquidos Utilizando Refração. Dissertação (Graduação em Engenharia Industrial Eletrônica) – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

[15] AMÉRICO, M. J. Sistema de Avaliação da Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real. Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

Apêndice A

Modelo matemático detalhado do densímetro

A.1 Modelo Simplificado

Neste tópico é apresentado o modelamento matemático de um densímetro hipotético, simplificado de forma a facilitar a construção das equações, mas que ainda traz a influência dos parâmetros que são importantes para o projeto em questão. Pretende-se chegar a uma equação que relacione a inclinação do densímetro com a densidade do líquido no qual ele está imerso. Para a proposta do modelo simplificado, optou-se por dividi-lo em duas partes com densidade uniforme, como mostrado na figura abaixo.

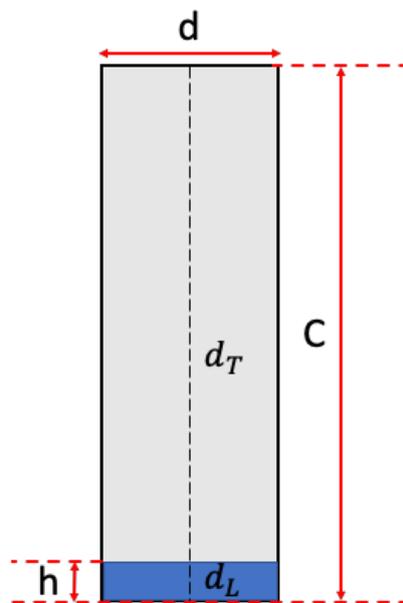


Figura C.1. Proposta de um modelo simplificado a ser usado no equacionamento da inclinação do densímetro.

Como pode ser observado na Figura A.1, o modelo faz uso de um cilindro de comprimento “ C ” e diâmetro “ d ”, que possui uma densidade uniforme “ d_T ”. A porção inferior do cilindro é preenchida com um lastro de altura “ h ” e densidade “ d_L ”. Por simplicidade, se considera que esta densidade “ d_L ” já incorpora a massa da parede e fundo do tubo que envolvem o lastro.

A.2 Equacionamento

A expressão que relaciona a densidade do líquido com o ângulo de inclinação do densímetro é obtida através da análise matemática do equilíbrio vertical e rotacional deste dispositivo. Dessa forma, para determiná-la foi necessário encontrar as equações que definem o centro de gravidade do densímetro (CG_d) e o seu centro de empuxo (CE_d) e, então, verificar como elas se relacionam com a fluatuabilidade deste equipamento.

A.2.1 Centro de Gravidade

Ao se observar o densímetro, pode-se notar que ele possui um plano de simetria que o corta verticalmente ao meio. Tem-se, portanto, que o centro de gravidade deste dispositivo encontra-se sobre esse plano de simetria. A imagem abaixo o evidêcia.

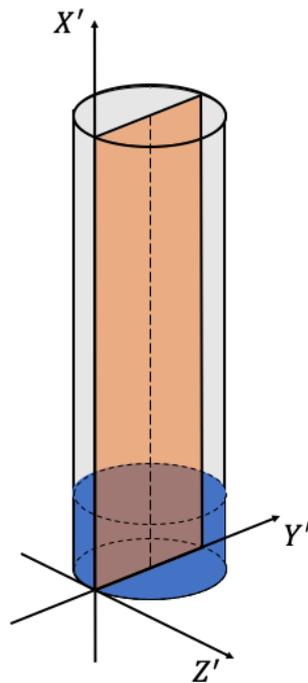


Figura A.2. Densímetro e seu plano de simetria.

A análise da figura acima mostra que, para a referência adotada, a componente de profundidade do centro de gravidade do densímetro é igual a zero:

$$Z'_g = 0 \quad . \quad (A.1)$$

Como o centro de gravidade deste dispositivo está localizado sobre o plano de simetria, as análises das outras componentes podem ser realizadas considerando-se a área formada pela intersecção desse plano de simetria com o dispositivo. A imagem abaixo mostra essa superfície plana.

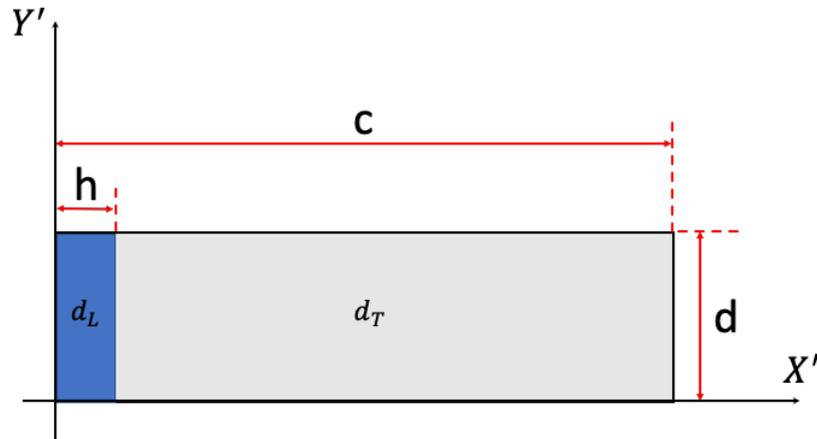


Figura A.3. Área do densímetro interceptada pelo seu plano de simetria.

Da figura acima, nota-se que as duas partes que constituem a superfície são retângulos e, portanto, têm centro de gravidade conhecidos. A imagem abaixo mostra a localização desses pontos e apresenta as convenções adotadas para o cálculo das outras duas componentes do CG_d .

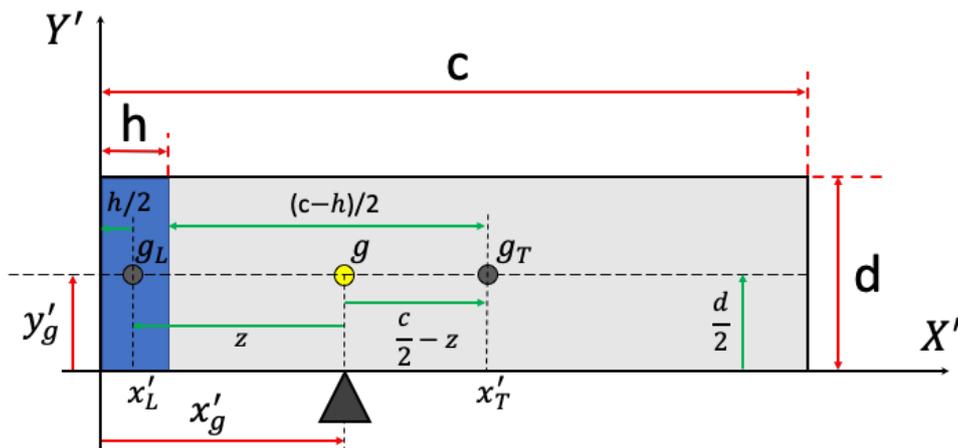


Figura A.4. Localização do centro de gravidade dos retângulos que compõem a área do densímetro interceptada pelo seu plano de simetria e convenções adotadas para o cálculo do centro de gravidade desse dispositivo.

Na figura acima g_L representa o centro de gravidade da parte formada pelo lastro e a porção do tubo que ele ocupa, x'_L é a projeção de g_L no eixo X' , g_T representa o

centro de gravidade da parte composta pelos demais elementos do densímetro, X'_T é a projeção de g_T no eixo X' , g representa o centro de gravidade do densímetro e as coordenadas X'_g e Y'_g são as projeções de g nos eixos X' e Y' , respectivamente.

A análise da Figura A.4 permite verificar que a superfície plana observada possui um eixo de simetria, o qual está representado por uma reta horizontal que corta o eixo Y' em $d/2$. Como consequência, o centro de gravidade do densímetro encontra-se sobre esse eixo de simetria e a sua componente vertical é igual a:

$$Y'_g = \frac{d}{2} . \quad (A.2)$$

Como o modelo criado para o densímetro é formado por duas partes de densidades diferentes, para determinar a terceira componente do CG_d , é necessário fazer a média ponderada do centro de massa de cada parte. Dessa forma, utilizou-se a seguinte equação:

$$X'_g = \frac{m_L \cdot X'_L + m_T \cdot X'_T}{m_L + m_T} , \quad (A.3)$$

onde m_L é a massa da parte formada pelo lastro e a porção do tubo que ele ocupa e m_T é a massa da parte composta pelos demais elementos do densímetro.

Para facilitar o uso da equação, optou-se por rearranjar os seus termos e a versão utilizada foi:

$$m_L \cdot (X'_g - X'_L) = m_T \cdot (X'_T - X'_g) . \quad (A.4)$$

Como o volume preenchido pelo lastro e a porção do tubo que ele ocupa é um cilindro de diâmetro d , comprimento h e densidade d_L , a sua massa pode ser representada pela expressão:

$$m_L = d_L \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot h \right) . \quad (A.5)$$

Simplificando a equação acima, obtém-se:

$$m_L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L \cdot h \cdot d^2 . \quad (A.6)$$

De modo análogo, como o volume preenchido pelos demais elementos do densímetro é um cilindro de diâmetro d , comprimento $c - h$ e densidade d_T , a sua massa pode ser representada pela expressão:

$$m_T = d_T \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot (c - h) \right) . \quad (A.7)$$

Simplificando a equação acima, obtém-se:

$$m_T = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_T \cdot (c - h) \cdot d^2 . \quad (A.8)$$

Além disso, da Figura A.4, tem-se que:

$$X'_g - X'_L = Z , \quad (A.9)$$

$$X'_T - X'_g = \frac{c - h}{2} + \frac{h}{2} - Z = \frac{c}{2} - Z . \quad (A.10)$$

Assim, substituindo A.6, A.8, A.9 e A.10 em A.4, obtém-se a expressão abaixo:

$$\left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L \cdot h \cdot d^2 \right) \cdot (Z) = \left(\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_T \cdot (c - h) \cdot d^2 \right) \cdot \left(\frac{c}{2} - Z \right) . \quad (A.11)$$

Isolando a variável Z , da equação acima, obtém-se:

$$Z = \frac{1}{2} \cdot \frac{(c - h) \cdot d_T \cdot c}{d_L \cdot h + (c - h) \cdot d_T} . \quad (A.12)$$

Da Figura A.4, pode-se notar que:

$$X'_g = \frac{h}{2} + Z . \quad (A.13)$$

Então, substituindo A.12 em A.13, obtém-se a equação de X'_g mostrada abaixo:

$$X'_g = \frac{h}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(c - h) \cdot d_T \cdot c}{d_L \cdot h + (c - h) \cdot d_T} . \quad (A.14)$$

Dos resultados apresentados, confirma-se que o centro de gravidade do densímetro é fixo.

A.2.2 Centro de Empuxo

Para calcular o centro de empuxo do densímetro (CE_d) é necessário definir a geometria do volume imerso deste dispositivo. A imagem abaixo mostra o comportamento do equipamento em condições normais de uso.

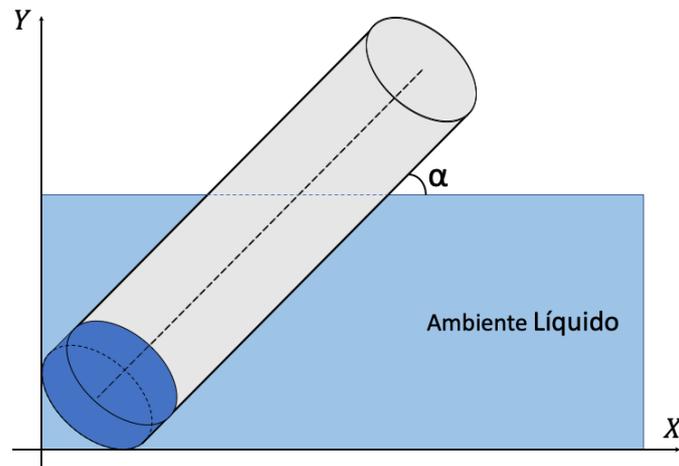


Figura A.5. Densímetro flutuando em um ambiente líquido.

Ao se observar a figura acima nota-se que o densímetro possui um plano de simetria que o corta verticalmente ao meio de tal forma que a parte submersa fica dividida em duas partes iguais. Tem-se, portanto, que o centro de empuxo deste dispositivo encontra-se sobre esse plano de simetria. A imagem abaixo o evidência.

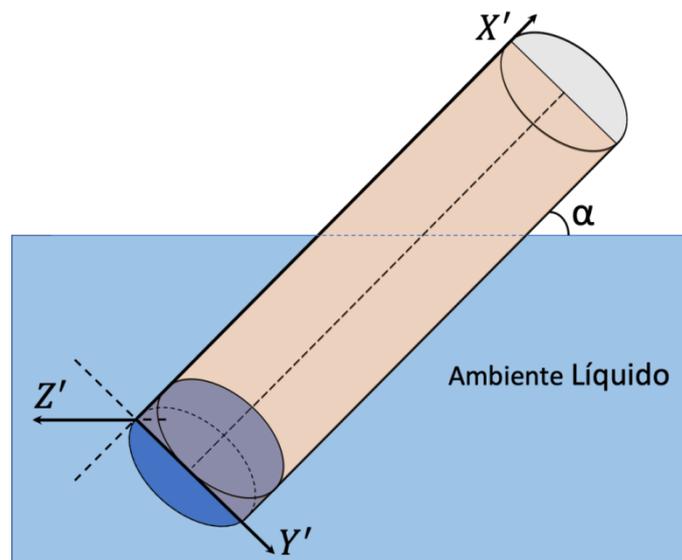


Figura A.6. Plano de simetria do densímetro que divide a sua parte submersa em duas metades iguais.

A análise da figura acima mostra que, para a referência adotada, a componente de profundidade do centro de empuxo do densímetro é igual a:

$$Z'_e = 0 \quad . \quad (A.15)$$

Como o centro de empuxo do equipamento encontra-se sobre esse plano de simetria, as análises das outras componentes podem ser realizadas considerando-se a superfície plana formada pela intersecção desse plano de simetria com a parte submersa do dispositivo. A imagem mostra essa superfície.

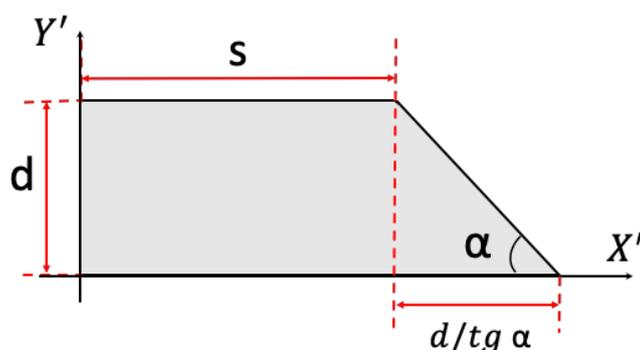


Figura A.7. Área resultante da intersecção do plano de simetria do densímetro com o volume submerso desse dispositivo.

Para aplicar as equações que calculam o centro de gravidade de superfícies planas, é necessário dividi-las em superfícies planas de geometria simples, as quais têm centro de gravidade conhecidos. Dessa forma, dividiu-se o trapézio em duas partes, um retângulo e um triângulo. A imagem abaixo ilustra essa divisão e também mostra as convenções adotadas para o cálculo a componente do CE_d no eixo X' .

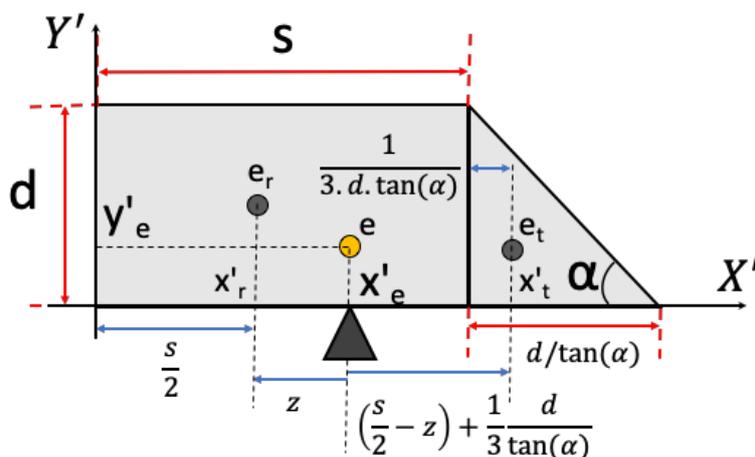


Figura A.8. Convenções para o cálculo da componente do CE_d no eixo X' .

Na figura acima e_r representa o centro de gravidade do retângulo, X'_r é a projeção de e_r no eixo X' , e_t representa o centro de gravidade do triângulo, X'_t é a projeção de e_t no eixo X' , e representa o centro de gravidade do trapézio e as coordenadas X'_e e Y'_e são as projeções de e nos eixos X' e Y' , respectivamente.

Como a geometria em análise é formada por apenas duas superfícies planas de geometria simples, um retângulo e um triângulo, o cálculo de X'_e foi feito utilizando a seguinte equação:

$$X'_e = \frac{A_r \cdot X'_r + A_t \cdot X'_t}{A_r + A_t} , \quad (A.16)$$

onde A_r é a área do retângulo e A_t é a área do triângulo.

Para facilitar o uso da equação, optou-se por rearranjar os seus termos e a versão utilizada foi:

$$A_r \cdot (X'_e - X'_r) = A_t \cdot (X'_t - X'_e) . \quad (A.17)$$

Da Figura A.8, tem-se que:

$$A_r = d \cdot S , \quad (A.18)$$

$$A_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\tan(a)} \cdot d , \quad (A.19)$$

$$X'_e - X'_r = Z , \quad (A.20)$$

$$X'_t - X'_e = \frac{S}{2} - Z + \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{\tan(a)} . \quad (A.21)$$

Assim, substituindo A.18, A.19, A.20 e A.21 em A.17, obtêm a expressão abaixo:

$$(d \cdot S) \cdot (Z) = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\tan(a)} \cdot d \right) \cdot \left(\frac{S}{2} - Z + \frac{1}{3} \cdot \frac{d}{\tan(a)} \right) . \quad (A.22)$$

Isolando a variável Z , da equação acima, obtém-se:

$$Z = \frac{3 \cdot d \cdot S \cdot \tan(\alpha) + 2 \cdot d^2}{12 \cdot S \cdot \tan^2(\alpha) + 6 \cdot d \cdot \tan(\alpha)} \quad (A.23)$$

Da Figura A.8, pode-se notar que:

$$X'_e = \frac{S}{2} + Z \quad (A.24)$$

Então, substituindo A.23 em A.24, obtemos a equação de X'_e mostrada abaixo:

$$X'_e = \frac{S}{2} + \frac{3 \cdot d \cdot S \cdot \tan(\alpha) + 2 \cdot d^2}{12 \cdot S \cdot \tan^2(\alpha) + 6 \cdot d \cdot \tan(\alpha)} \quad (A.25)$$

Para o cálculo da componente do CE_d no eixo Y' , adotou-se as convenções apresentadas na imagem abaixo.

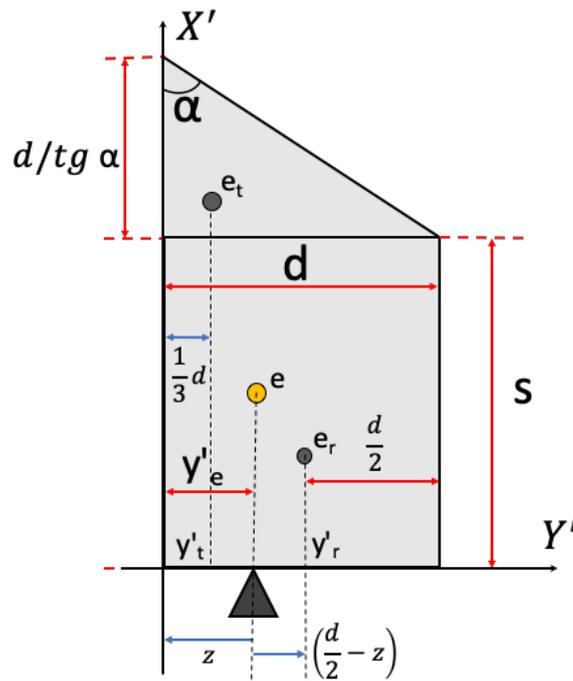


Figura A.9. Convenções adotadas para o cálculo da componente do CE_d no eixo Y' .

Na figura acima e_r representa o centro de gravidade do retângulo, Y'_r é a projeção de e_r no eixo Y' , e_t representa o centro de gravidade do triângulo, Y'_t é a projeção de e_t no eixo Y' , e representa o centro de gravidade do trapézio e a coordenada Y'_e é a projeção de e no eixo Y' .

Como a geometria em análise é composta por um retângulo e um triângulo, o cálculo de Y'_e foi feito utilizando a seguinte equação:

$$Y'_e = \frac{A_r \cdot Y'_r + A_t \cdot Y'_t}{A_r + A_t} , \quad (A.26)$$

onde A_r é a área do retângulo e A_t é a área do triângulo.

Para facilitar o uso da equação, optou-se por rearranjar os seus termos e a versão utilizada foi:

$$A_r \cdot (Y'_e - Y'_r) = A_t \cdot (Y'_t - Y'_e) . \quad (A.27)$$

Da Figura A.9, tem-se que:

$$A_r = d \cdot S , \quad (A.28)$$

$$A_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\tan(a)} \cdot d , \quad (A.29)$$

$$Y'_r - Y'_e = \frac{d}{2} - Z , \quad (A.30)$$

$$Y'_e - Y'_t = Z - \frac{1}{3} \cdot d . \quad (A.31)$$

Assim, substituindo A.28, A.29, A.30 e A.31 em A.27, obtêm a expressão abaixo:

$$(d \cdot S) \cdot \left(\frac{d}{2} - Z \right) = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\tan(a)} \cdot d \right) \cdot \left(Z - \frac{1}{3} \cdot d \right) . \quad (A.32)$$

Isolando a variável Z, da equação acima, obtém-se:

$$Z = \frac{d \cdot (3 \cdot S \cdot \tan(a) + d)}{3 \cdot d + 6 \cdot S \cdot \tan(a)} . \quad (A.33)$$

Da Figura A.9, pode-se notar que:

$$Y'_e = Z . \quad (A.34)$$

Dessa forma, Y_e' é descrito pela seguinte equação:

$$Y_e' = \frac{d \cdot (3 \cdot S \cdot \tan(a) + d)}{3 \cdot d + 6 \cdot S \cdot \tan(a)} \quad (A.35)$$

Dos resultados obtidos verifica-se que, diferentemente das coordenadas do CG_d que são fixas, as coordenadas do CE_d dependem do ângulo de inclinação a e da variável S .

A.2.3 Rotação e Translação do Sistema de Coordenadas X', Y', Z'

O sistema de coordenadas empregado para determinar CG_d e CE_d foi escolhido por facilitar o equacionamento. Tem-se, contudo, que na análise da flutuabilidade do densímetro é preciso fazer uma rotação e uma translação dos eixos para que este dispositivo ocupe a posição verdadeira, considerando a aceleração da gravidade. A imagem abaixo ilustra a rotação dos eixos de um ângulo α e a translação da distância $d \cdot \sin \alpha$.

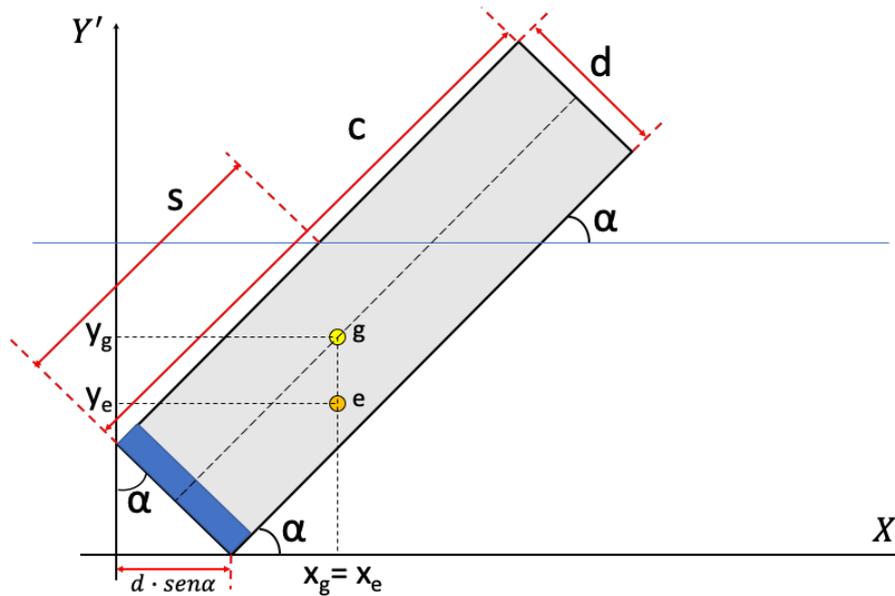


Figura A.10. Rotação dos eixos X', Y' e Z' em um ângulo α e sua translação da distância $d \cdot \sin \alpha$.

Na figura acima, X_g e Y_g correspondem à projeção do CG_d nos eixos X e Y , respectivamente. Por sua vez, X_e e Y_e correspondem à projeção do CE_d nos eixos X e Y , nesta sequência.

A fim de se determinar as equações que relacionam as coordenadas do novo sistema e do sistema original, fez-se a análise trigonométrica de um ponto genérico como mostrado na imagem abaixo.

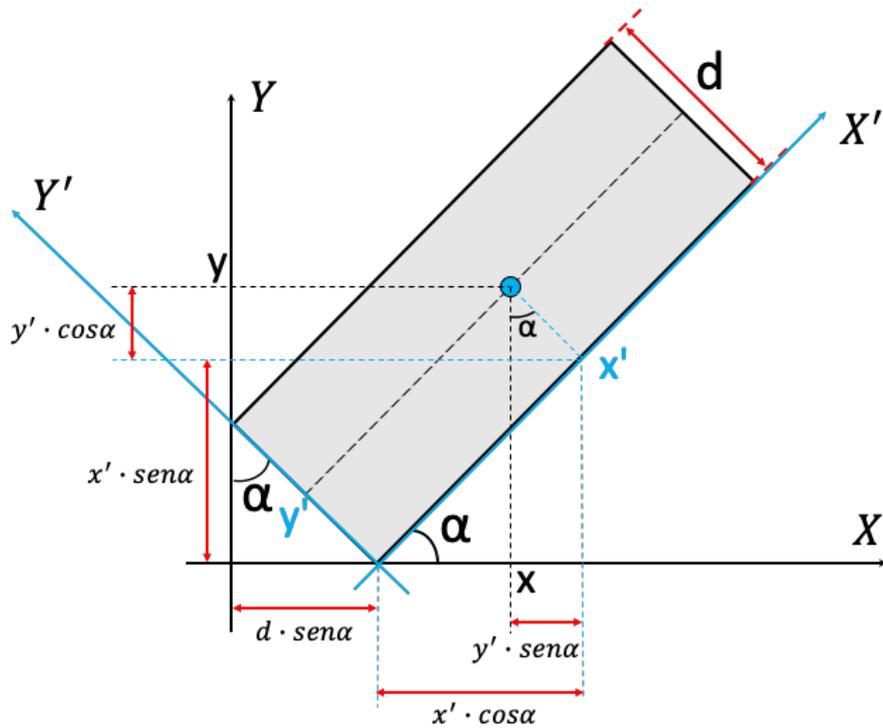


Figura A.11. Análise trigonométrica de um ponto do novo sistema de coordenadas.

Das relações apresentadas na figura acima, obtém-se que:

$$X = (d - Y'). \sin(a) + X'. \cos(a) , \quad (A.36)$$

$$Y = (X'). \sin(a) + Y'. \cos(a) . \quad (A.37)$$

Assim, para determinar as novas coordenadas das componentes do centro de gravidade do densímetro e do seu centro de empuxo, basta aplicar as equações A.36 e A.37. Como resultando chega-se a:

$$X_g = (d - Y'_g). \sin a + X'_g. \cos a , \quad (A.38)$$

$$Y_g = X'_g. \sin a + Y'_g. \cos a , \quad (A.39)$$

$$X_e = (d - Y'_e). \sin a + X'_e. \cos a , \quad (A.40)$$

$$Y_e = X'_e. \sin a + Y'_e. \cos a . \quad (A.41)$$

A.2.4 Equilíbrio Vertical

Como o densímetro deve estar flutuando sobre o líquido, o seu peso (P_d) deve ser compensado pelo empuxo ($E_d = P_{\text{líquido, deslocado}}$). Sendo assim, a igualdade abaixo deve ser satisfeita:

$$P_d = P_{\text{líquido, deslocado}} \quad . \quad (A.42)$$

Como:

$$P_d = m_d \cdot g \quad , \quad (A.43)$$

$$P_{\text{líquido, deslocado}} = m_{\text{líquido, deslocado}} \cdot g \quad , \quad (A.44)$$

onde m_d é a massa do densímetro, $m_{\text{líquido, deslocado}}$ é a massa do líquido deslocado e g é a aceleração da gravidade.

Então, substituindo A.43 e A.44 em A.42:

$$m_d \cdot g = m_{\text{líquido, deslocado}} \cdot g \quad . \quad (A.45)$$

Simplificando:

$$m_d = m_{\text{líquido, deslocado}} \quad . \quad (A.46)$$

Da Figura A.1, nota-se que:

$$m_d = m_L + m_T \quad . \quad (A.47)$$

Substituindo A.6 e A.8 em A.47:

$$m_d = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_L \cdot h \cdot d^2 + \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_T \cdot (c - h) \cdot d^2 \quad . \quad (A.48)$$

Simplificando:

$$m_d = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (d_L \cdot h + d_T \cdot (c - h)) \quad . \quad (A.49)$$

Já da Figura A.8, pode se observar que:

$$m_{liquido,deslocado} = d_{fluido} \cdot \left(\pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot s + \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 \cdot \frac{d}{\tan(a)} \cdot \frac{1}{2} \right) , \quad (A.50)$$

onde d_{fluido} é a densidade do líquido.

Simplificando:

$$m_{liquido,deslocado} = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot d_{fluido} \cdot \left(s + \frac{d}{\tan(a)} \cdot \frac{1}{2} \right) . \quad (A.51)$$

Dessa forma, substituindo A.49 e A.50 em A.46:

$$\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (d_L \cdot h + d_T \cdot (c - h)) = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2 \cdot d_{fluido} \cdot \left(s + \frac{d}{\tan(a)} \cdot \frac{1}{2} \right) . \quad (A.52)$$

Isolando a variável s , obtém-se:

$$s = \frac{d_L \cdot h + d_T \cdot (c - h)}{d_{fluido}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{\tan(a)} . \quad (A.53)$$

Da equação acima, nota-se que a variável s também é função da densidade do líquido e do ângulo de inclinação do densímetro. Dessa forma, para reduzir o número de incógnitas nas expressões que descrevem X'_e e Y'_e , substitui-se A.53 em A.25 e A.35. Como resultado, obtêm-se as seguintes equações:

$$X'_e = \frac{CTE}{2 \cdot d_{fluido}} + \frac{d^2 \cdot d_{fluido}}{24 \cdot CTE \cdot \tan^2(a)} , \quad (A.54)$$

$$Y'_e = \frac{d}{2} - \frac{d^2 \cdot d_{fluido}}{12 \cdot CTE \cdot \tan(a)} , \quad (A.55)$$

$$CTE = h \cdot d_L + (c - h) \cdot d_T . \quad (A.56)$$

A.2.5 Equilíbrio Rotacional

Uma vez que o densímetro deve estar em equilíbrio indiferente, variações na inclinação ocorrem de tal forma que o metacentro coincida com o seu centro de gravidade. Por consequência, a igualdade da equação A.57 deve ser satisfeita.

$$X_g = X_e \quad . \quad (A.57)$$

Substituindo A.38 e A.40 em A.57:

$$(d - Y'_g). \sin a + X'_g. \cos a = (d - Y'_e). \sin a + X'_e. \cos a \quad . \quad (A.58)$$

Isolando o termo com a :

$$\tan(a) = \frac{X'_g - X'_e}{d - Y'_e - Y'_g} \quad . \quad (A.59)$$

Visto que a equação A.59, mostrada acima, é composta por termos constantes (X'_g e X'_e) e por variáveis que são função do ângulo de inclinação a e da densidade do fluido (X'_e e Y'_e), pode-se utilizá-la determinar a relação entre esses dois parâmetros. Dessa forma, substituindo A.2, A.14, A.25 e A.35 em A.59 e, em sequência, isolando o ângulo a , encontra-se a equação que relaciona a inclinação do densímetro com a densidade do líquido no qual ele está imerso mostra abaixo:

$$a = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{\frac{24 \cdot CTE \cdot X'_g}{d^2 \cdot d_{fluido}} - \frac{12 \cdot CTE^2}{d^2 \cdot d_{fluido}^2} - 2}} \quad , \quad (A.60)$$

$$CTE = h \cdot d_L + (c - h) \cdot d_T \quad . \quad (A.61)$$

Apêndice B

Métrica para indicar a agitação superficial de um líquido

Este apêndice trata do problema de identificar a movimentação ou agitação do líquido onde o densímetro está imerso. É óbvio que para uma medição ser confiável, o meio em análise precisa estar estático. Entretanto, algumas situações podem perturbar o ambiente de medição, provocando oscilações na superfície do líquido. Isto é muito comum quando se introduz o densímetro dentro de um recipiente para se fazer uma medida, como é o caso da calibragem. Neste caso, surgem oscilações que podem durar alguns minutos e é preciso esperar que elas desapareçam antes de se fazer qualquer medida. Outro caso de perturbação surge durante o acompanhamento de uma fermentação onde, ao longo dos dois ou três primeiros dias, a atividade da levedura produz uma grande quantidade de bolhas que se deslocam na vertical e podem provocar agitação da superfície do mosto e movimentar o densímetro.

Para tratar tais problemas, este apêndice pretende propor uma métrica que possa ser interpretada de duas formas:

- **Agitação:** um número que indica a qualidade de cada medida, e que deverá ser usada durante o acompanhamento de uma fermentação e
- **Estabilidade:** método para se determinar quando o líquido chegou à estabilidade; basicamente a estabilidade é atingida quando a métrica proposta cair abaixo de um determinado limiar.

A métrica proposta para a agitação será muito usada durante a fase de desenvolvimento do densímetro, pois experimentos com fermentação indicaram comportamentos inesperados que podem ser explicados pela movimentação do mosto. Por hora, a métrica agitação será calculada e armazenada junto com cada medida de densidade para que se saiba sua confiabilidade. Já a métrica de estabilidade, na verdade, é um indicador temporal. Ela acompanha a agitação da superfície de forma a poder indicar quando o líquido está estático o suficiente para se realizar as medidas de referência. Ela será útil durante a fase de calibração do densímetro. O fato de se liberar

o densímetro dentro do líquido provoca uma perturbação e é preciso esperar a estabilidade para se fazer a medida.

B.1. Proposição de uma métrica estimar agitação de um líquido

O próprio densímetro será usado para estudar a agitação do líquido em análise com a intenção de propor uma métrica que permita determinar se o ele está estático ou em movimento. O objetivo é um método que resulte num valor numérico na faixa de 0 até 255 (1 byte) sendo o zero para o caso do estático e 255 para uma agitação muito grande. Por facilidade, a água doméstica (CAESB) foi usada como modelo do mosto. No caso da calibragem, a estabilidade será indicada quando a métrica ficar definitivamente abaixo de um certo limiar. Esse instante será usado para disparar as medidas de calibragem (referência) em 1.000 ou 1.050.

A métrica proposta, que é resultado de alguns ensaios e cuja efetividade será verificada adiante, calcula a excursão máxima do sinal de aceleração dentro de uma janela de tempo cujo tamanho será determinado de forma empírica. Como os ensaios foram feitos com diversos tipos de perturbação, essa métrica será calculada para cada um dos eixos do acelerômetro (ax , ay e az). No futuro, espera-se usar apenas o eixo x .

De maneira mais formal, será usada uma janela de tempo com TJ (acrônimo para Tamanho da Janela) medidas, armazenadas em um vetor. Para cada eixo, a métrica sugerida será a diferença entre a maior e a menor medida dentro dessa janela, ou seja, a amplitude da excursão do sinal dentro da janela, denominado ej , calculada segundo a equação

$$ej_{eixo} = \max(vetor_{eixo}) - \min(vetor_{eixo}) ,$$

onde $\max(.)$ e $\min(.)$ retornam, respectivamente, a maior e a menor medida do vetor e a palavra $eixo$ indica um dos três possíveis eixos: ax , ay ou az . Desta forma tem-se sempre $ej > 0$. Como se quer simplicidade e pouca carga computacional, as janelas não terão superposição. Este é o ponto de partida. Adiante serão propostas formas diferentes de se tratar essa métrica.

Há que se levar em conta o ruído sempre presente nas medições do acelerômetro. É preciso lembrar que este ruído deve variar de um dispositivo para outro

e, também, de acordo com a temperatura. Com o densímetro parado, por exemplo sobre uma mesa, a métrica proposta deve indicar estabilidade, mesmo que a temperatura varie e mesmo ainda que se troque por um outro densímetro. Isto implica em reduzir um pouco a sensibilidade da métrica proposta de forma a tolerar o ruído intrínseco de cada sensor.

Para o desenvolvimento da métrica ej foram realizados três ensaios que consistiram em perturbar a água de três formas diferentes: vertical, circular e horizontal (no sentido da maior dimensão do recipiente). Foi usada a mão para provocar essas perturbações, que foram intensas o suficiente para provocar na superfície ondulações de alguns centímetros. Após cada perturbação, foram colhidas leituras dos 3 eixos do acelerômetro até a água voltar à estabilidade.

Os resultados apresentados a seguir foram realizados com o densímetro imerso em água contida num recipiente aproximadamente cúbico com dimensões horizontais de 20 x 27 cm e altura da coluna de água de 20 cm, como mostrado na Figura B.1. O intervalo de tempo entre as medidas com o acelerômetro foi de 200 ms (5 Hz), sendo que cada medida é o resultado da média de 8 leituras consecutivas (leituras seguidas, sem qualquer intervalo de tempo entre elas). Por simplicidade o tamanho da janela (TJ) continuará a ser indicado em número de amostras. Assim, $TJ = 10$ amostras indica uma janela de 2 segundos pois a frequência de amostragem é de 5 Hz.



Figura B.1. Foto do ambiente usado para estudar o comportamento do densímetro quando imerso em um líquido que está em movimento agitado (na foto a água está parada).

B.2 Ensaio com Perturbação Vertical (Ensaio 1)

Para este ensaio, a água foi violentamente agitada na vertical e foram coletadas medidas durante vários minutos. A observação visual do recipiente indicou que a água ficou bastante estável após 30 segundos e, pode-se dizer que ficou completamente estável após, aproximadamente, 60 segundos. O resultado das medições nos três eixos está apresentado na Figura B.2.a, onde se apresentam apenas os 140 segundos iniciais, já que depois deste instante, nada de interessante foi constatado. É possível concordar com a observação visual de que a estabilidade era boa após 30 segundos e, praticamente plena após um minuto.

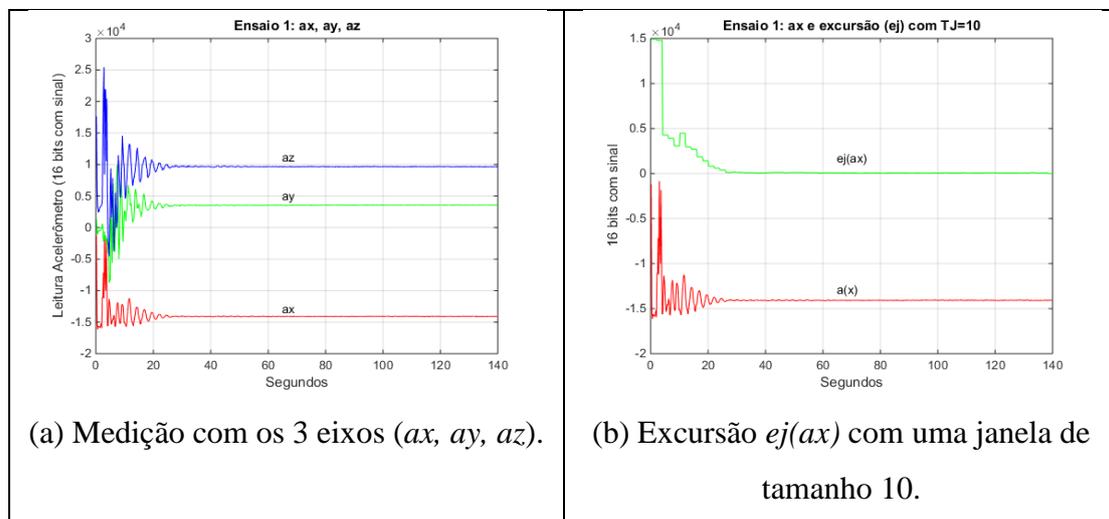


Figura B.2. Medições durante 140 segundos após a perturbação vertical do líquido.

A Figura B.2.b apresenta o resultado a métrica ej calculada com uma janela de tamanho 10 ($TJ = 10$) aplicada sobre o eixo x , já que este eixo deverá ser o principal para o funcionamento do densímetro. Aparentemente, perto dos 30 segundos a métrica passou a indicar o valor zero. É preciso cuidado com os valores numéricos desta figura, pois o eixo vertical está com uma escala de 10^4 , o que dificulta muito a visualização de valores pequenos, exatamente os mais importantes. A escala logarítmica seria uma boa solução para apreciar esses valores, mas estamos interessados apenas nos valores muito próximos de zero. Além disso, é preciso manter a simplicidade, já que essas operações serão realizadas pelo processador At328 do Arduino Nano, que tem poucos recursos para operações matemáticas. Assim, a solução bem simples para esse problema foi a de limitar o valor máximo da métrica ej . Uma rápida experimentação indicou que o limite em 200 gerava bons resultados e esse valor pode ser representado com um byte.

Qualquer medida acima de 200, foi feita igual a 200, ou seja, usou-se uma saturação em 200.

A Figura B.3.a apresenta a métrica e_j calculada para o eixo x , limitada a uma excursão de 200 e usando três tamanhos de janela (TJ): 5, 10 e 20 (1, 2 e 4 segundos). Para que se pudesse apreciar simultaneamente o desempenho das três métricas, elas foram desenhadas na mesma figura, porém deslocadas de 200 pontos na vertical. A métrica com $TJ = 10$ não sofreu qualquer deslocamento vertical, já a métrica com $TJ = 5$ foi deslocada 200 pontos para baixo e a métrica com $TJ = 20$ foi deslocada 200 pontos para cima. Nesses três ensaios, o valor de 100 parece ser um bom indicador para estabilidade do líquido. Assim, foram traçadas três linhas verticais que indicam o momento que em cada métrica ficou definitivamente abaixo do valor 100. Como era esperado, um tamanho pequeno de janela acusa estabilidade mais cedo. Ao se aumentar o tamanho da janela, atrasa-se a indicação do momento de estabilidade. Com $TJ = 5$, tivemos a indicação de estabilidade em $t = 32$ s, o que, de acordo com as observações visuais já comentadas, é sabidamente muito cedo. Já os valores de $TJ = 10$ e $TJ = 20$ indicaram momentos de estabilidade bastante razoáveis, próximos de 60 segundos. É importante notar que o ruído intrínseco do sensor impede que a métrica caia a zero, mesmo após a completa estabilização do líquido.

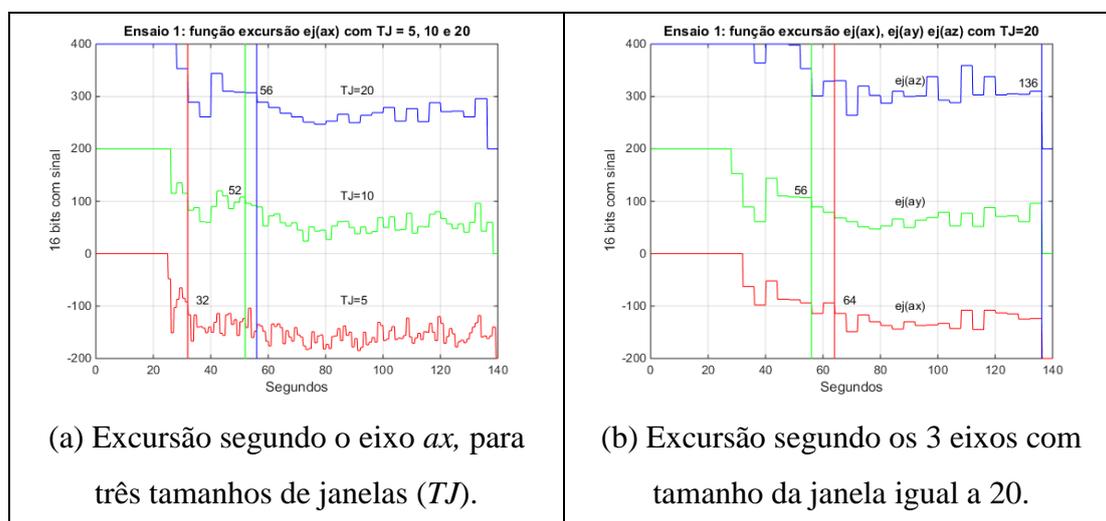


Figura B.3. Experimentos com diversos tamanhos de janelas (à esquerda) e com diferentes eixos do acelerômetro (à direita), após uma perturbação vertical. As funções foram limitadas ao valor máximo de 200 e cada uma delas descolada 200 pontos na vertical. As linhas verticais indicam o momento em que cada função passou a indicar excursão definitivamente abaixo de 100.

Vamos agora analisar os resultados da aplicação da métrica com $TJ = 20$ nos três eixos do acelerômetro e tomando ainda o valor de $ej = 100$ como indicador de estabilidade. A Figura B.3.b apresenta os resultados desta métrica, com deslocamentos na vertical para que as três medidas pudessem ser apreciadas simultaneamente. As linhas verticais indicam o momento em que cada métrica ficou definitivamente abaixo de 100. Para o eixo x , foi no instante $t = 56$ s (coincide com o indicado na figura à esquerda), para o eixo y foi no instante $t = 64$ s e, curiosamente, para o eixo z foi no instante $t = 136$ s, acontecimento que é explicado no próximo parágrafo.

O cálculo da métrica excursão dentro da janela (ej) tem um atraso igual ao tamanho da janela. No caso da figura em análise, esse atraso é de 4 segundos ($TJ = 20$ amostras com a taxa em 5 Hz). Como se analisaram apenas os primeiros 140 segundos de amostras, isto implicou em que o último valor ($t = 136$ s) da métrica ej não pode ser calculada e ficou igual a zero. Isto significa que a métrica segundo o eixo z nunca atingiu a estabilidade, sendo que a inspeção visual do líquido indicou estabilidade após 60 segundos. A explicação é a de que o sensor do eixo z do acelerômetro é muito ruidoso. Isto indica um ponto importante a ser levado em consideração, já que ao se construir cada densímetro não se conhece à priori o ruído intrínseco de cada sensor. Logicamente, espera-se que esse ruído intrínseco de cada eixo varie de um dispositivo para outro. A conclusão neste experimento é a de que uma janela com tamanho $TJ = 20$ parece indicar bons resultados e o limite $ej = 100$ parece ser é bom indicador de estabilidade, menos para o eixo z , que deveria usar um valor entre 150 e 170.

B.3 Ensaio com Perturbação Circular (Ensaio 2)

Neste ensaio, a água foi agitada num movimento de rotação e levou muito mais tempo para estabilizar. Após o período de grande agitação inicial, o líquido ficou girando de forma suave e arrastou consigo o densímetro que também ficou muito tempo girando numa velocidade muito baixa. Durante este experimento, num dado instante, enquanto o líquido girava quase na estabilidade, o densímetro se chocou de leve com a lateral do recipiente. Infelizmente, este instante não foi anotado, mas aconteceu depois de 2 minutos de ensaio. Neste experimento, com a observação visual, foi difícil indicar quando o líquido estabilizou completamente. Este parece ser o pior tipo de perturbação para se caracterizar a estabilidade, já que 120 segundos depois, notava-se que o densímetro ainda era suavemente arrastado. Talvez esse arrasto não perturbasse as

medidas, já que era possível notar que o densímetro não sofria oscilação apreciável. As figuras apresentadas são similares às do item anterior e por isso suas análises serão um pouco mais resumidas.

A Figura B.4.a apresenta as leituras dos 3 eixos de aceleração. É possível ver que a perturbação da água é indicada pelos diversos eixos e que, como era esperado, à medida que a água estabiliza as leituras dos eixos estabilizam. Pode-se dizer que, depois de 120 s, os eixos indicavam estabilidade, apesar de se notar ainda uma pequena perturbação, especialmente no eixo z. Isto contrasta um pouco com a observação visual, porque, como já foi dito, mesmo após 120 s, o líquido ainda girava suavemente e o densímetro ficou num movimento circular muito lento.

A Figura B.4.b apresenta as leituras do eixo x e a função ej com o tamanho da janela igual a 10. Como era de se esperar, as leituras têm valores elevados e por isso fica difícil de verificar o resultado da função ej quando o líquido atinge a estabilidade. Assim, a figura seguinte apresenta o resultado da função ej , mas com o valor máximo limitado em 200.

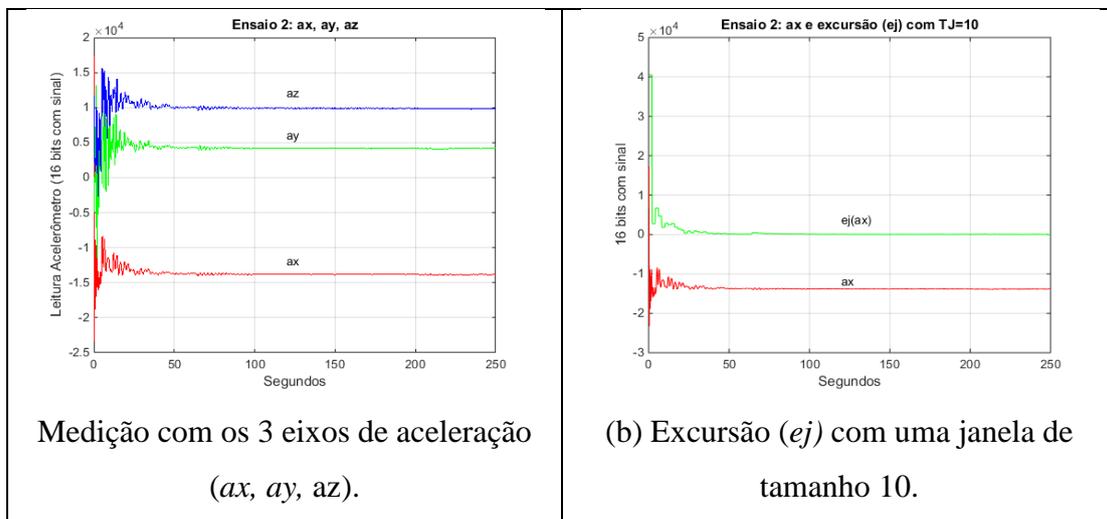


Figura B.4. Medições durante 250 segundos após a perturbação circular do líquido.

A Figura B.5.a permite novamente ver a influência do tamanho da janela quando a função excursão é calculada com as leituras do eixo x. Se considerarmos que o líquido estava estável após 2 minutos (ou 3 minutos com exagero), notamos que $TJ = 5$ indicou a estabilidade muito cedo, porém janelas de 10 e de 20 amostras estão mais coerentes com a observação visual. A função ej permite estimar o instante em que o densímetro se

chocou com a lateral. Isto deve ter acontecido entre os instantes 200 e 250 s, pois nesta faixa a função Excursão da Janela aumentou subitamente de valor.

A Figura B.5.b apresenta os valores da Função Excursão calculados para os 3 eixos, limitados em 200 e usando tamanho da janela (TJ) de 20. À excursão do eixo y foi somado um deslocamento de -200 e à excursão do eixo z um deslocamento de +200. A excursão do eixo x, que é a mais importante, foi mantida intacta. É de se notar que a função $ej(ax)$, foi a primeira a se manter abaixo do limite estipulado em 100, o que aconteceu no instante $t = 216$ s. A função $ej(ay)$ fez o mesmo um pouco depois, no instante $t = 244$ s. Já a função $ej(az)$ se manteve alta e nunca estabilizou abaixo do valor 100. O instante 248 indicado na figura, na verdade, não é indicação correta, pois deve-se ao final das amostras. Novamente, constatamos que o eixo z é bastante ruidoso.

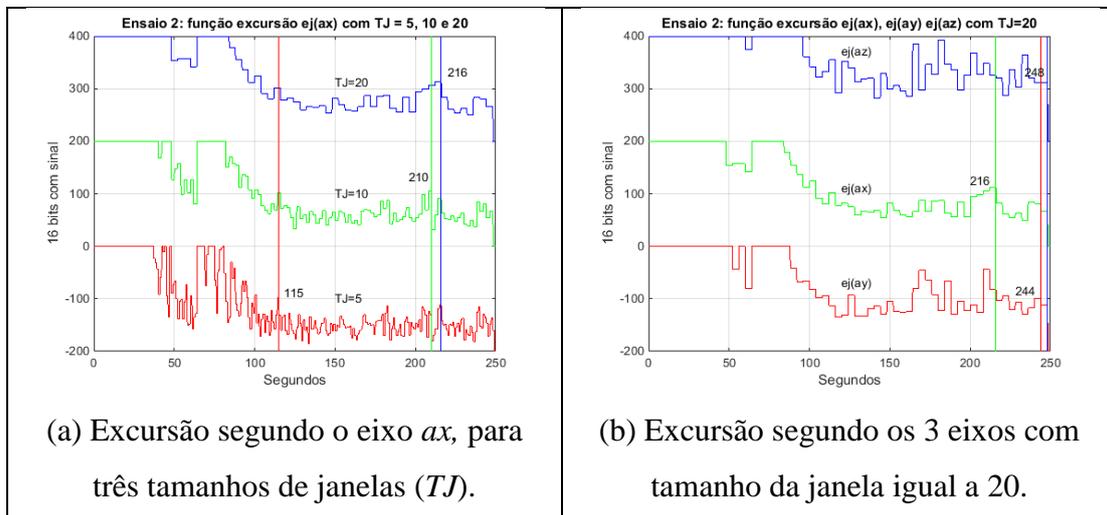


Figura B.5. Experimentos com diversos tamanhos de janelas (à esquerda) e com diferentes eixos do acelerômetro (à direita), após uma perturbação circular. As funções foram limitadas ao valor máximo de 200 e cada uma delas descolada 200 pontos na vertical. As linhas verticais indicam o momento em que cada função passou a indicar excursão definitivamente abaixo de 100.

B.4. Ensaio com Perturbação Horizontal (Ensaio 3)

Neste ensaio, a água foi agitada com vários movimentos bruscos na horizontal (ao longo da maior dimensão) e a observação visual indicou que a estabilidade aconteceu antes do primeiro minuto. As figuras apresentadas são similares às do item anterior e por isso suas análises serão um pouco mais resumidas.

A Figura B.6.a apresenta as leituras dos 3 eixos de aceleração. É possível ver que a perturbação da água é indicada pelos diversos eixos e que, como era esperado, à medida que a água estabiliza as leituras dos eixos estabilizam. Pode-se dizer que, depois de $4t = 0$ s, os eixos indicavam estabilidade, apesar de se notar ainda uma pequena perturbação, especialmente no eixo z, que como já vimos é bastante ruidoso.

A Figura B.6.b apresenta as leituras do eixo x e a função ej com o tamanho da janela igual a 10. As leituras têm valores grandes e por isso, na figura seguinte usou-se novamente o limitador de 200.

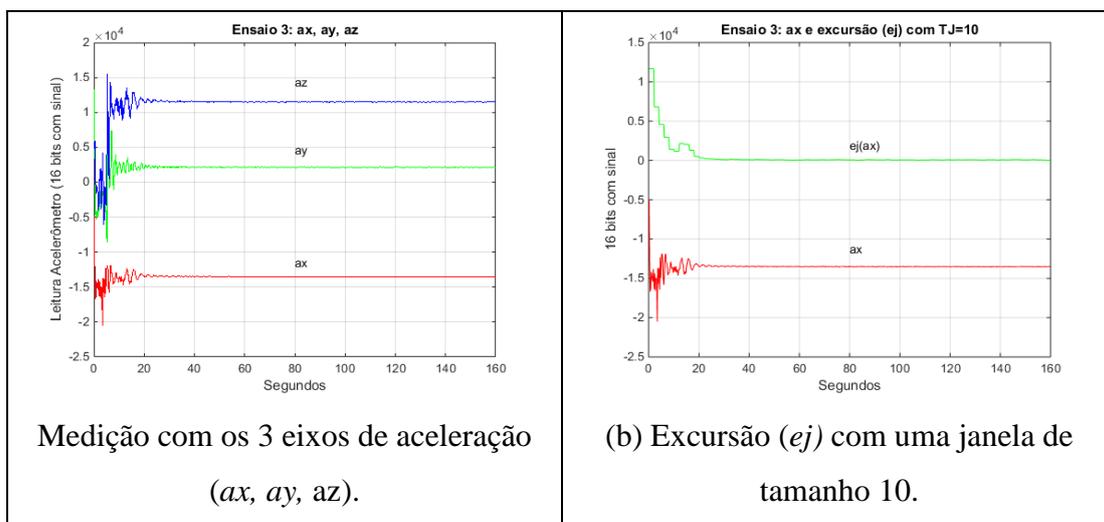


Figura B.6. Medições durante 160 segundos após a perturbação horizontal do líquido.

A Figura B.7.a permite novamente ver a influência do tamanho da janela quando a função excursão é calculada com as leituras do eixo x. Se considerarmos que o líquido estava estável após 40 s, notamos que $TJ = 5$ indicou a estabilidade muito cedo ($t = 35$) e que as janelas de 10 e de 20 amostras estão mais coerentes com a observação visual e coincidiram com o instante $t = 44$.

A Figura B.7.b apresenta os valores da Função Excursão calculados para os 3 eixos, limitados em 200 e usando tamanho da janela (TJ) de 20. A excursão do eixo y está deslocada 200 pontos para baixo e a excursão do eixo z está deslocada 200 pontos para cima. A excursão do eixo x, que é a mais importante, foi mantida intacta. É de se notar que a função $ej(ax)$, para o eixo x, foi a primeira a se manter abaixo do limite que foi estipulado em 100, o que aconteceu no instante $t = 44$ s. A função $ej(ay)$ só indicou estabilidade após $t = 144$ s e a função $ej(az)$ no instante $t = 152$ s. É questionável se este

instante de estabilidade do eixo z é realmente verdadeiro. De qualquer forma, novamente constatamos o ruído presente neste eixo.

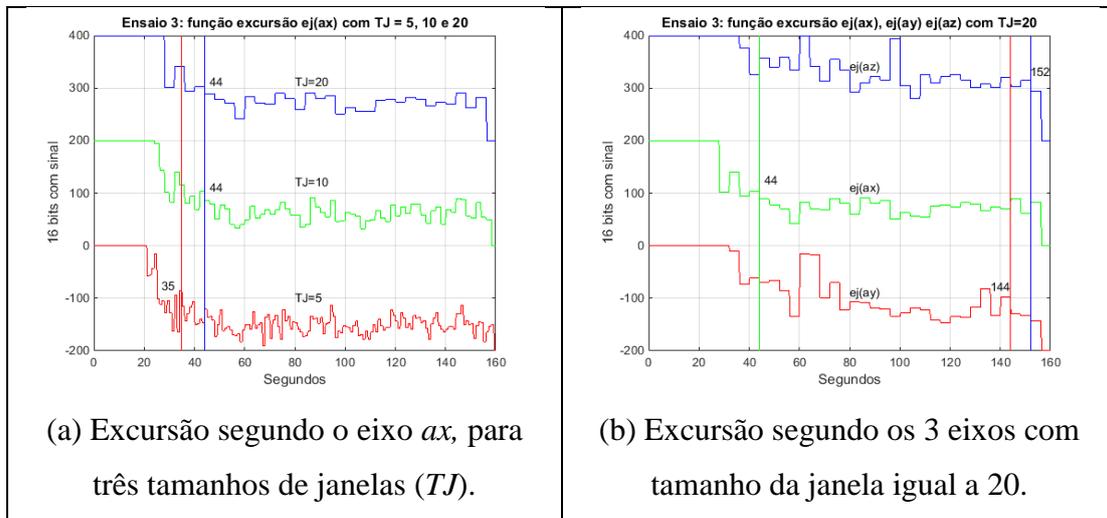


Figura B.7. Experimentos com diversos tamanhos de janelas (à esquerda) e com diferentes eixos do acelerômetro (à direita), após uma perturbação horizontal. As funções foram limitadas ao valor máximo de 200 e cada uma delas descolada 200 pontos na vertical. As linhas verticais indicam o momento em que cada função passou a indicar definitivamente excursão abaixo de 100.

B.5. Conclusão Parcial e Proposta da Métrica Agitação

Os ensaios com diversas perturbações foram realizados com o objetivo de sugerir uma métrica que pudesse ser usada com duas finalidades:

- 1) Caracterizar quando o líquido entrou na estabilidade, o que pode ser usado como gatilho da efetuar a calibração e
- 2) Fornecer um parâmetro que pudesse indicar a qualidade de uma medida.

A métrica proposta foi a amplitude da excursão do sinal dentro de uma janela de tempo, denominada ej , calculada segundo a equação

$$ej_{eixo} = \max(vetor_{eixo}) - \min(vetor_{eixo}) .$$

Foram ensaiados três tamanhos de janela: 5, 10 e 20 amostras. Sendo a taxa de amostragem de 5 Hz, essas janelas correspondem a 1, 2 e 4 segundos. Como era esperado, uma janela pequena indica a estabilidade muito cedo, as janelas maiores

parecem indicar estabilidade mais coincidente com a observação visual. Assim, recomenda-se janelas de 2 ou 4 segundos.

Já a indicação da qualidade da medida, que nesta fase de desenvolvimento do densímetro será armazenada junto com as medições realizadas durante a fermentação, pede uma análise adicional. É importante comentar que durante sua operação num fermentador, o densímetro faz uma medida a cada hora. Ele não espera por qualquer estabilidade. Então, basicamente o que se quer saber é se a medida foi feita com o mosto estático ou em movimento. Se o mosto estava em movimento, a medida tem pouca significância e, conforme sua discrepância para com as demais medidas, poderia ser descartada. Assim, o valor absoluto da excursão dentro da janela tem pouco valor. Se o valor de ej foi de 30, 50 ou 150, significa apenas que a medida não é confiável. Não necessariamente, uma excursão de 100 indica um valor mais confiável que o obtido com uma excursão de 150. Esse valor pode ser relativizado de forma a simplificar a análise. Assim, se propõe uma ponderação que será denominada de “agitação”, abreviada por ag .

$$ag_{eixo} = \frac{ej_{eixo}}{FT} ,$$

onde FT é o fator de ponderação usado na divisão com inteiros. É importante lembrar que para facilitar as análises gráficas, limitamos a função ej em 200, mas ela retorna valores na faixa de -32.768 a +32.767.

Por isso se torna interessante fazer uma ponderação e depois realizar uma limitação. Para os ensaios relatados mais adiante, foi usado o fator de ponderação $FT = 50$, e o valor limitado em 255. Assim, temos uma avaliação qualitativa:

- $ag = 0 \rightarrow 0 < ej < 50$: estabilidade plena;
- $ag = 1 \rightarrow 50 < ej < 100$: estabilidade boa;
- $ag = 2 \rightarrow 100 < ej < 150$: estabilidade razoável;
- $ag = 3 \rightarrow 150 < ej < 200$: estabilidade crítica;
- e assim por diante.

Antes de prosseguirmos com os ensaios do método proposta para estimar a agitação, vamos fazer um pequeno interlúdio. Nos gráficos que apresentam as leituras dos

acelerômetros nota-se o comportamento periódico das medições feitas pelo densímetro. Daí surge a curiosidade para se determinar o espectro de frequências para cada ensaio e ainda, responder sobre a existência de uma frequência natural.

B.6. Validação da Métrica Proposta

Com o intuito de validar proposta da métrica para a agitação do líquido e verificar sua repetibilidade foram realizados dois ensaios, denominados de Teste 12 e Teste 13. Essa numeração tem a ver com a sequência usada para identificar os diversos testes e ensaios realizados com o densímetro. Para o que se analisa neste tópico, esta numeração é irrelevante, e será mantida para evitar confusão com os demais ensaios.

Nestes dois ensaios foram usados dois densímetros diferentes para se poder verificar uma possível variação de um equipamento para o outro. A Figura B.8 apresenta a posição dos dois densímetros antes de iniciar o teste e com a água em completa estabilidade, onde se indica também a inclinação do tubo do densímetro.

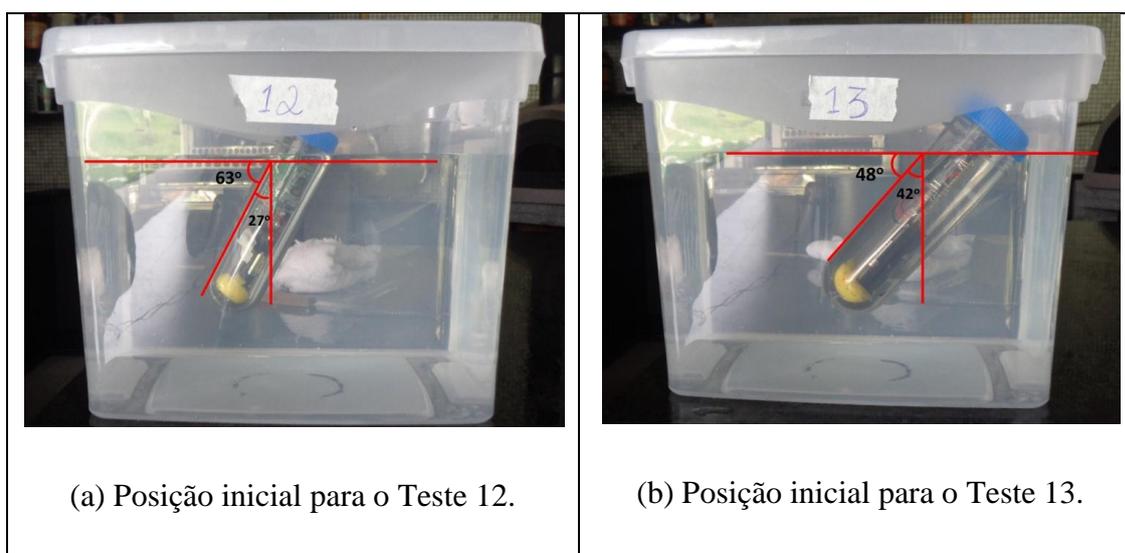


Figura B.8. Fotos com os densímetros usados nos dois ensaios em questão. Elas foram obtidas com o líquido (água) em completa estabilidade

É preciso comentar que os ensaios apresentados nos tópicos anteriores usaram uma taxa de medição de 5 Hz, sendo cada medida o fruto de 8 leituras consecutivas. Nestas condições, uma janela de 4 segundos conteria 20 amostras. Alguns ensaios simples indicaram que resultados semelhantes poderiam ser obtidos com uma taxa de amostragem bem menor, o que resultaria em economia de energia e memória. Por esse motivo, nos ensaios aqui apresentados se trabalhou com uma medida por segundo sendo

cada uma dessas medidas a média de 16 leituras consecutivas. Essa média com 16 leituras consecutivas reduz bastante o ruído intrínseco de cada eixo do acelerômetro e é muito rápida quando comparada com o período da oscilação natural da água (0,8 Hz, que corresponde a um período de 1,25 seg). A função excursão dentro da janela ej foi calculada de forma sequencial usando uma janela de 4 amostras (a amostra atual e as três anteriores) sem superposição, ou seja, janela de 4 segundos seguindo a equação abaixo. Foram usadas apenas as medidas do eixo x do acelerômetro.

$$ej_{eixo_x} = \max(vetor_{eixo_x}) - \min(vetor_{eixo_x}) .$$

O parâmetro agitação ou movimentação foi gerado com uma ponderação de $FT = 50$, e será denominada de agora em diante de *agitação*, abreviado por ag e segue a fórmula abaixo, que usa divisão por inteiros e tem seu valor limitado (saturado) em 255.

$$ag_{eixo_x} = \frac{ej_{eixo_x}}{FT} .$$

Apesar de sua excursão de 0 até 255, os valores baixos são os mais importantes para se acompanhar ou estimar a estabilidade do líquido. Assim, se considerou apenas os valores de ag iguais a 0, 1, 2 ou 3. Qualquer valor acima disso foi transformado em 3. Isso facilitou muito a visão simultânea da movimentação percebida pelos acelerômetros e a medida da agitação quando o líquido está quase estável. A tabela abaixo reflete essa simples transformação, que para efeitos de notação nos próximos gráficos foi denominada de agg .

Tabela B.1. Transformação do índice ag no índice agg , para facilitar sua visualização nos gráficos.

ag	agg	agg no gráfico
0	0	0
1	1	100
2	2	200
de 3 até 255	3	300

B.7. Acelerômetros - Primeiro Ensaio (Teste 12) para a Validação da Métrica Proposta

Para este teste, o densímetro foi imerso na água e submetido a 4 perturbações:

- Perturbação vertical pequena;
- Perturbação vertical grande;
- Perturbação circular pequena e
- Perturbação circular grande.

O densímetro permaneceu coletando as amostras continuamente durante toda a duração do ensaio e as perturbações foram realizadas em sequência, uma após a outra, mas antes esperando pela estabilização da água. O gráfico da Figura B.9 apresenta as leituras dos 3 eixos (ax, ay e az) do acelerômetro, ao longo das 4 perturbações. A grande variação das leituras (oscilação vertical) indica o momento em que se perturbava a água. É importante comentar que essas perturbações foram realizadas com a própria mão e os termos pequeno e grande são meramente qualitativos. Para evitar uma grande quantidade de dados, não se realizou a perturbação horizontal, já que se espera que ela nunca aconteça durante o emprego normal do densímetro. A perturbação mais provável é a vertical, pois ela acontece quando se imerge o densímetro (movimento vertical) e durante a fermentação, quando surgem bolhas que se deslocam na vertical. A perturbação circular foi estudada devido à demora para sua estabilização.

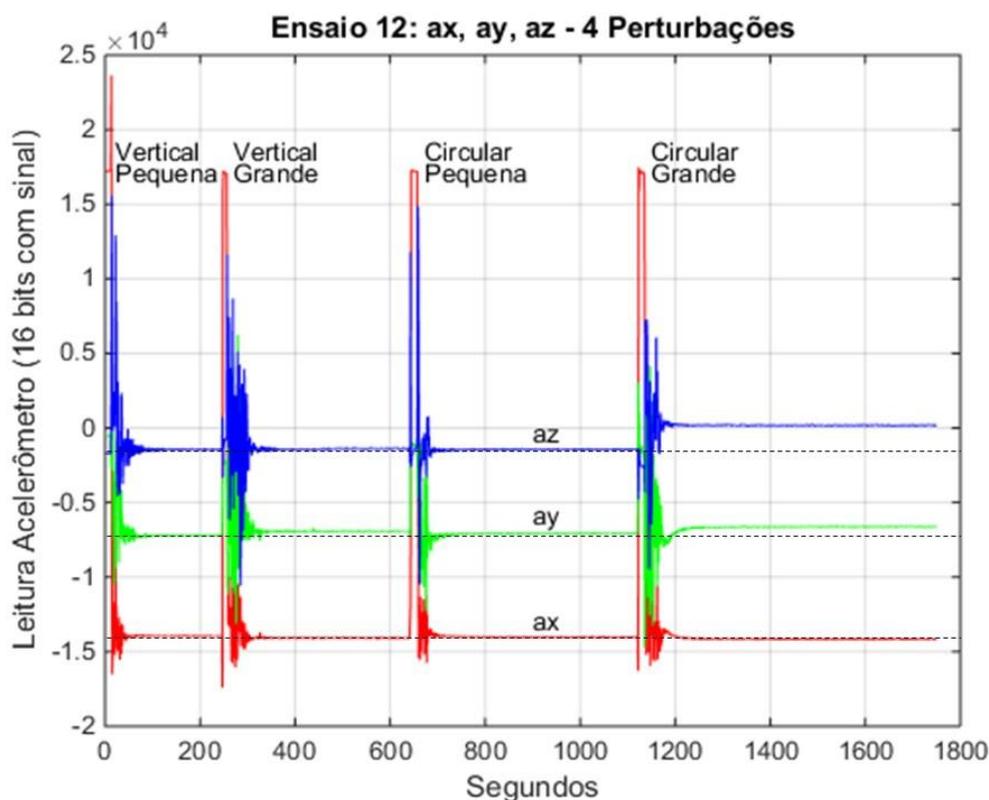


Figura B.9. Gráfico com as medidas absolutas dos 3 acelerômetros (ax , ay e az) após 4 perturbações diferentes.

Na Figura B.9, merece um comentário à parte o comportamento estranho do eixo az , após a última perturbação. Deve-se notar que após cada perturbação, as leituras dos eixos sempre voltavam para um determinado valor, que na figura está marcado com linhas tracejadas. Porém, isto não aconteceu com o eixo z , que após a última perturbação estabilizou num patamar mais elevado. Isso só pode ser explicado por uma rotação do densímetro. Como os eixos y e z são transversais ao eixo do densímetro, uma rotação deve alterar as leituras desses dois eixos (y e z). Realmente, nota-se que após a última perturbação, o eixo y também permaneceu alterado, porém por com um valor bem menor. Outra possibilidade é a de que a perturbação provocou uma redistribuição dos elementos internos do densímetro, em especial, do conjunto de baterias.

A seguir são apresentadas três figuras, uma para cada eixo (x , y e z). Cada uma dessas figura apresenta as leituras de um determinado eixo, para as quatro perturbações. O gráfico com as leituras de cada eixo foi escalonado de forma a que o valor mínimo correspondesse ao zero e o valor máximo ao 255. Assim, os valores de gráficos diferentes não devem ser numericamente comparados (aliás, esse não é o objetivo deste

estudo). O parâmetro agitação (*ag*) foi limitado (saturado) em 255 e para visualizar os valores pequenos, somente os valores 0, 1, 2 e 3 (ver *agg* no gráfico) foram desenhados em uma escala diferente de forma a beneficiar a visualização.

As seguir são analisadas as diversas figuras. Optou-se por desperdiçar espaço e colocar cada figura em uma página para beneficiar a clareza. A visualização fica muito ruim quando se colocam duas figuras na mesma página.

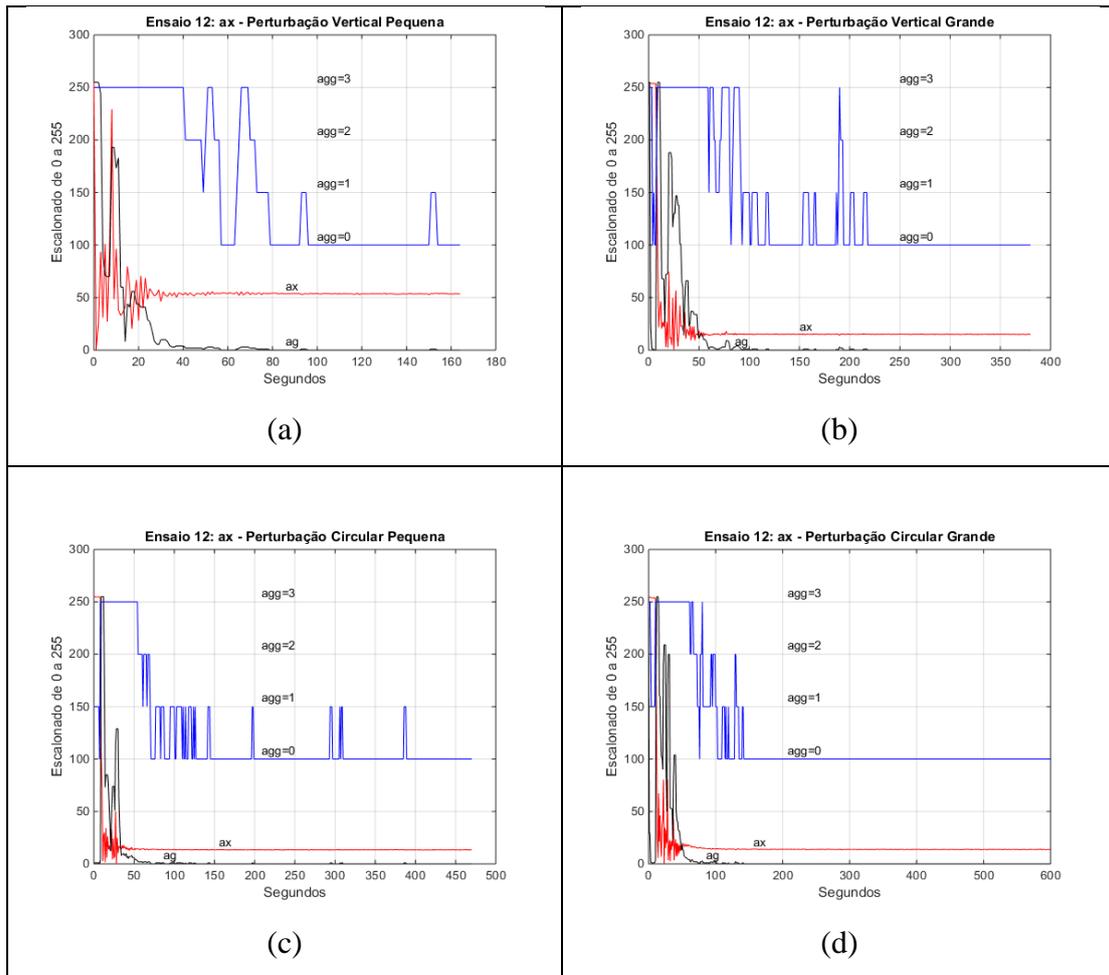


Figura B.10. Gráficos do eixo ax (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo [0, 255]. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa [0, 3] (ver Tabela B.1).

A Figura B.10 apresenta as leituras do eixo *ax* após cada uma das 4 perturbações. Vale lembrar que os gráficos *ax* foram escalonados e por isso não podem ser comparados numericamente. O que estamos interessados neste estudo é a variação das leituras após cada perturbação e quando elas ficaram estáveis. O parâmetro agitação

(*ag*) foi calculado usando exclusivamente o eixo *ax*. O parâmetro *agg* se mostrou bem eficiente e capaz de indicar a estabilidade do líquido e as pequenas oscilações. Aqui já se pode propor uma figura de qualidade de uma medida.

- $ag = 0 \rightarrow$ líquido estável e medida muito confiável;
- $ag = 1 \rightarrow$ líquido quase estável e medida pouco confiável;
- $ag = 2 \rightarrow$ líquido em movimento e medida não confiável e
- $ag = 3 \rightarrow$ líquido muito agitado, descartar a medida.

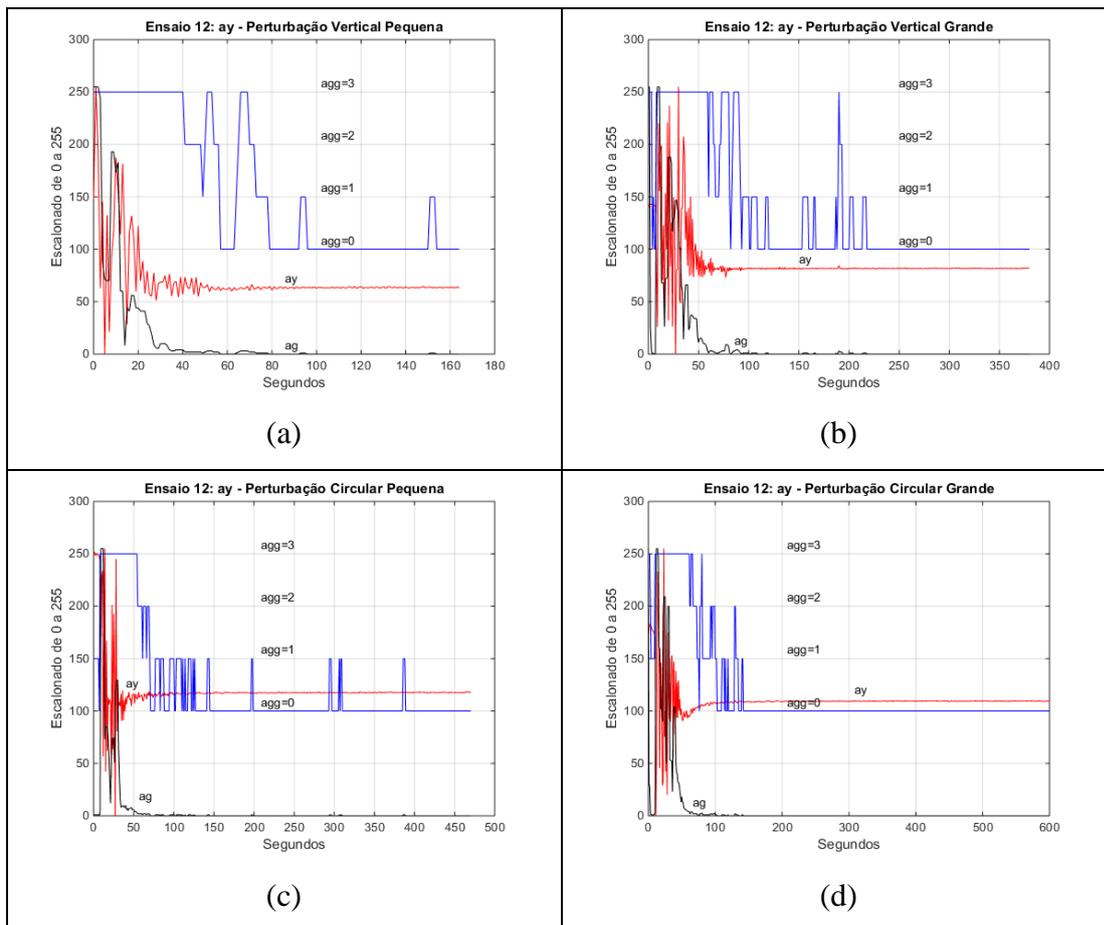


Figura B.11. Gráficos do eixo ay (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo [0, 255]. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa [0, 3] (ver Tabela B.1).

A Figura B.11 apresenta as leituras do eixo *ay* após cada uma das 4 perturbações. Vale lembrar que os gráficos *ay* foram escalonados e por isso não podem ser comparados numericamente. O parâmetro agitação (*ag*) foi calculado usando exclusivamente o eixo *ax*. O parâmetro *agg* se mostrou bem eficiente e capaz de indicar

a estabilidade do líquido e as pequenas oscilações. Em outras palavras, parece ser suficiente usar apenas o eixo ax para calcular a agitação do líquido.

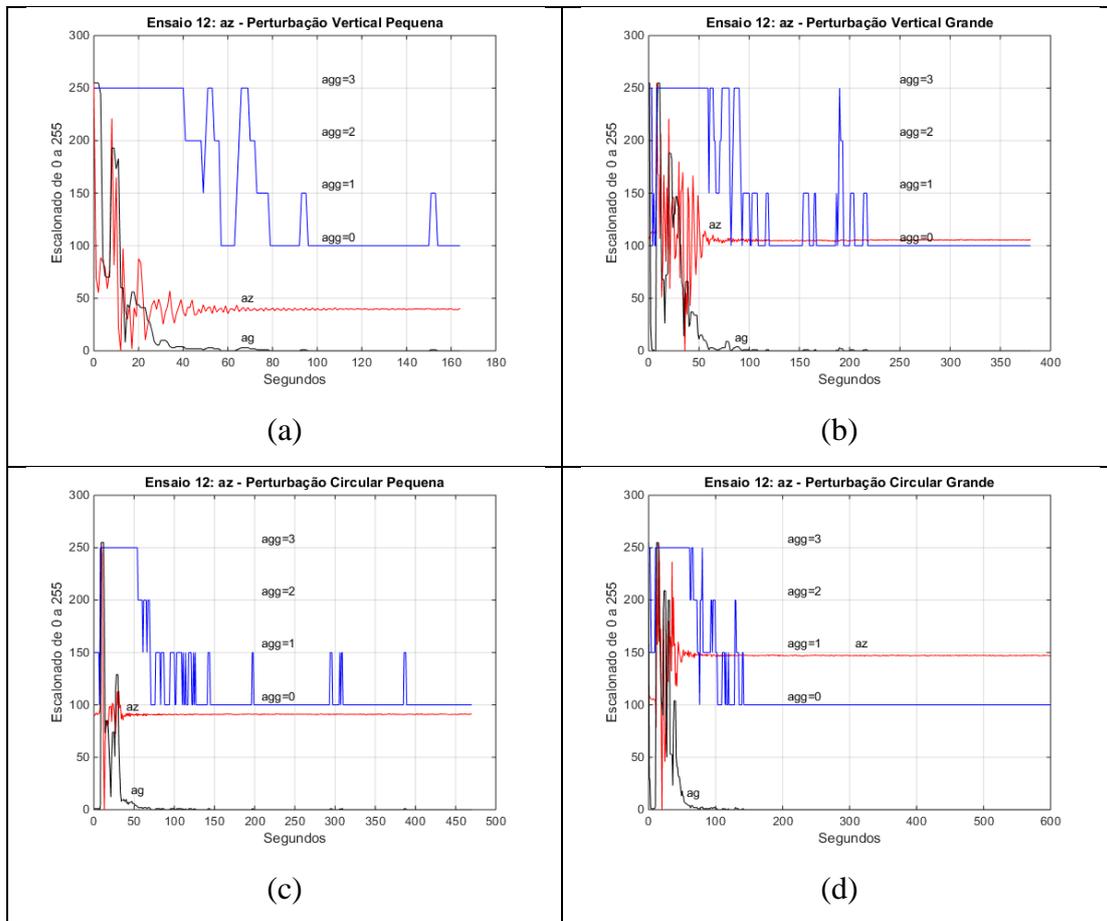


Figura B.12. Gráficos do eixo az (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

A Figura B.12 apresenta as leituras do eixo az após cada uma das 4 perturbações. O parâmetro agg se mostrou bem eficiente e capaz de indicar a estabilidade do líquido e as pequenas oscilações. Em outras palavras, realmente, parece ser suficiente usar apenas o eixo ax para calcular a agitação do líquido.

B.8. Giroscópios - Primeiro Ensaio (Teste 12) para a Validação da Métrica Proposta

Como o dispositivo MPU 6050 também tem 3 giroscópios, um para cada eixo, surgiu a curiosidade de estudar como esses giroscópios se comportavam após as diferentes perturbações e como eram suas respostas quando o líquido se aproximava da estabilidade. Não se esperam grandes novidades. A intensão maior deste tópico é apenas documental.

A Figura B.13 apresenta as medidas absolutas coletadas nos 3 giroscópios quando submetidos às 4 perturbações. De pronto se observa que a perturbação circular é a mais danosa, pois se nota que as leituras dos giroscópios demoram para voltar à zero. Em particular, o giro do densímetro a longo de seu eixo é bem característico e deve ser observado na curva g_x , que tem um decaimento muito lento.

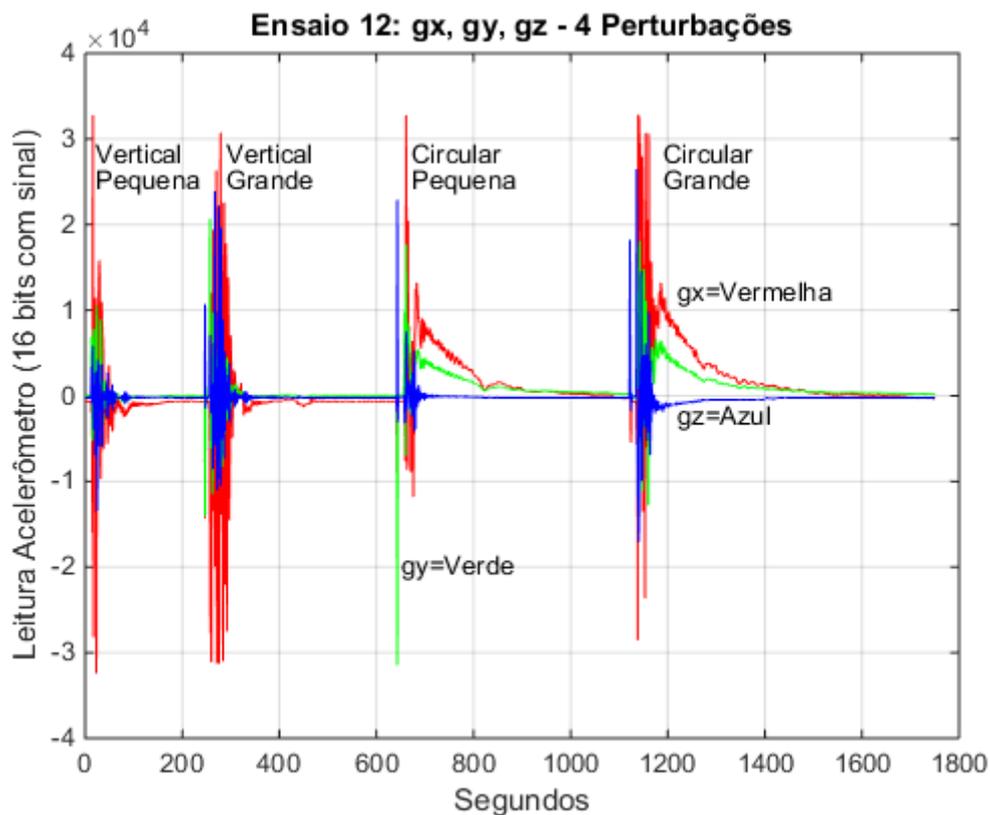


Figura B.13. Gráfico com as medidas absolutas dos 3 giroscópios (g_x , g_y e g_z) após 4 perturbações diferentes.

As seguir são analisadas as diversas figuras relativas aos giroscópios. Novamente, para favorecer a clareza, optou-se por colocar cada figura em uma página. Todas as três figuras apresentadas a seguir confrontam as leituras dos giroscópios com o parâmetro agitação (ag) calculado usando apenas o acelerômetro do eixo ax .

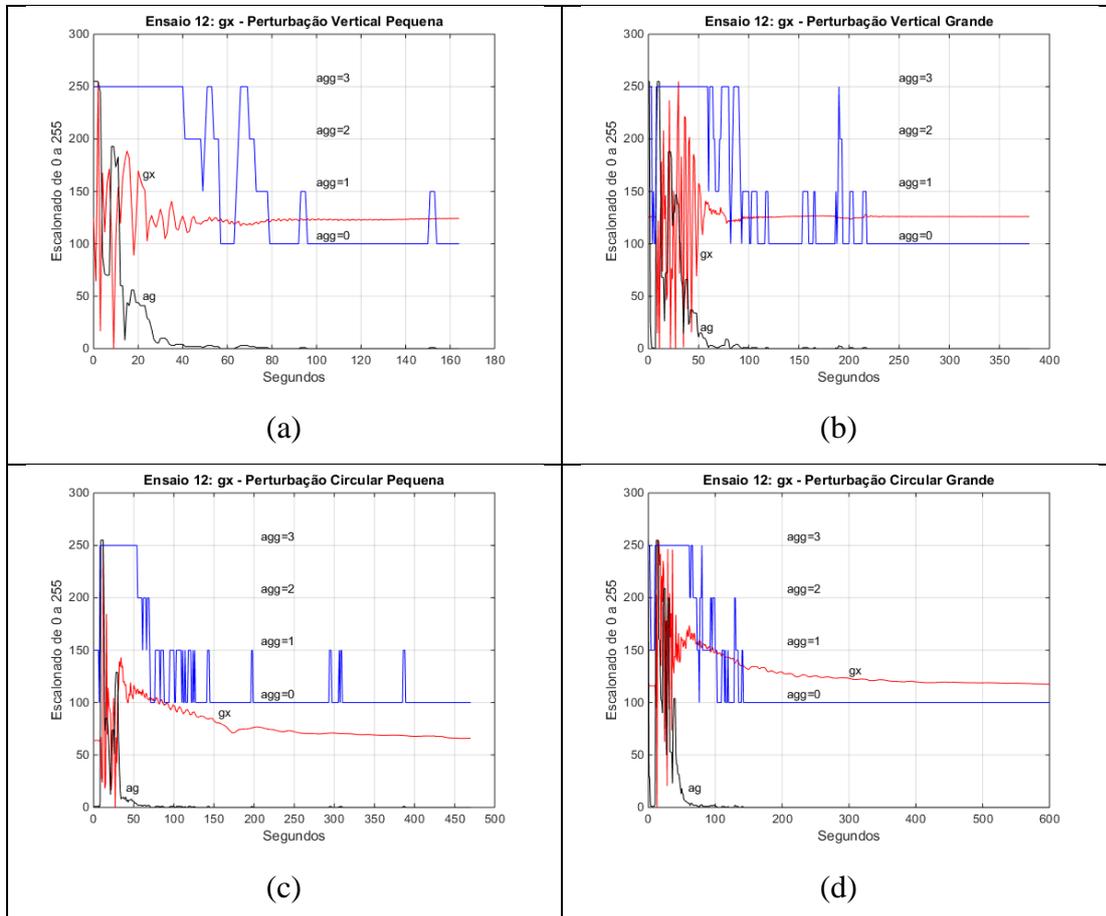


Figura B.14. Gráficos do eixo gx (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

Acima, nas figuras relativas à perturbação vertical, nota-se que as leituras do giroscópio gx caíram rapidamente para estabilidade, mesmo com o indicador agg ainda assinalando movimento. O inverso aconteceu com as figuras relativas à perturbação circular.

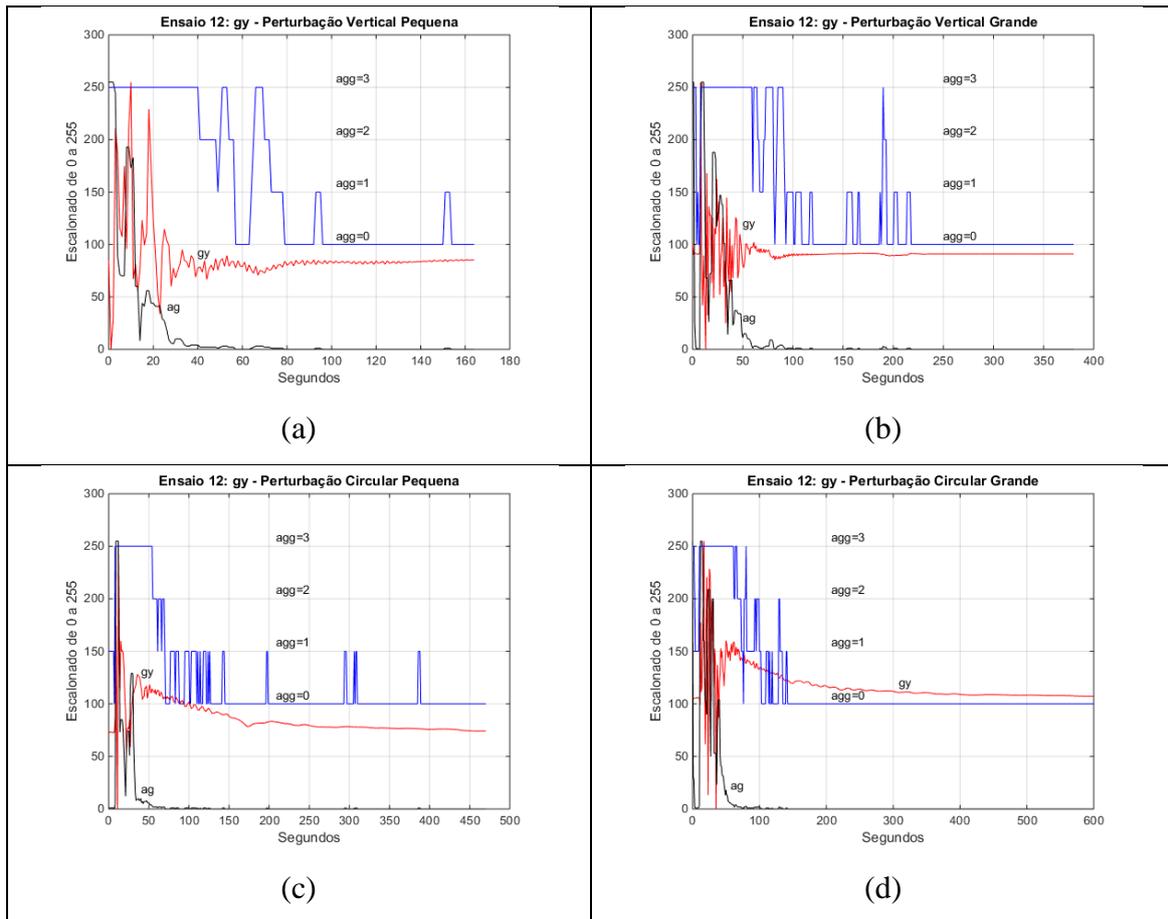


Figura B.15. Gráficos do eixo gy (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

Na figura acima, notam-se os mesmos comportamentos indicados na figura anterior.

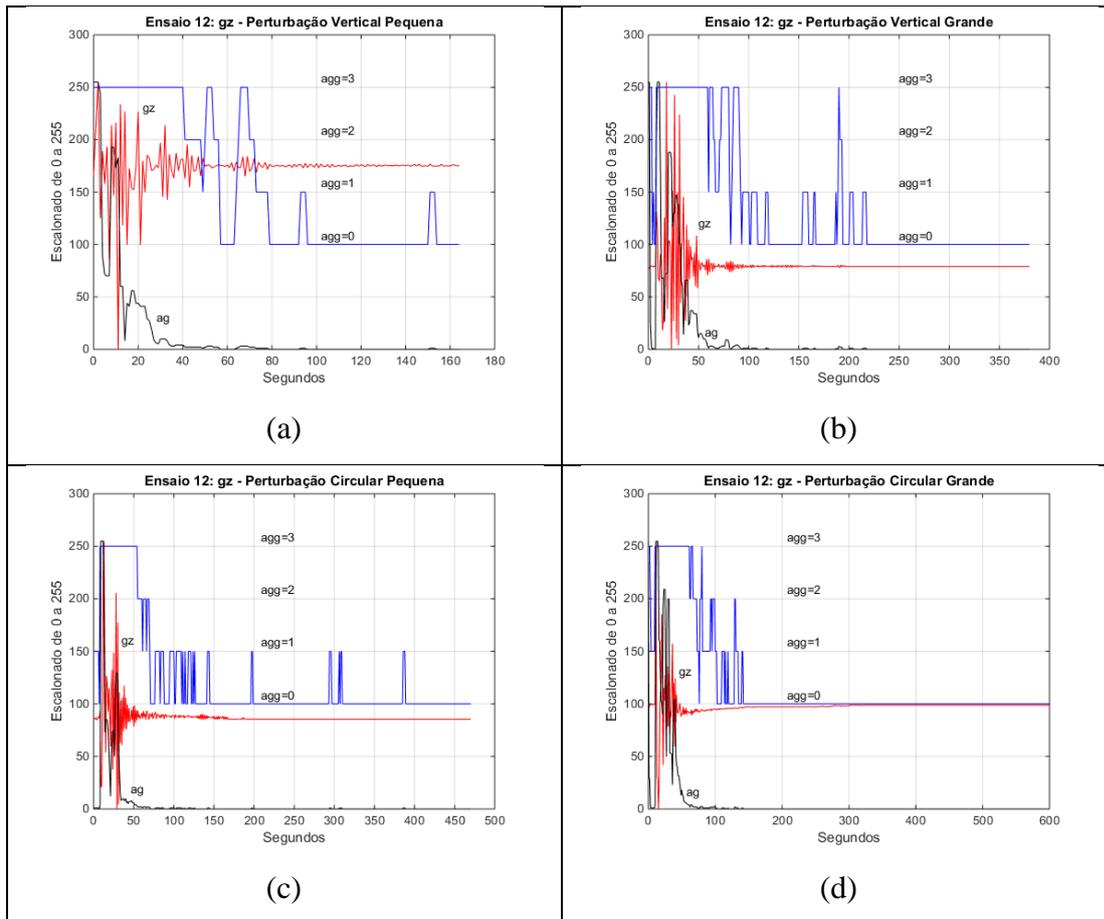


Figura B.16. Gráficos do eixo gz (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

Na figura acima, nota-se que o eixo gz sofreu pouca influência com as perturbações e rapidamente caiu para a estabilidade, mesmo no caso circular. Isso se explica pela posição do eixo gz que mede giros do densímetro na posição horizontal, em paralelo com a superfície da água, o que é difícil de acontecer.

B.9. Acelerômetros - Segundo Ensaio (Teste 13) para a Validação da Métrica Proposta

Para este teste, o densímetro foi imerso na água e submetido às mesmas 4 perturbações:

- Perturbação vertical pequena;
- Perturbação vertical grande;
- Perturbação circular pequena e
- Perturbação circular grande.

O densímetro permaneceu coletando as amostras continuamente durante toda a duração do ensaio e as perturbações foram realizadas em sequência, uma após a outra, mas antes esperando pela estabilização da água. O gráfico da Figura B.17 apresenta as leituras dos 3 eixos (ax, ay e az) do acelerômetro, ao longo das 4 perturbações. A grande variação das leituras (oscilação vertical) indica o momento em que se perturbava a água.

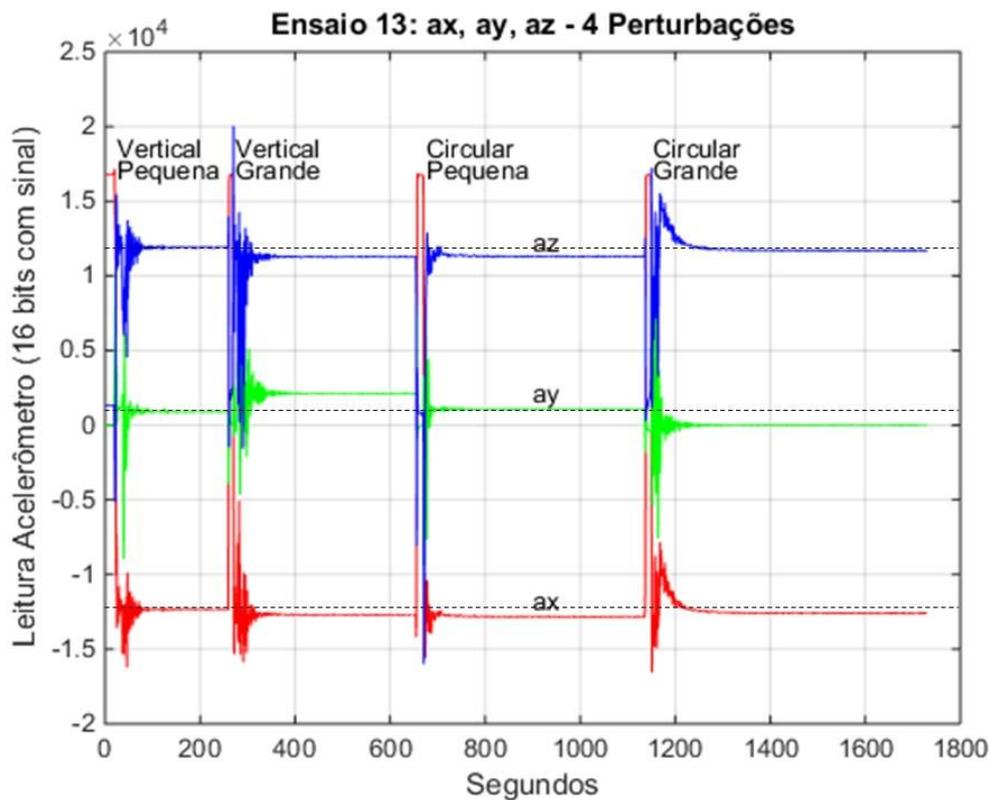


Figura B.17. Gráfico com as medidas absolutas dos 3 acelerômetros (ax, ay e az) após 4 perturbações diferentes.

É interessante notar que na Figura B.17, a linha de estabilidade de cada eixo se alterou após cada perturbação. Isto é uma forte indicação de que a posição relativa dos componentes mudou a cada atuação, em especial o conjunto de baterias, que é a parte mais pesada. Fica claro a necessidade e de fixar os componentes internos.

A seguir são apresentadas as figuras relativas a cada eixo e as conclusões são as mesmas do ensaio anterior. Novamente, a agitação (*ag*) foi calculada usando exclusivamente o eixo *ax*.

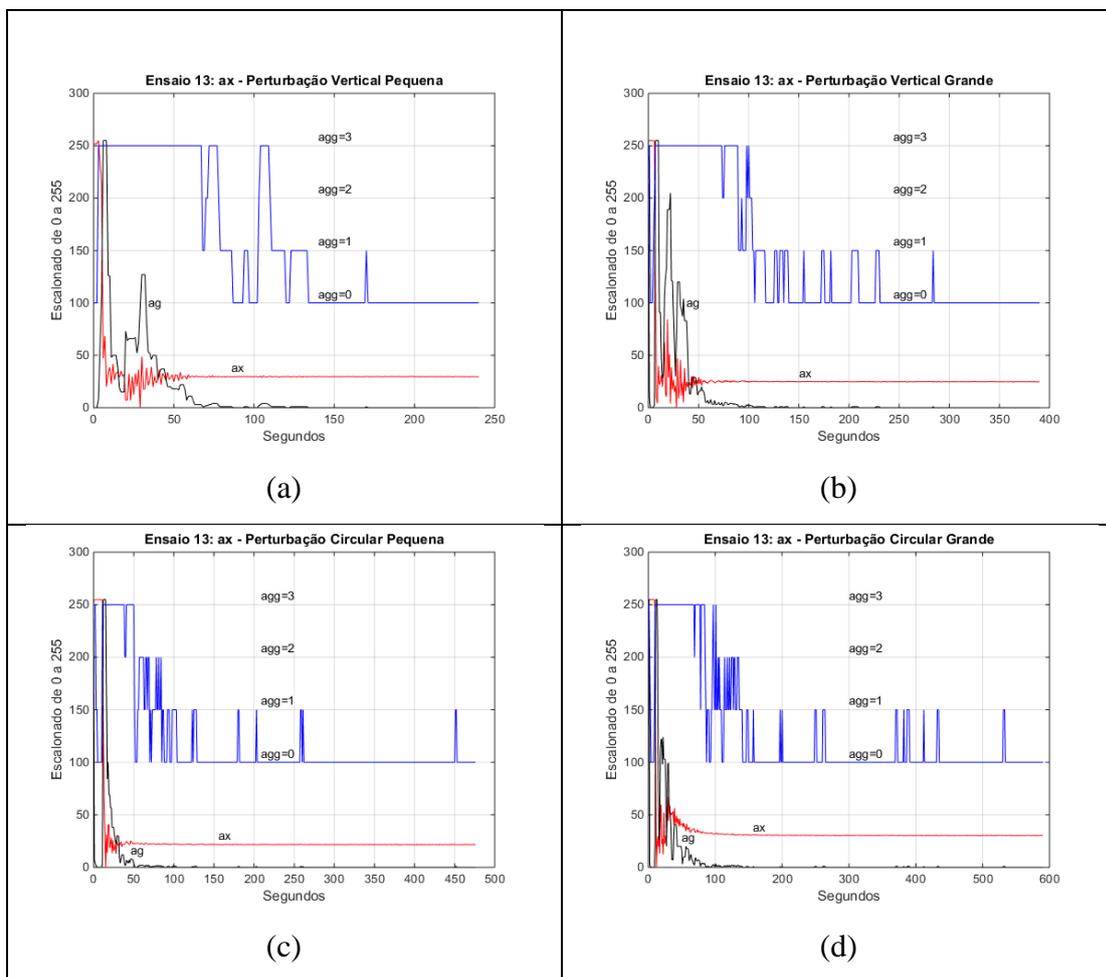


Figura B.18. Gráficos do eixo *ax* (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (*ag*) está limitado (satura) em 255 e o gráfico *agg* apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

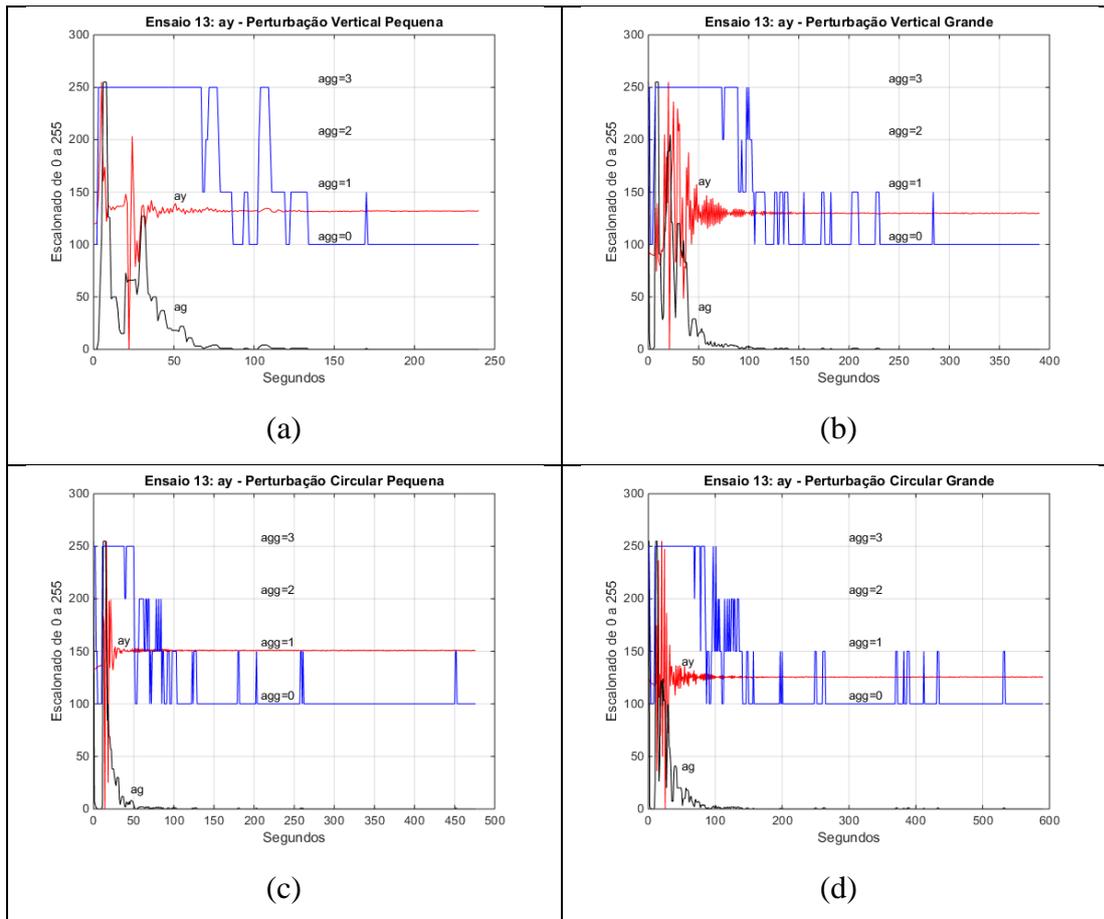


Figura B.19. Gráficos do eixo ay (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

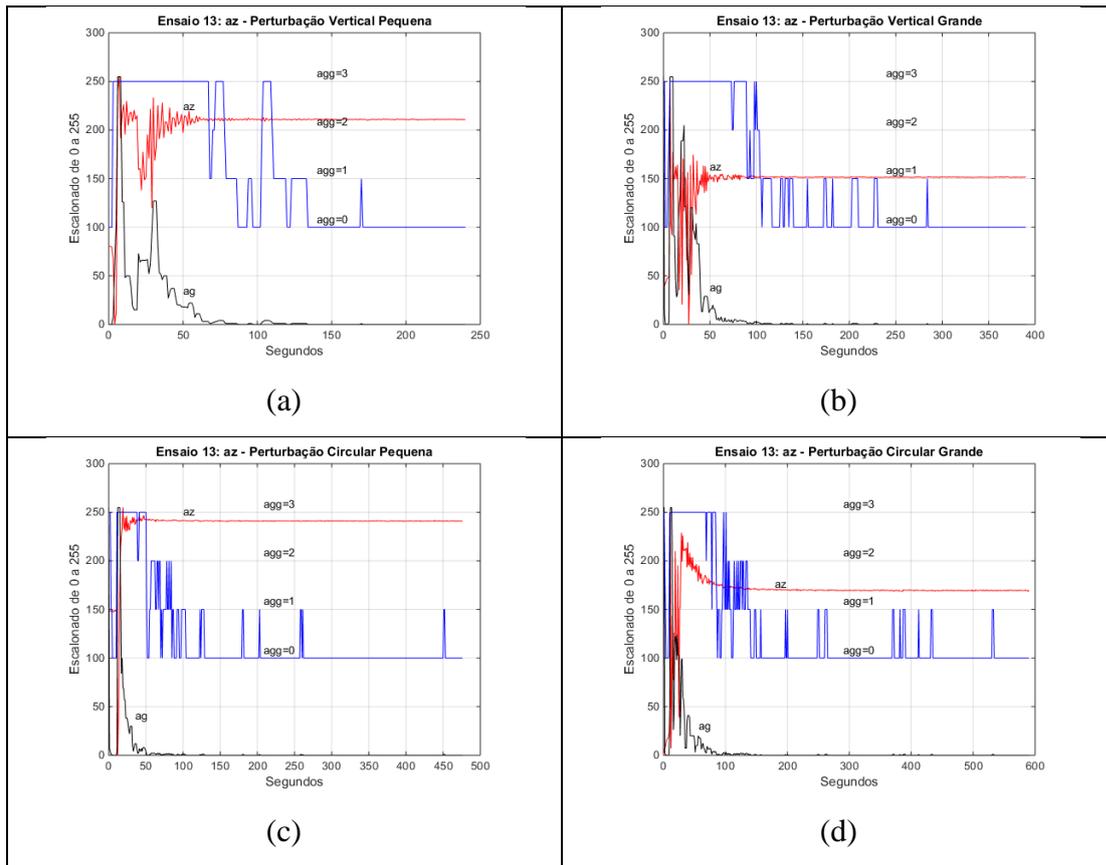


Figura B.20. Gráficos do eixo az (acelerômetro) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

B.10. Giroscópios - Segundo Ensaio (Teste 13) para a Validação da Métrica Proposta

As figuras a seguir apresentam as leituras coletadas nos giroscópios (g_x , g_y e g_z). Como no ensaio anterior sobre os giroscópios, nota-se novamente que a perturbação circular era a mais danosa e a que leva mais tempo para decair, segundo as leituras dos giroscópios.

A Figura B.13 apresenta as medidas absolutas coletadas nos 3 giroscópios quando submetidos às 4 perturbações. De pronto se observa que a perturbação circular é a mais danosa, pois se nota que as leituras dos giroscópios demoram para voltar à zero. Em particular, o giro do densímetro a longo de seu eixo é bem característico e deve ser observado na curva g_x , que tem um decaimento muito lento. O que surpreende nestes gráficos é que o eixo g_z não foi o que teve o decaimento mais rápido, o que contrasta com o Ensaio 12. Isto deve ter acontecido porque a distribuição de pesos internos levou o densímetro a sofrer um pequeno giro ao longo do eixo x. Não está muito claro, mas tal fato pode ser observado no Figura B.8.

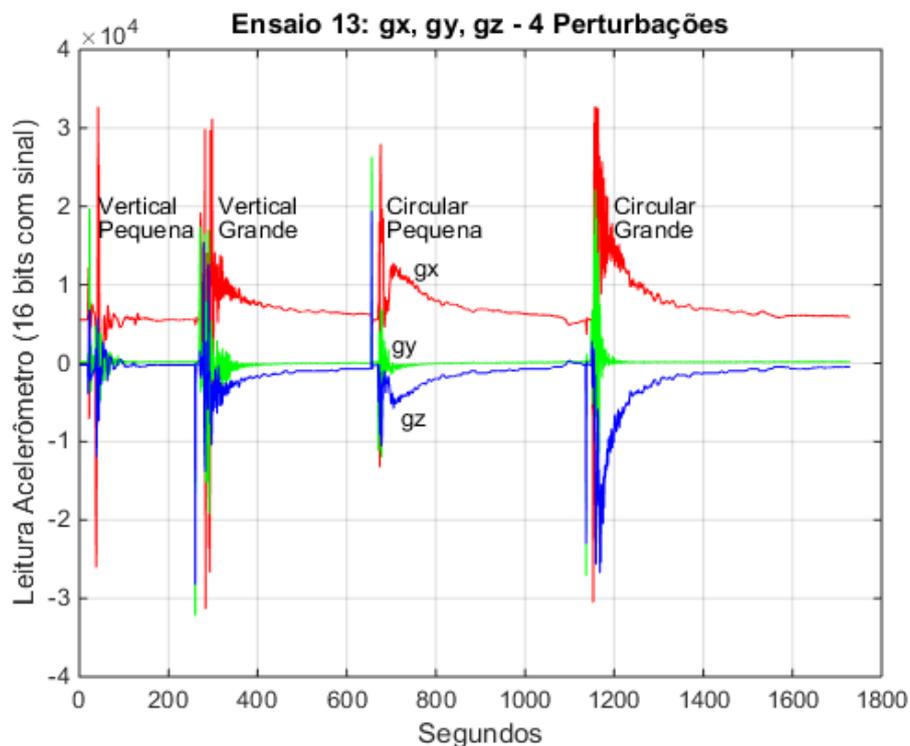


Figura B.21. Gráfico com as medidas absolutas dos 3 giroscópios (g_x , g_y e g_z) após 4 perturbações diferentes.

As seguir são analisadas as diversas figuras relativas aos giroscópios. Novamente, para favorecer a clareza, optou-se por colocar cada figura em uma página. Todas as três figuras apresentadas a seguir confrontam as leituras dos giroscópios com o parâmetro agitação (ag) calculado usando apenas o acelerômetro do eixo ax .

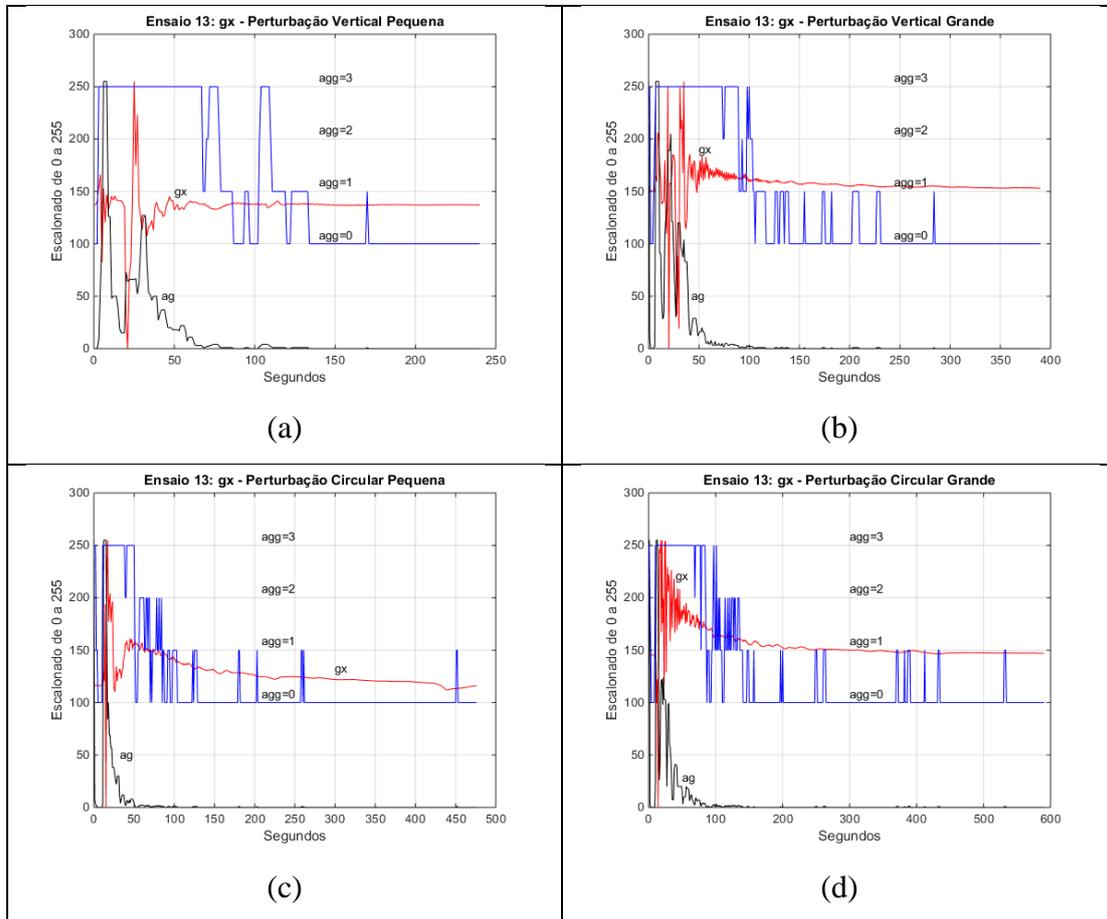


Figura B.22. Gráficos do eixo gx (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

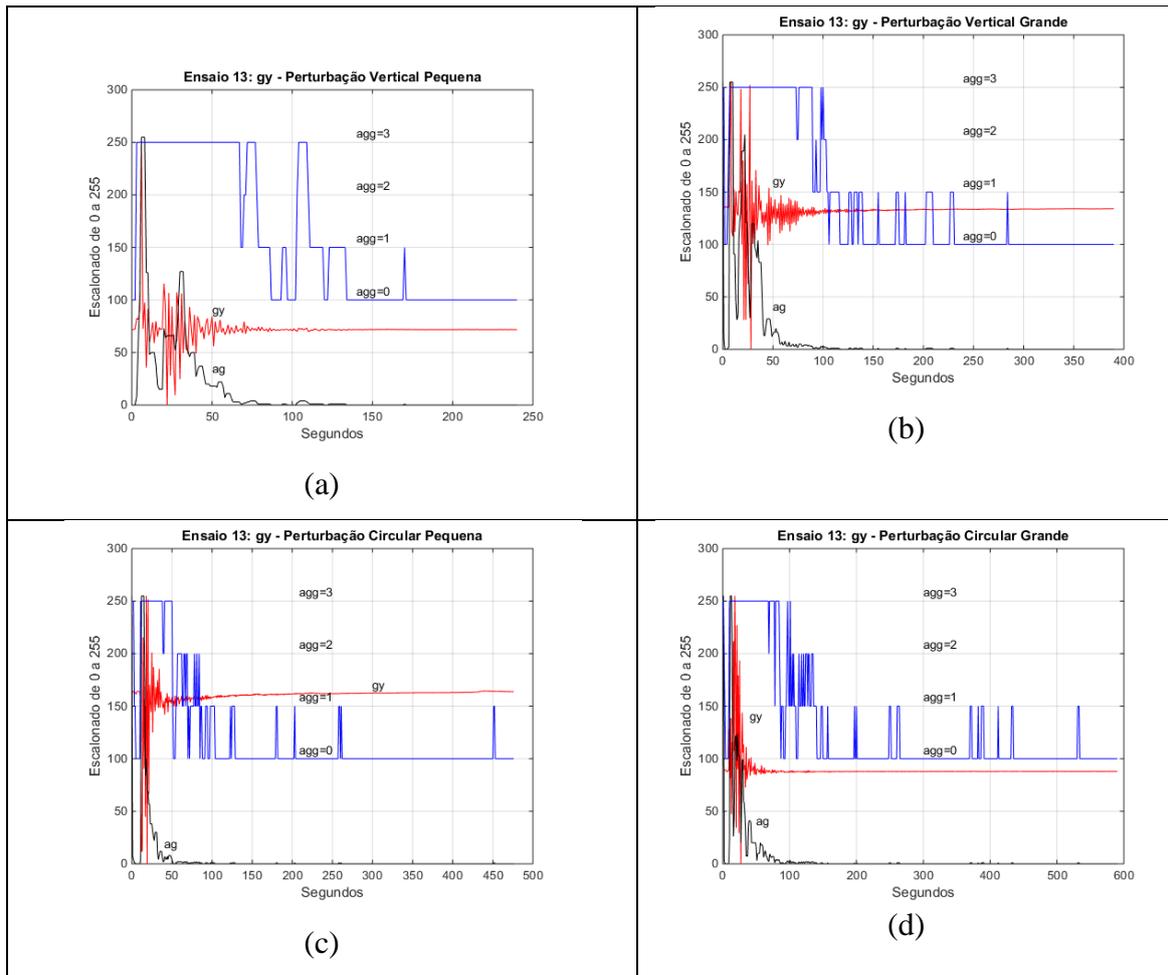


Figura B.23. Gráficos do eixo gy (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

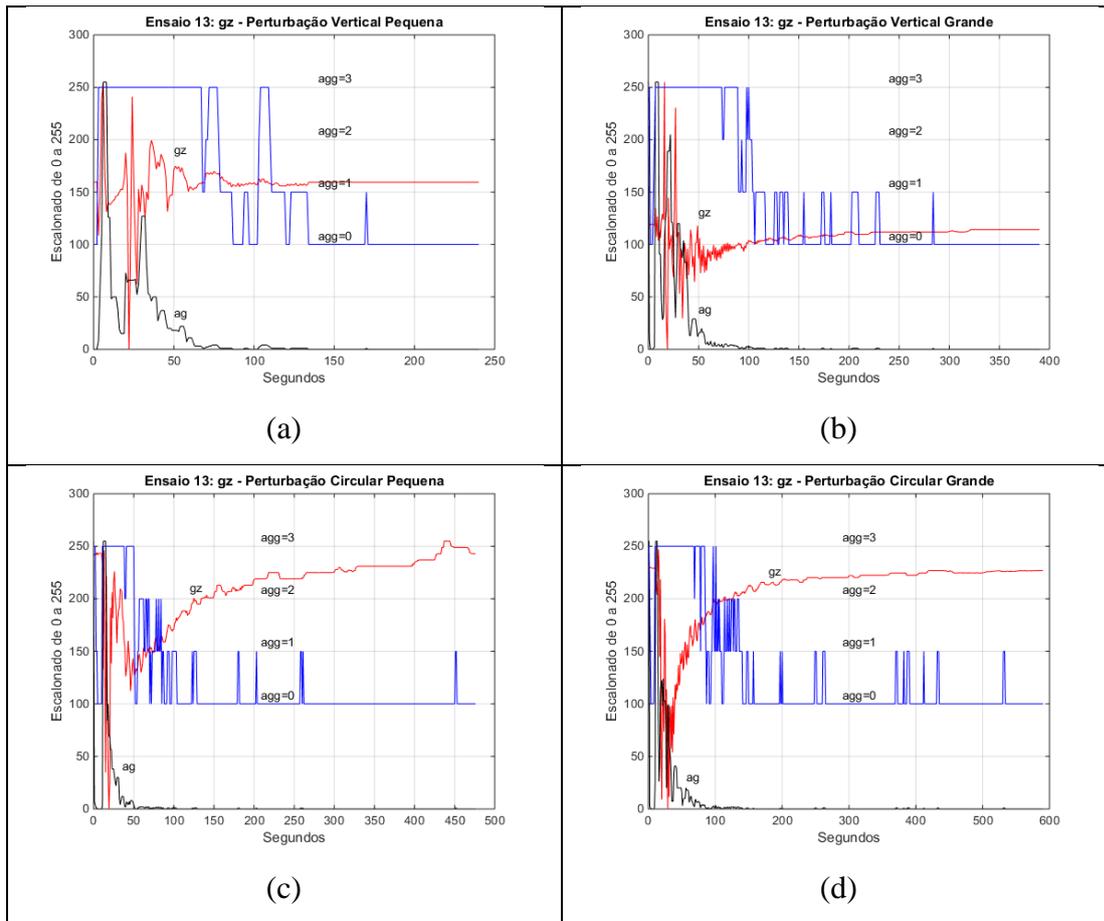


Figura B.24. Gráficos do eixo gz (giroscópio) após as 4 perturbações, escalonados para o intervalo $[0, 255]$. O parâmetro agitação (ag) está limitado (satura) em 255 e o gráfico agg apresenta apenas os valores de agitação limitados à faixa $[0, 3]$ (ver Tabela B.1).

B.11. Análise Espectral dos Ensaio Realizados

Durante os ensaios descritos nos tópicos B.2, B.3 e B.4, observou-se que as medidas realizadas pelo densímetro mostravam muitas oscilações. Daí surgiram algumas perguntas. Será que há uma frequência natural de oscilação? Será que o tipo de perturbação interfere nessas frequências? Essas perguntas são interessantes e para respondê-las, é feito um estudo espectral das oscilações na superfície do líquido, de acordo com as medições realizadas pelo densímetro. Isso vai nos permitir responder se a periodicidade das medidas realizadas e estudadas no tópico anterior estão de acordo com a análise espectral.

É possível notar que para cada ensaio existem 3 intervalos ou faixas interessantes.

- **Faixa 0:** é o primeiro intervalo, dominado pelas perturbações inseridas artificialmente; ele deve ser desprezado pois traz as medições feitas enquanto o agente externo efetuava uma ação sobre o líquido.
- **Faixa 1:** é o segundo intervalo, caracterizado por grandes oscilações, que vão sendo amortecidas com o passar do tempo.
- **Faixa 2:** é terceiro intervalo, vem logo em seguida ao anterior; é caracterizado por oscilações de pequena amplitude sendo que seu término é de difícil caracterização.

A tabela abaixo indica em Hz as frequências fundamentais (as de maior energia) que foram identificadas em cada ensaio e para cada faixa. A Faixa 1 inicia logo após a perturbação e por isso deve sofrer forte interferência da ação que foi realizada sobre o líquido. Por exemplo, após a perturbação vertical foi possível ver que surgiram na superfície do líquido diversas cristas de ondas que se chocavam. Já a Faixa 2 mostra a energia residual que ficou sendo lentamente dissipada pelo líquido. Nesse caso, é interessante notar que, com uma exceção, todas as medidas ficaram próximas de 0,8 Hz, que parece ser a frequência fundamental do líquido no recipiente usado para o ensaio. É preciso indicar que a discrepância notada em 4 Hz é uma harmônica da fundamental.

Tabela B.2. Frequência da componente fundamental em Hz, medida para cada Faixa

	Vertical		Circular		Horizontal	
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 1	Faixa 2
ax	0,86	0,80	0,04	0,84	0,21	0,80
ay	0,10	0,80	1,48	0,84	0,11	4,00
az	0,10	0,80	1,48	0,84	0,11	0,80

A seguir são apresentados os gráficos das diversas faixas para os três ensaios e a respectiva transformada de Fourier. É grande a quantidade de figuras! São 3 ensaios, 3 eixos e 2 faixas por eixo, o que resulta em 18 figuras (3 x 3 x 2), mais uma figura geral por ensaio. Esse total de 21 figuras é identificado na Tabela B.3.

Tabela B.3. Indicação do número das diversas figuras usadas para o estudo espectral do efeito das perturbações

		Perturbação		
		Vertical	Circular	Horizontal
Geral	<i>ax, ay, az</i>	25	32	39
Faixa 1	<i>ax, FFT (ax)</i>	26	33	40
	<i>ay, FFT (ay)</i>	27	34	42
	<i>az, FFT (az)</i>	28	35	42
Faixa 2	<i>ax, FFT (ax)</i>	29	36	43
	<i>ay, FFT (ay)</i>	30	37	44
	<i>az, FFT (az)</i>	31	38	45

Essa grande quantidade de figuras pode ser questionada, entretanto, além das medições realizadas, elas foram inseridas neste apêndice também com a intenção de servir como registro dos diversos ensaios. Para facilitar a visualização, os gráficos relacionados à faixa de cada perturbação são apresentados na mesma folha. Por exemplo, os dados dos três eixos e a respectiva FFT para a Faixa 1 da Perturbação Vertical estão reunidos em uma única página. Para conseguir essa arrumação, foi necessária a inserção de espaços brancos.

B.12. Análise Espectral do Ensaio 1 – Perturbação Vertical

Para este ensaio, a água foi violentamente agitada na vertical e foram coletadas medidas durante vários minutos. Os gráficos dos 3 eixos estão apresentados na Figura B.25. De forma clara, nesta figura identificam-se 3 intervalos ou faixas de tempo que estão marcados com linhas verticais:

- 1) Faixa 0, que corresponde ao intervalo de 0 até 4 s, que é o período em que o sistema estava sendo perturbado por um atuador externo e por isso será abandonado;
- 2) Faixa 1, que corresponde ao intervalo de 4 até 25 s, onde se notam oscilações de grande amplitude que decaem ao longo do tempo e
- 3) Faixa 2, que corresponde ao intervalo de 25 até 50 s, onde se notam oscilações de baixa energia que são lentamente amortecidas. O limite em $t = 50$ s é questionável e poderia ser um pouco mais tarde.

Logo a seguir, as Figuras numeradas de B.26 até B.31 apresentam a forma de onda ampliada para o período em consideração e o gráfico espectral de cada faixa, para cada eixo. Soma-se então um total de 6 figuras (3 eixos e 2 faixas). Os gráficos que mostram a composição espectral estão normalizados e por isso não podem ser usados para comparação de energia. O que se pode afirmar de maneira óbvia é que a faixa 1 possui muito mais energia que a faixa 2.

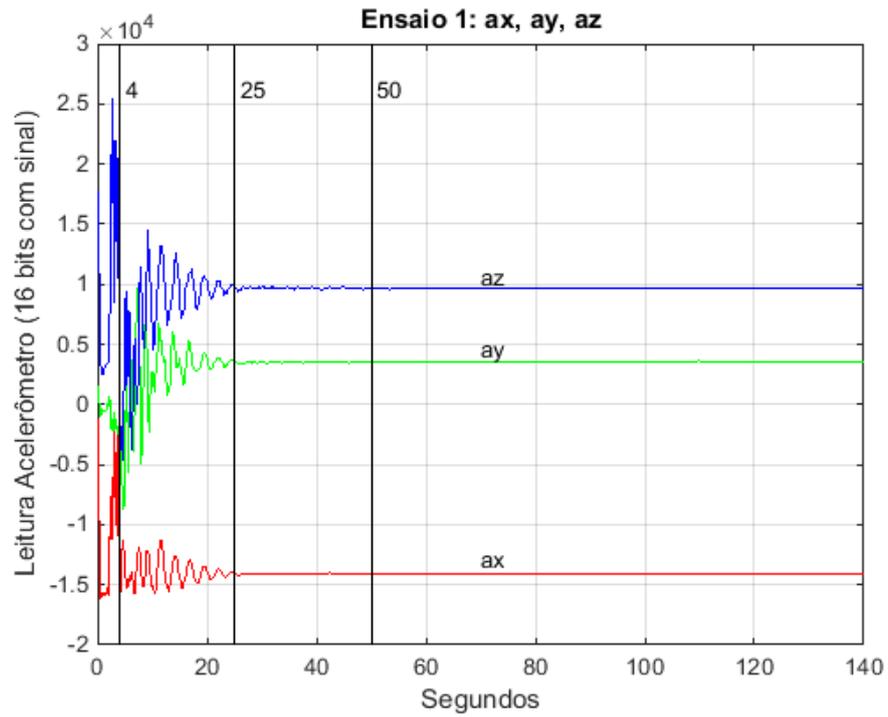


Figura B.25. Gráfico com as medidas dos 3 eixos, coletadas após uma perturbação vertical. As linhas verticais identificam as duas faixas de interesse: Faixa 1 ($t = 4$ até $t = 25$ s) e Faixa 2 ($t = 25$ até $t = 50$ s)

B.12.1. Faixa 1 – Perturbação Vertical (Ensaio 1)

Notar que 2 gráficos apresentam a fundamental em 0,1 Hz e apenas 1 em 0,86 Hz.

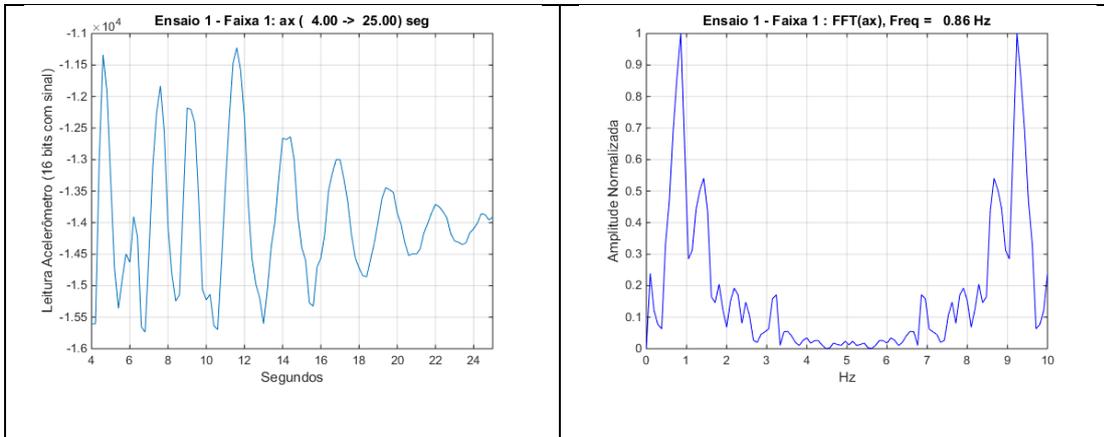


Figura B.26. Gráfico do eixo x para Faixa 1 (4 a 25 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

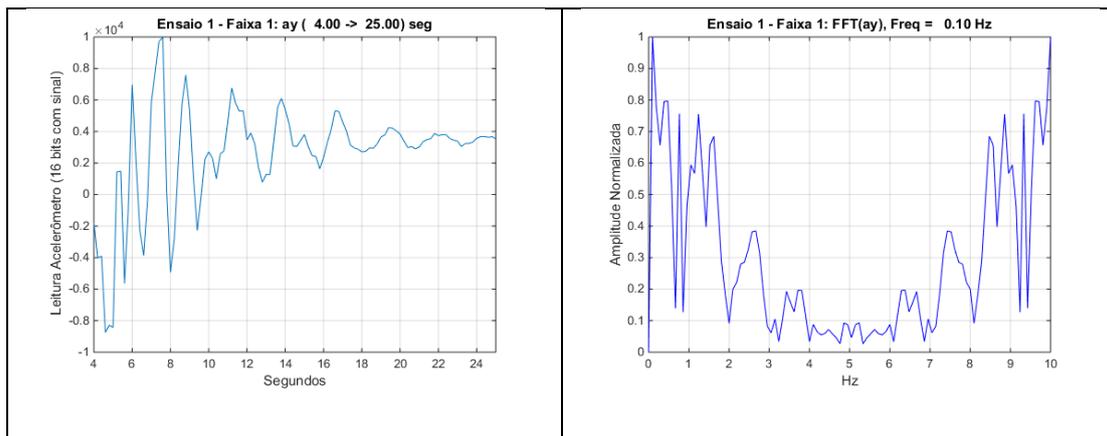


Figura B.27. Gráfico do eixo y para Faixa 1 (4 a 25 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

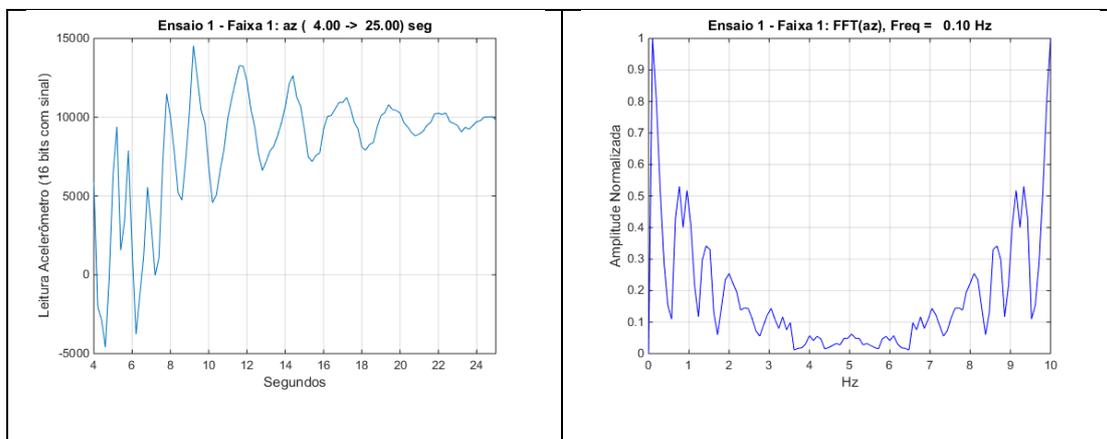


Figura B.28. Gráfico do eixo z para Faixa 1 (4 a 25 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

B.12.2. Faixa 2 – Perturbação Vertical (Ensaio 1)

Notar que os e gráficos apresentam a fundamental em 0,80 Hz.

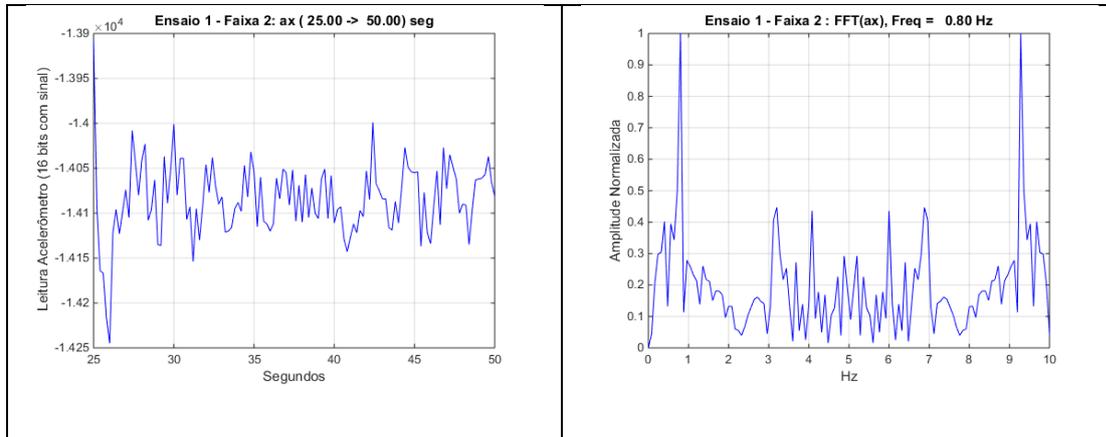


Figura B.29. Gráfico do eixo x para Faixa 2 (25 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

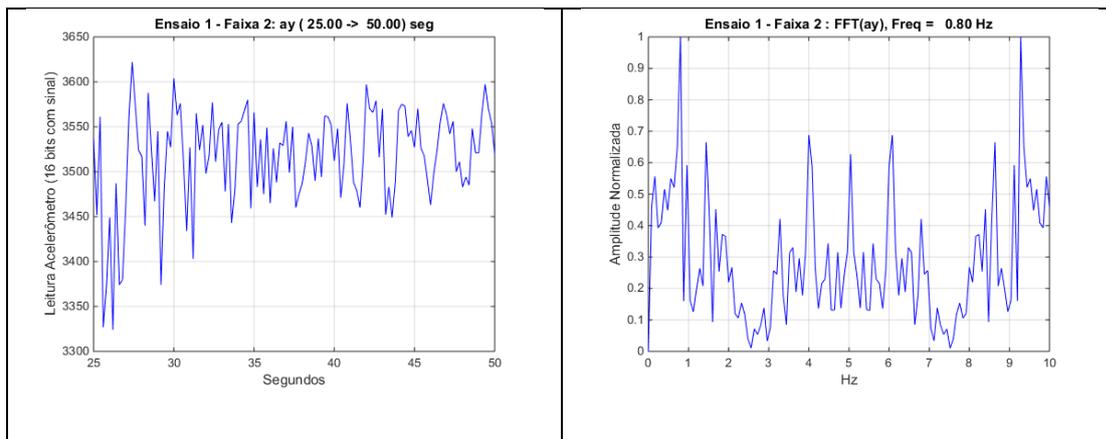


Figura B.30. Gráfico do eixo y para Faixa 2 (25 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

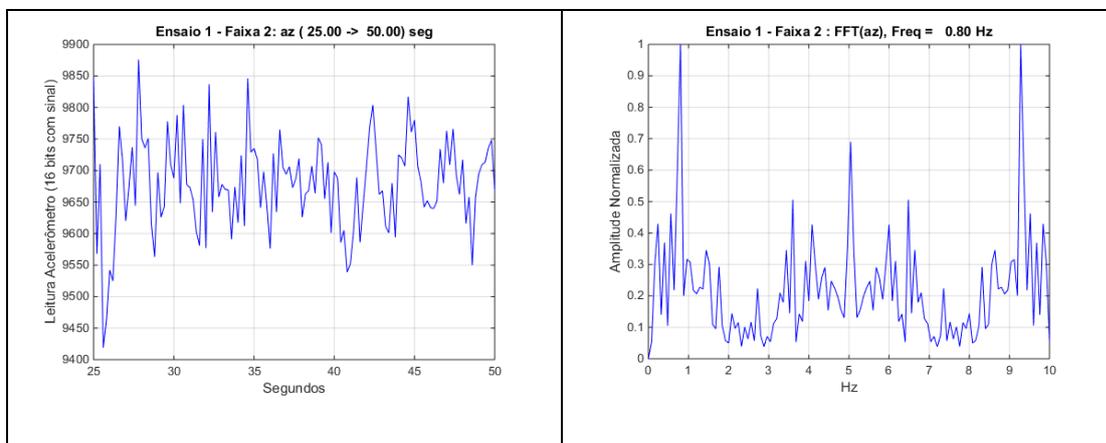


Figura B.31. Gráfico do eixo z para Faixa 2 (25 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação vertical.

B.13. Análise Espectral do Ensaio 2 – Perturbação Circular

Para este ensaio, a água foi agitada de forma circular, com bastante intensidade e foram coletadas medidas durante vários minutos. Os gráficos dos 3 eixos estão apresentados na Figura B.32. Como já se afirmou anteriormente, neste caso foi mais difícil caracterizar a estabilidade pois o líquido permaneceu girando durante um longo tempo. Mesmo depois de vários minutos, podia-se notar um pequeno arrasto no densímetro. Nesta figura, as 3 faixas de interesse estão marcadas com linhas verticais:

- 1) Faixa 0, de 0 até 4 s, é o período do atuador externo e por isso é abandonada;
- 2) Faixa 1, vai de $t = 4$ s até $t = 50$ s, com oscilações de grande amplitude. É de se notar que duração dessa faixa foi muito maior que a do no caso anterior. Seu final é de difícil a caracterização.
- 3) Faixa 2, vai de $t = 50$ até $t = 100$ s, com oscilações de baixa energia que são lentamente amortecidas. Os limites dessa faixa são imprecisos, e pode-se até dizer, arbitrários.

Logo a seguir, as Figuras numeradas de B.33 até B.38 apresentam a forma de onda ampliada para o período em consideração e o gráfico espectral de cada faixa, para cada eixo. Vale lembrar que os gráficos que mostram a composição espectral estão normalizados e por isso não podem ser usados para comparação de energia.

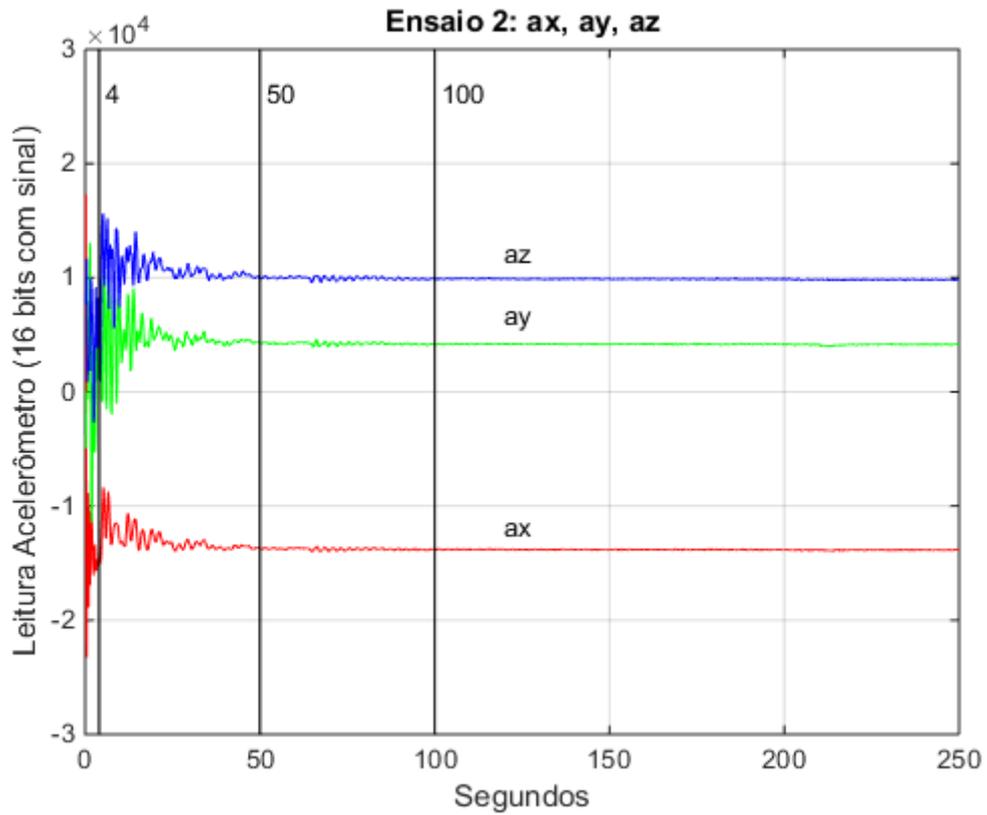


Figura B.32. Gráfico com as medidas dos 3 eixos, coletadas após uma perturbação circular. As linhas verticais identificam as duas faixas de interesse: Faixa 1 ($t = 4$ até $t = 50$ s) e Faixa 2 ($t = 50$ até $t = 100$ s).

B.13.1. Faixa 1 – Perturbação Circular (Ensaio 2)

Notar que 2 gráficos apresentam a fundamental em 1,48 Hz e apenas 1 em 0,04 Hz (se confunde com 0 Hz).

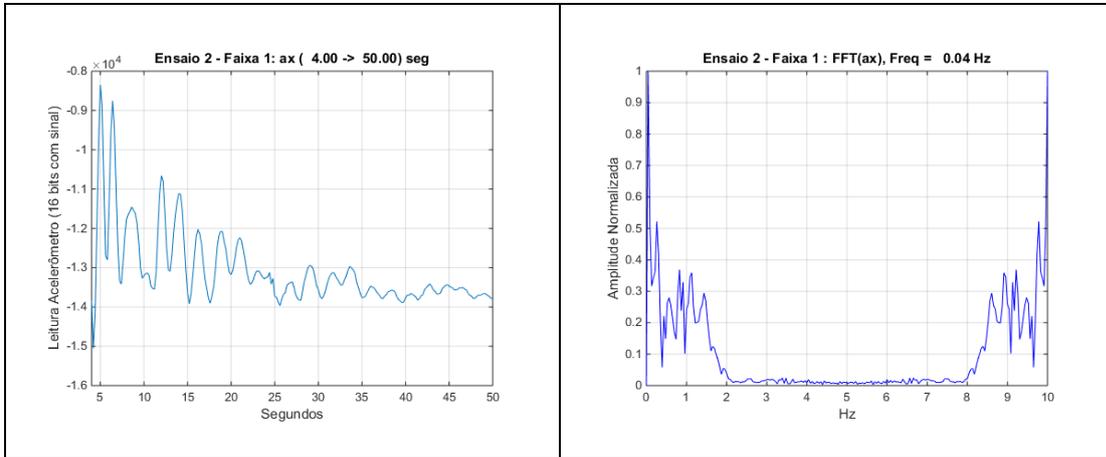


Figura B.33. Gráfico do eixo x para Faixa 1 (4 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

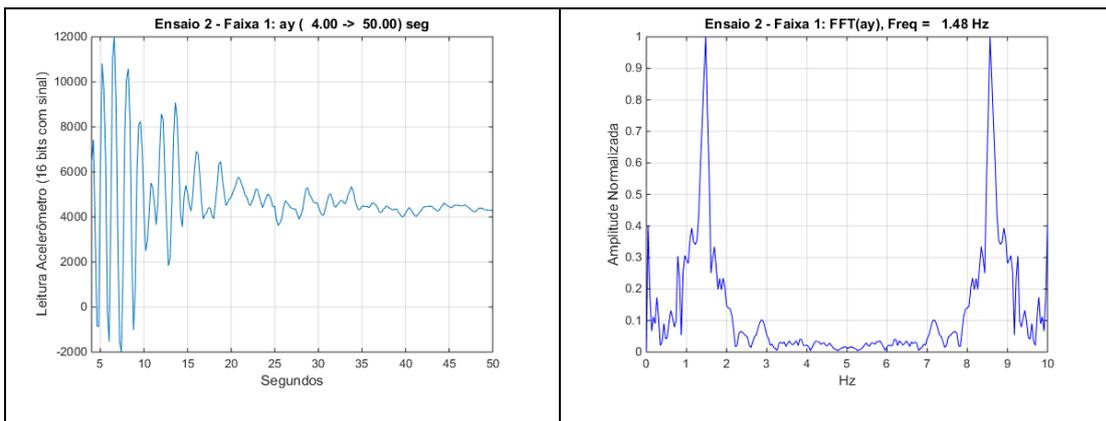


Figura B.34. Gráfico do eixo y para Faixa 1 (4 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

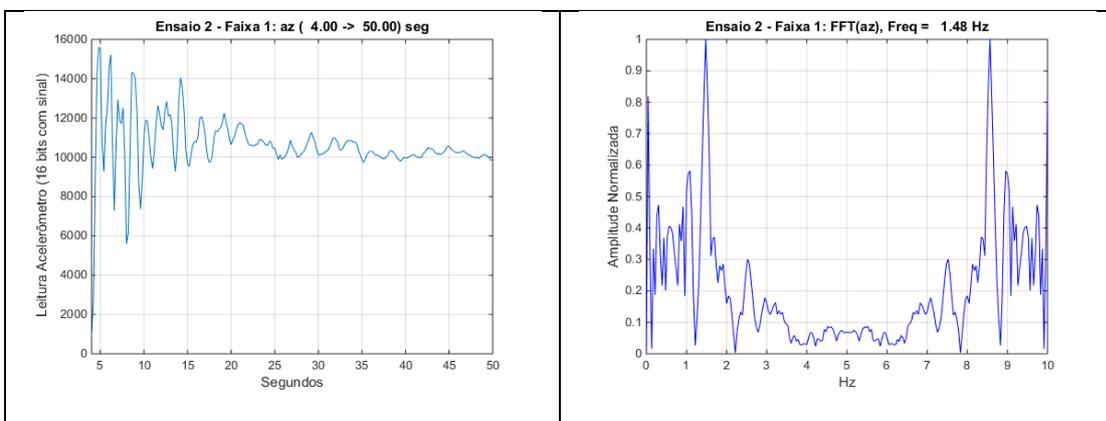


Figura B.35. Gráfico do eixo z para Faixa 1 (4 a 50 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

B.13.2. Faixa 2 – Perturbação Circular (Ensaio 2)

Notar que os 3 gráficos apresentam a fundamental em 0,84 Hz.

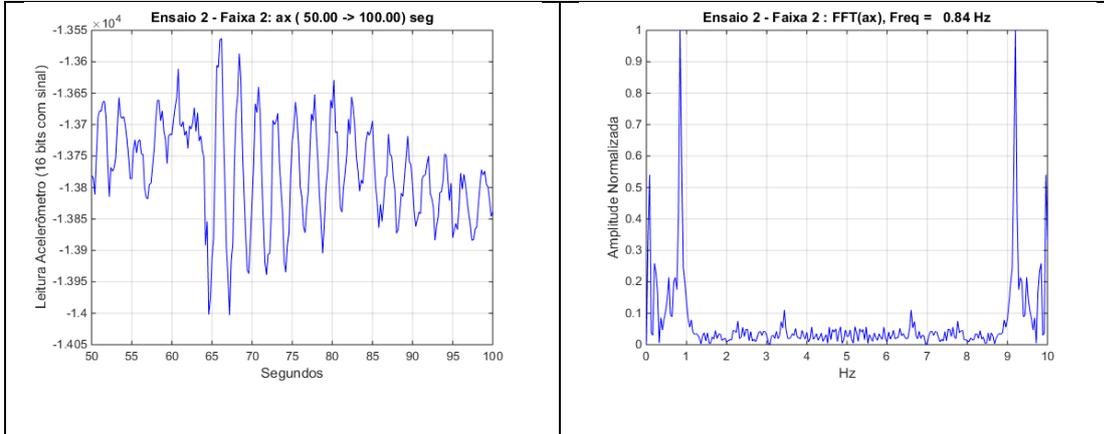


Figura B.36. Gráfico do eixo x para Faixa 2 (50 a 100 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

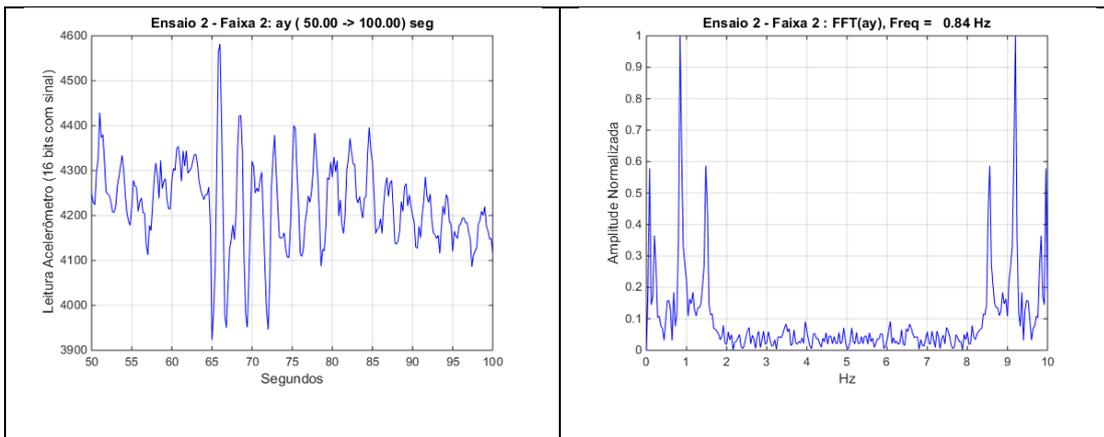


Figura B.37. Gráfico do eixo y para Faixa 2 (50 a 100 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

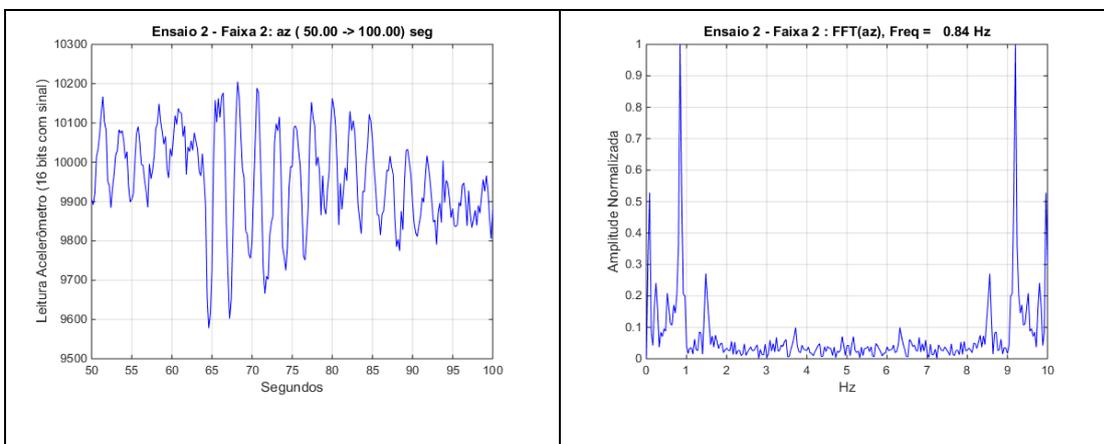


Figura B.38. Gráfico do eixo z para Faixa 2 (50 a 100 s) e a FFT correspondente, após a perturbação circular.

B.14. Análise Espectral do Ensaio 3 – Perturbação Horizontal

Para este ensaio, a água foi agitada na horizontal, de forma intensa. Os gráficos dos 3 eixos estão apresentados na Figura B.39. É de se notar que, dos três ensaios, é o que estabilizou mais cedo. Nesta figura, as 3 faixas de interesse estão marcadas com linhas verticais:

- 1) Faixa 0, de 0 até 1 s, é o período do atuador externo e por isso é abandonada;
- 2) Faixa 1, vai de $t = 4$ s até $t = 20$ s, com oscilações de grande amplitude.
- 3) Faixa 2, vai de $t = 20$ até $t = 40$ s, com oscilações de baixa energia que são lentamente amortecidas.

Logo a seguir, as Figuras numeradas de B.40 até B.46 apresentam a forma de onda ampliada para o período em consideração e o gráfico espectral de cada faixa, para cada eixo. Vale lembrar que os gráficos que mostram a composição espectral estão normalizados e por isso não podem ser usados para comparação de energia.

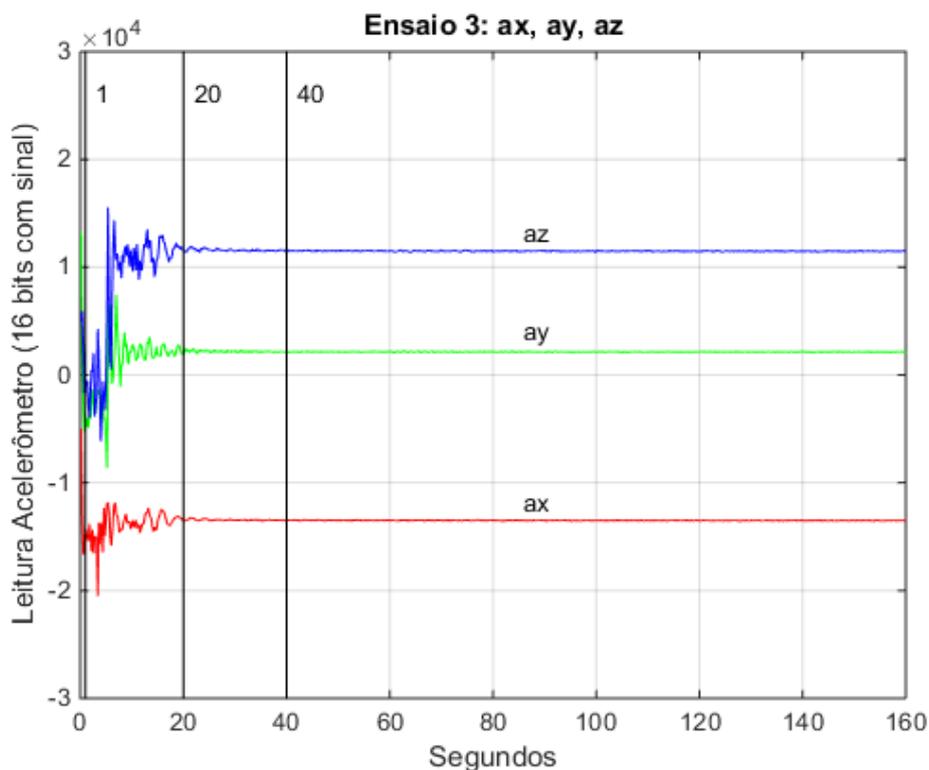


Figura B.39. Gráfico com as medidas dos 3 eixos, coletadas após uma perturbação horizontal. As linhas verticais identificam as duas faixas de interesse: Faixa 1 ($t = 1$ até $t = 20$ s) e Faixa 2 ($t = 20$ até $t = 40$ s).

B.14.1. Faixa 1 – Perturbação Horizontal (Ensaio 3)

Notar que 2 gráficos apresentam a fundamental em 0,21 Hz e apenas 1 em 0,11 Hz.

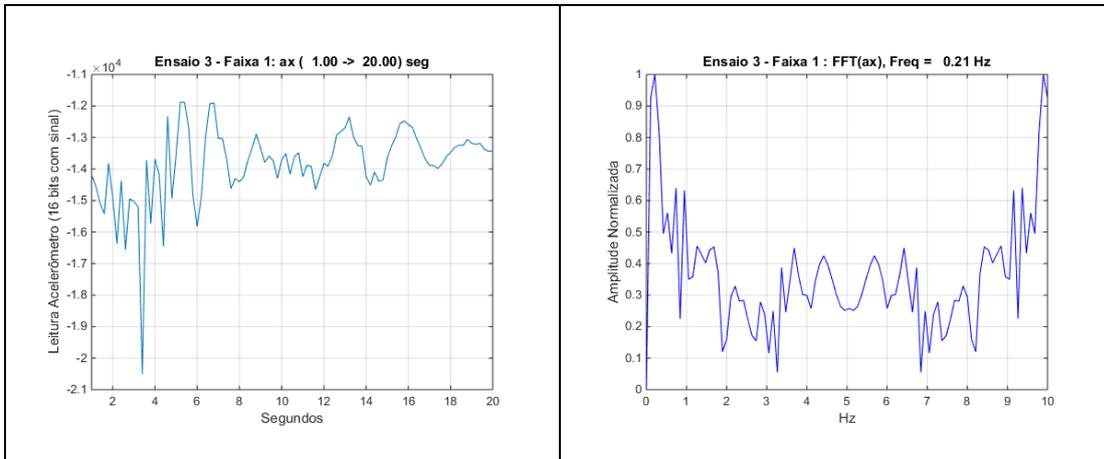


Figura B.41. Gráfico do eixo x para Faixa 1 (1 a 20 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

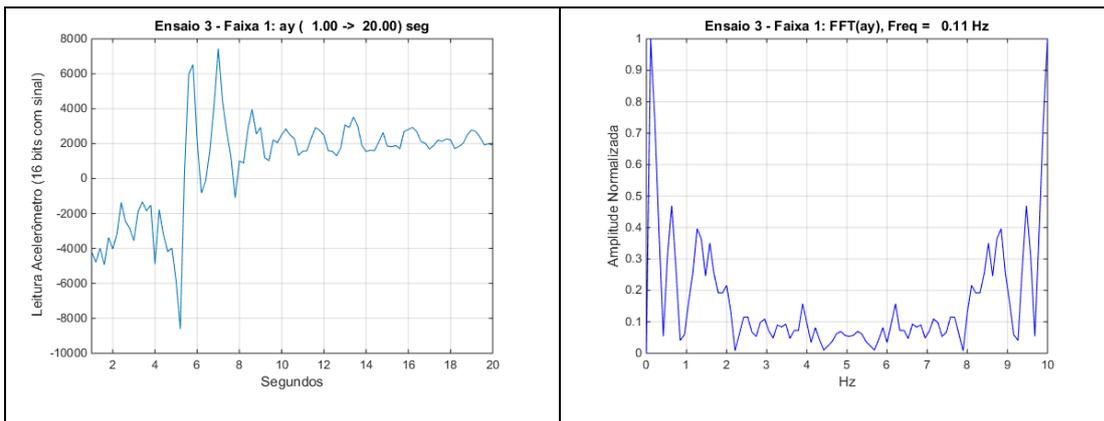


Figura B.42. Gráfico do eixo y para Faixa 1 (1 a 20 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

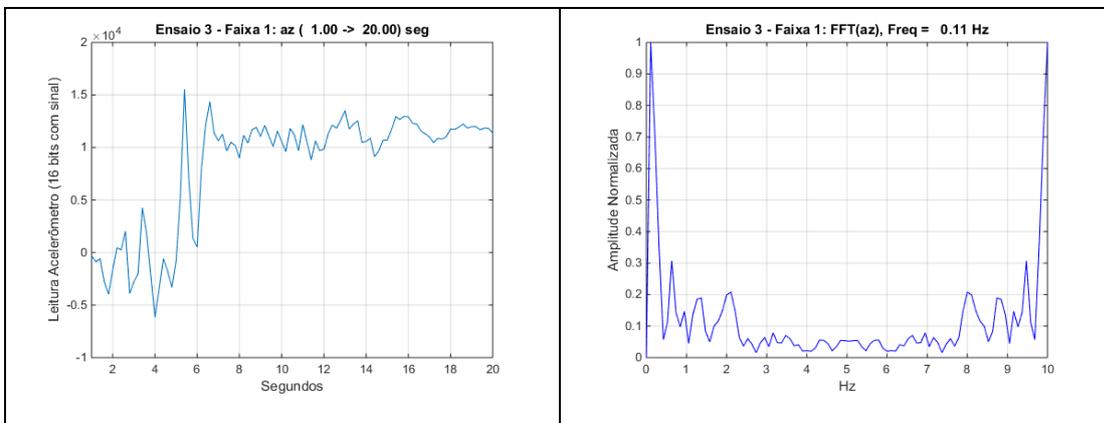


Figura B.43. Gráfico do eixo z para Faixa 1 (1 a 20 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

B.14.2. Faixa 2 – Perturbação Horizontal (Ensaio 3)

Notar que 2 gráficos apresentam a fundamental em 0,80 Hz e um, surpreendentemente, em 4,0 Hz.

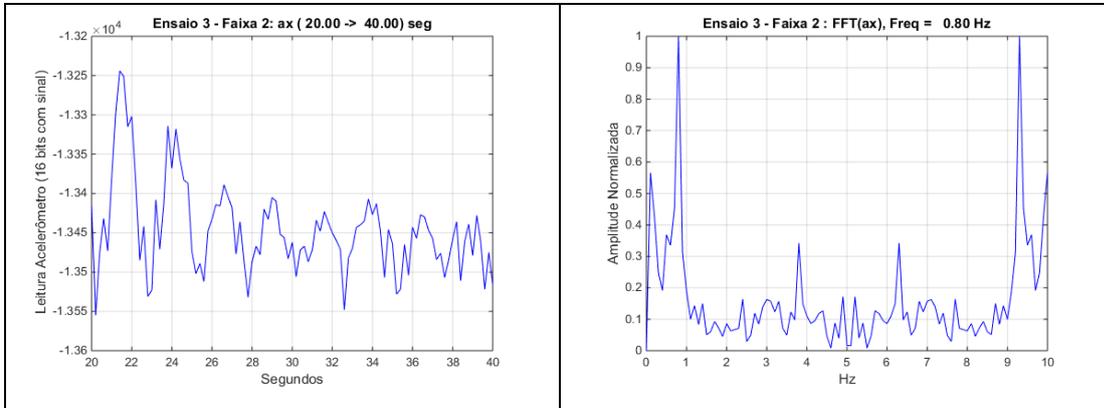


Figura B.44. Gráfico do eixo x para Faixa 2 (20 a 40 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

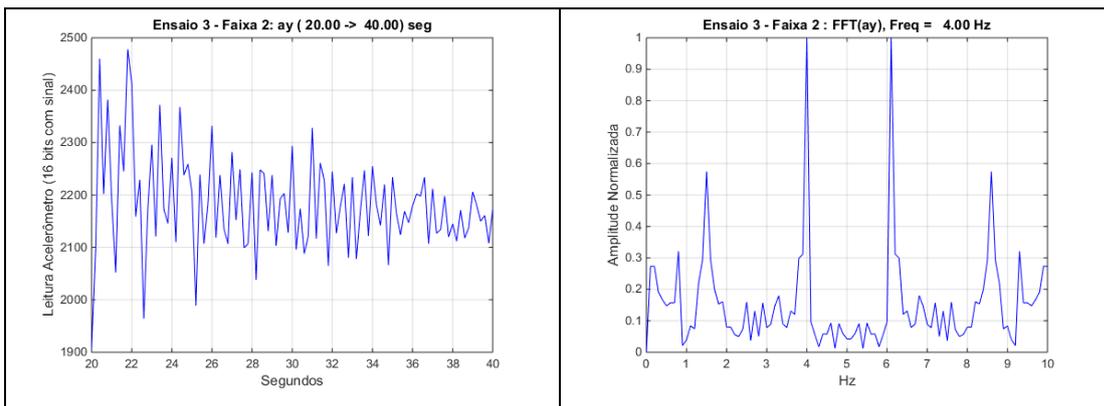


Figura B.45. Gráfico do eixo y para Faixa 2 (20 a 40 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

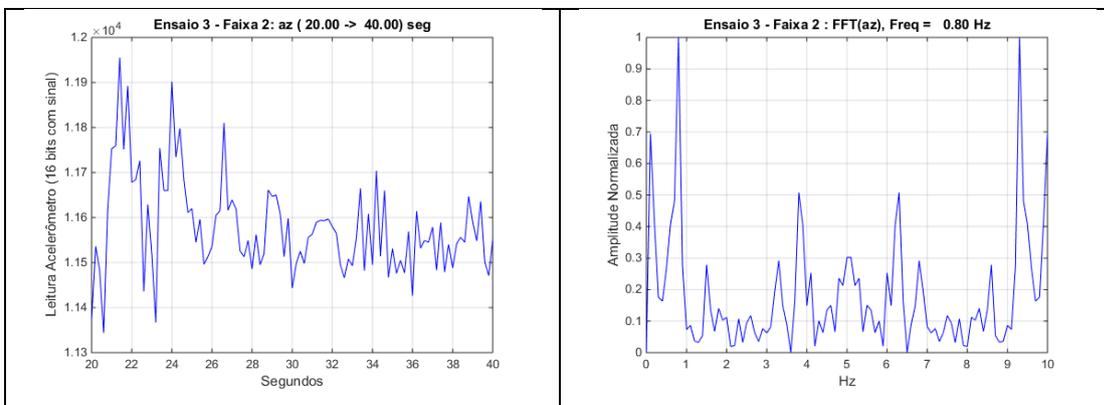


Figura B.46. Gráfico do eixo z para Faixa 2 (20 a 40 s) e a FFT correspondente, após a perturbação horizontal.

B.15. Conclusões

Este anexo descreva proposta de uma métrica para avaliar a agitação do mosto no instante da medida da densidade. Além disso, essa métrica também poderia indicar o momento em que, após uma perturbação, o líquido entrou em estabilidade. A métrica proposta foi a excursão do sinal dentro de uma janela (ej) e se verificou que de 4 segundos definiam um bom tamanho de janela temporal. Os Ensaios 1, 2 e 3 permitiram avaliar a proposta e se considerou que uma janela de 4 segundos apresentaria bons resultados.

Porém, a métrica ej indicava valores numa ampla faixa, sendo que o interesse maior era pelos valores menores, já que estes indicariam a estabilidade. Além disso, havia o problema do ruído inerente a cada sensor, ruído este que poderia variar de um dispositivo para outro. Assim, o próximo passo foi ponderar essa métrica por um fator FT , o que resultou no parâmetro agitação, representado por ag .

Em seguida essa métrica foi validada com dois testes. Com a finalidade de simplificar o cálculo o parâmetro ej foi calculado na taxa de 1 Hz, durante um intervalo de 4 segundos. O cálculo com esta nova configuração se mostrou muito mais simples, além de oferecer resultados excelentes. Assim, os testes validaram a métrica ag . Se demonstrou que só são interessantes os valores de $ag < 3$. Acima de 3, já se pode considerar a medida não confiável.

Para concluir, se fez uma análise espectral dos Ensaios 1, 2 e 3. O ponto mais importante foi a constatação de que realmente existe uma frequência natural de oscilação e que, para o recipiente empregado (com água) ela é de 0,8 Hz.

Uma constatação prática dos Testes 12 e 13 é a necessidade de se conseguir uma disposição rígida dos componentes internos do densímetro. Isto foi levado em conta e uma nova proposta foi feita com todos os componentes solidários a uma única placa.

Apêndice C

Teste sobre a Variabilidade na Montagem e Operação do Densímetro

Este apêndice tem o objetivo de experimentar a variabilidade na montagem de um densímetro e levantar suas curvas de inclinação versus densidade. Também são analisadas algumas hipóteses para estimação da densidade em função desta inclinação. Os resultados aqui obtidos serão usados para a construção de uma nova versão.

A proposta do densímetro prevê duas medidas de referência para permitir o ajuste da curva de inclinação versus densidade. A primeira referência, denominada de $R_{1.000}$ (1.000 mg/cm^3) consiste das leituras dos 3 eixos de aceleração (a_x , a_y e a_z) usando água comum. A segunda referência é opcional e é conseguida com o densímetro imerso em um líquido com uma densidade mais alta, à escolha do usuário. Como no presente ensaio as medidas são feitas continuamente, é possível experimentar diversas possibilidades para essa segunda referência e verificar se ela é realmente necessária.

De forma simples, os ensaios aqui relatados foram realizados para responder às perguntas:

- 1) Existe um valor ideal (inclinação inicial) para a $R_{1.000}$?
- 2) É possível estimar as demais medidas conhecendo-se apenas $R_{1.000}$?
- 3) Quanto $R_{1.000}$ influencia nas demais medidas?
- 4) É necessária a adição de uma segunda referência?
- 5) Quanto variam as medidas a cada nova montagem do densímetro?
- 6) A métrica para estimar a agitação do líquido está sendo útil?
- 7) Qual a melhor métrica para estimar a densidade:
 - a. apenas a variação medida no eixo a_x ou
 - b. a soma dos módulos das diferenças (SMDif) nos 3 eixos?

C.1. Sobre a Preparação para os Ensaio

O densímetro que será submetido aos ensaios é composto por diversos módulos intercambiáveis, listados a seguir.

- Tampa
- Placa mãe (placa principal)
- Soquete para baterias
- Bluetooth
- Memória flash
- Bucha para contenção do lastro.
- Tubo
- Arduino Nano
- Baterias
- Rádio digital
- Lastro e

A foto abaixo identifica apenas os principais módulos.

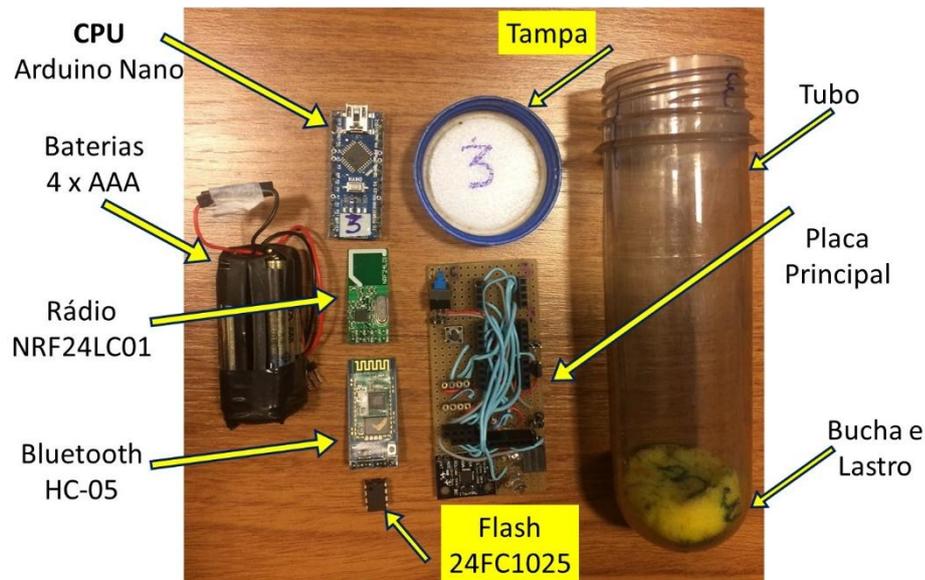


Figura C.1. Principais componentes do densímetro.

A placa mãe ou placa principal, sobre a qual se encaixa o Arduino Nano e os demais módulos é confeccionada artesanalmente e por isso apresenta variabilidade de massa e irregularidade na distribuição desta massa. Por isso, era necessário fazer ensaios com diversas montagens para ver o perfil das medidas e também sua repetibilidade. Para cada montagem foi necessário ajustar a quantidade de lastro para se conseguir que o densímetro ficasse numa posição levemente inclinada quando colocado em água com densidade próxima de 1.000 mg/cm^3 . Como já foi afirmado, esta inclinação será representada do $R_{1.000}$, fazendo alusão à expressão “Referência em 1.000 mg/cm^3 ”. O

valor de $R_{1.000}$ pode ser dado em graus de inclinação ou em projeção da aceleração da gravidade sobre o eixo x.

Com o intuito de responder as perguntas propostas, várias montagens do densímetro foram usadas para realizar medições em solução salina com as típicas densidades encontradas na fermentação de cerveja: 1.000, 1.010, 1.020, 1.030, 1.040, 1.050, 1.060 e 1.070 mg/cm^3 .

As soluções utilizadas nos ensaios foram obtidas através da adição de sal em água. Inicialmente colocou-se água pura (CAESB) em oito recipientes. O primeiro foi mantido somente com água, e a densidade medida foi de 1.000 mg/cm^3 . Aos demais foi adicionado sal até atingirem as densidades almeçadas. Essas densidades foram aferidas com um densímetro analógico tipo vareta, que tem a precisão de $\pm 1 \text{ mg}/\text{cm}^3$. Na Figura C.2 são mostrados os oito recipientes, cada um com solução salina numa determinada densidade.

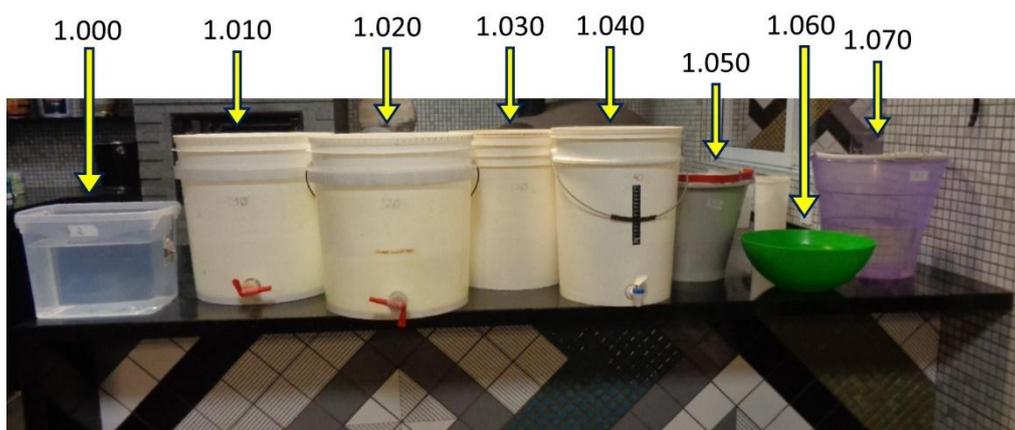


Figura C.2. Recipientes com as diversas soluções utilizadas nos ensaios.

Por ocasião deste ensaio estavam disponíveis 5 placas mãe, que foram numerados de 1 até 5. Os componentes internos, tais como, módulo Bluetooth, Rádio Digital, memória, soquete de baterias, placa de CPU, tubo etc., são intercambiáveis e foram misturados durante os ensaios. Não se tinha disponibilidade de 5 unidades de cada item. Por exemplo, existia a disponibilidade de apenas dois módulos Bluetooth e dois Rádios. Por isso, nos diversos ensaios, alguns módulos foram repetidos. Enfim, a numeração tem a intenção de individualizar cada módulo usado na composição de cada montagem do densímetro.

Na tabela C.1 são apresentados os módulos empregados na construção dos dispositivos com seus respectivos pesos. No momento deste ensaio, o densímetro 2 não estava disponível. Várias memórias Flash podem ser usadas (24LC512, 24FC1025 etc.) e como elas são do mesmo fabricante, todas apresentaram o mesmo peso e por isso não foram identificadas com números.

Tabela C.1 - Peso de cada componente em gramas (precisão 0,1 g)

Número →	1	2	3	4	5
Tampa	4,4		4,4	4,3	4,4
Tubo	87,2		87,1	87,2	87,4
Placa	22,2		23,1	23,8	23,6
Nano	4,9		4,5	4,5	4,5
Bluetooth	2,9	2,9	2,9		
Rádio	2,3	2,2			
Soquete + Bateria (AAA)	51,6 Panasonic				
Soq Vazio			6,4	6,6	6,2
Espuma	0,5		0,5		
Lastro	22,3				
24LC512	0,5				
Soma	196,5				
Conj. Medido	196,5				

Observação: para comprovar as medidas, o conjunto 1 (coluna da esquerda) teve seu peso final comparado com a soma dos pesos de seus componentes.

Na preparação para os ensaios, notou-se que, de acordo com o fabricante, havia uma grande variação no peso das baterias. A Tabela C.2 apresenta o peso das diferentes baterias disponibilizadas para os ensaios. É claro que quanto maior o peso de uma bateria, maior é a sua duração. Os experimentos comprovaram que a Duracell apresenta o melhor desempenho. Por outro lado, algumas baterias chinesas tinham um desempenho ruim, o que fica evidente por um peso abaixo de 6 g.

Tabela C.2- Pesos de algumas baterias AAA (precisão 0,1 g)

Marca	Peso (g)
Duracell	11,5
Maxell	11,4
Rayovac	11,5
Panasonic	10,9
Philips	8,6

Para estes ensaios, o acelerômetro foi programado para a escala de maior resolução, que é a de +/-2 g. O giroscópio também usou sua maior resolução que é a escala de +/- 250 graus/s. A taxa de medição foi de 1 Hz (1 medida por segundo), sendo que cada medida é a média de 16 leituras consecutivas (sem intervalos) do acelerômetro.

Um ponto que merece comentário é a perturbação da solução salina quando se adiciona o densímetro. É claro que as medições feitas com o líquido em movimento são imprecisas. Porém, é muito difícil caracterizar quando o sistema todo está estático. Outro item que dificulta é o ruído inerente a cada sensor. Para resolver este problema de movimentação do líquido, foi usada a métrica “agitação” (*ag*), cujo detalhamento está apresentado no Apêndice B.

Aqui se faz uma breve descrição de como a métrica acima citada foi calculada. Ela toma como base a excursão (*ej*) das medidas do eixo *ax* em uma janela de 4 segundos. Em outras palavras, a excursão é calculada pela diferença entre o maior e o menor valor das últimas 4 leituras no eixo *ax*. Para gerar certa robustez ao ruído intrínseco de cada sensor, essa diferença foi dividida por um Fator de Ponderação (*FT*) igual a 50, como mostrado na equação abaixo. Na escala usada (+/- 2 g), 50 unidades num eixo do acelerômetro correspondem a 3 mg (0,003 g – 3 milésimos da aceleração da gravidade).

$$ag = \frac{ej}{FT = 50} \cdot$$

Para evitar valores grandes, essa medida de agitação (*ag*) satura em 255, o que corresponde a perturbações acima de 16 mg (0,016 g). Assim, o critério de agitação

oferece valores na seguinte faixa: 0, 1, ..., 255. As medições feitas pelo densímetro só foram consideradas válidas quando a métrica agitação ficava abaixo de 3.

O sensor usado, o MPU 6050, possui um acelerômetro de 3 eixos e um giroscópio também de 3 eixos. Como os ensaios tinham a finalidade investigativa, a cada segundo todas essas informações (7 leituras = 6 eixos + agitação) eram disponibilizadas. Para facilitar a comunicação com o computador, foi usado apenas o Bluetooth. O rádio digital ainda não funcionava corretamente por ocasião dos ensaios. Assim, a cada segundo o densímetro transmite as medidas via Bluetooth e o computador as armazena num arquivo ASCII padrão. Isso facilitou o processamento posterior, feito com o Matlab, para traçar as curvas que descrevem o comportamento do densímetro em função da densidade

Os detalhes relativos a cada ensaio e as respectivas são apresentados a seguir. Ao final, será feita uma análise de cada experimento.

C.2. Teste 01

Este primeiro teste (ensaio) será descrito com mais detalhes, para deixar claro o processo usado. A explanação sobre os demais testes será breve. A montagem do densímetro preparado para o teste ensaio foi feita com os módulos apresentados na tabela abaixo, onde os pesos estão em gramas. O lastro necessário para esta montagem foi conseguido com 76 bolinhas de chumbo (26 gramas). O peso total do equipamento foi de 200 gramas.

Tabela C.3. Densímetro usado no Teste 01

Módulo	Tubo + Tampa	Placa	Nano	Blue	Soq+Bat Panasonic	Lastro
Número	1	1	4	1	1	-
Peso (g)	91,7	22,4	5,0	5,0	51,7	26,0+0,5

Na figura abaixo pode ser observado o densímetro utilizado nesse teste quando colocado em água com densidade aproximada de 1.000 mg/cm^3 . Este foi o ensaio para obter $R_{1.000}$.

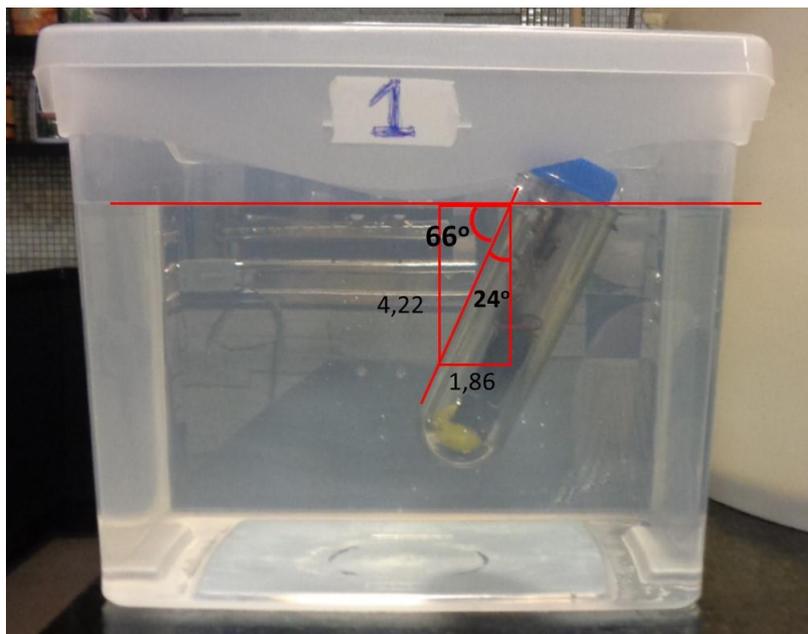


Figura C.3 - Teste 01, ($R_{1.000}$) densidade de 1.000 mg/cm^3 .

Neste teste 01 e em todos os demais, o densímetro foi sequencialmente mergulhado nos recipientes com as diferentes soluções salinas nas diversas densidades. A inserção do densímetro perturbava o líquido, e por isso era necessário aguardar sua estabilização. Uma vez estabilizado, se colhiam medidas durante vários segundos e repetia-se o processo para o recipiente seguinte.

Para facilitar esse processo, as medidas enviadas pelo densímetro foram coletadas ininterruptamente e, depois, selecionou-se as porções estáveis relativas a cada densidade. A seleção da faixa de medição estável para cada densidade foi feita manualmente e o critério de seleção para indicar essa estabilidade foi $ag < 3$.

A Figura C.4 apresenta o gráfico com as leituras do eixo ax do acelerômetro. Estão rotuladas as porções de tempo relativas a cada densidade. As bruscas variações verticais indicam, de forma inequívoca, a manipulação do densímetro para transferi-lo de um recipiente para o outro.

Para identificar a faixa de tempo durante a qual o líquido estava na estabilidade, foi usada a métrica agitação (ag). A Figura C.5 apresenta o gráfico do eixo ax junto com métrica agitação cujo valor máximo foi limitado em 3, para facilitar a visualização. Como já se afirmou, o critério de estabilidade foi $ag < 3$. A Figura C.6 apresenta as medições para os eixos ay e az .

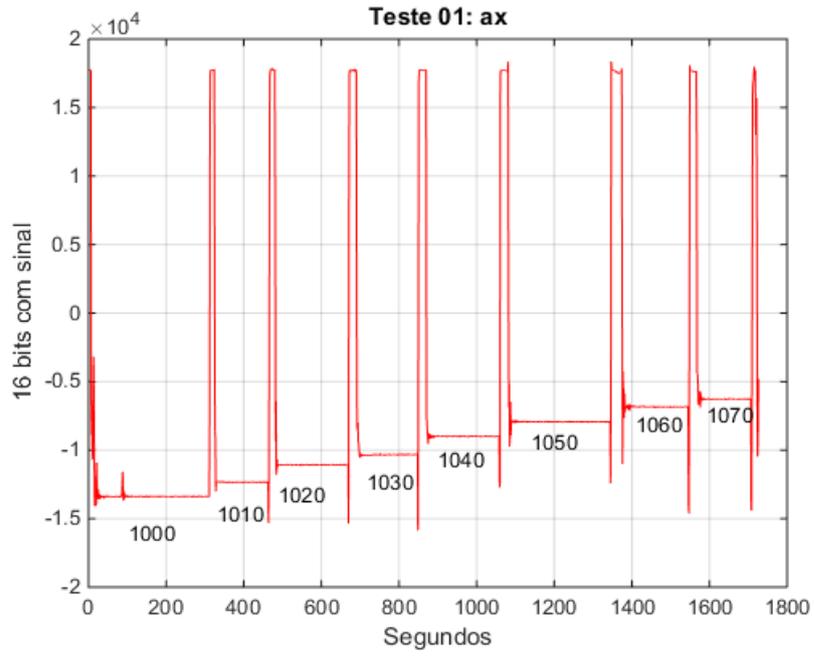


Figura C.4 - Teste 01, medições do eixo ax.

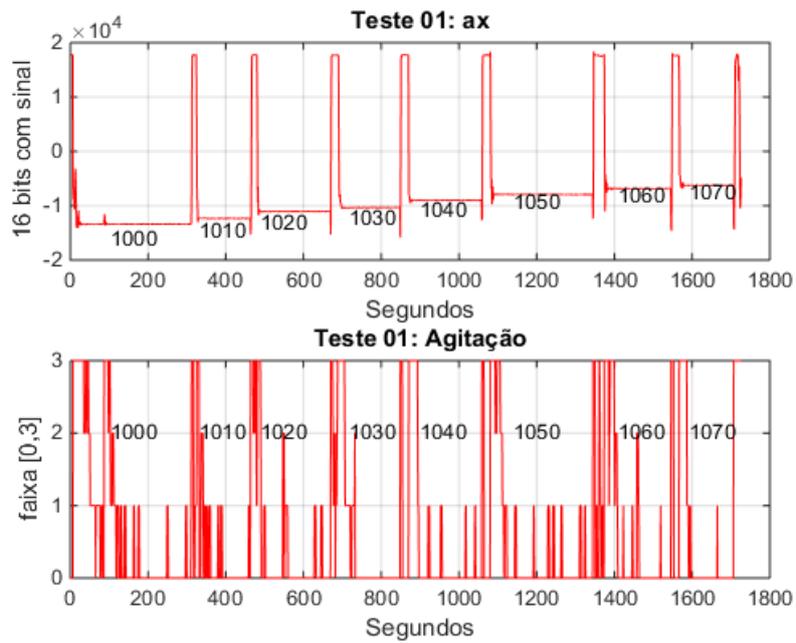


Figura C.5 - Teste 01, medições do eixo ax, junto com a métrica de agitação, cujo valor máximo foi limitado (saturado) em 3.

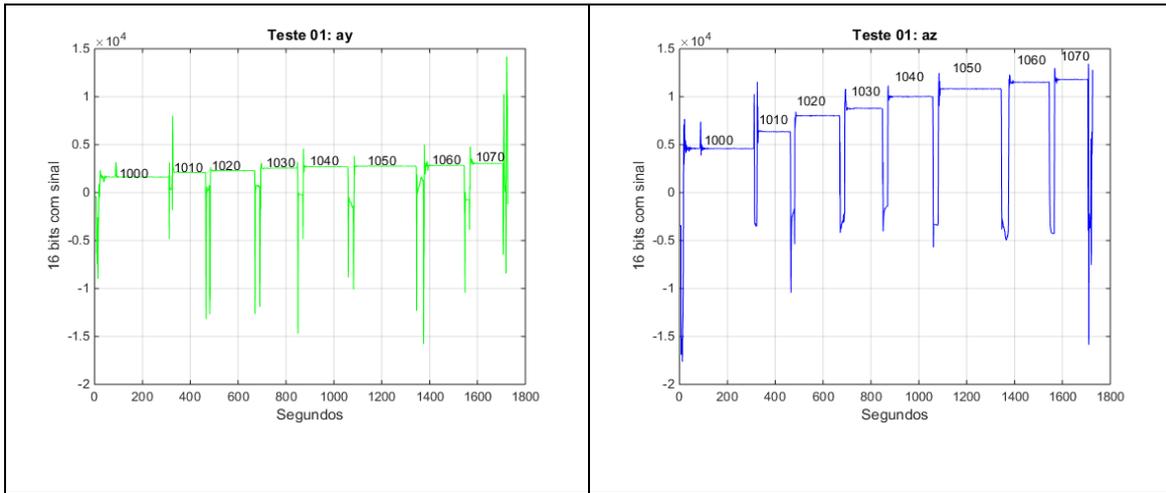


Figura C.6 - Teste 01, medições dos eixos ay e az.

De posse da faixa de estabilidade para cada densidade, foi calculada a média das medições úteis (a_x , a_y e a_z), dentro de cada faixa. Isso permitiu levantar a tabela de densidade versus leituras do acelerômetro. O eixo a_x , que está no sentido longitudinal do densímetro é o mais importante. A porção da esquerda da Figura C.7 apresenta o gráfico do eixo a_x , escalado para g (aceleração da gravidade) versus densidade. Já a porção da direita apresenta o gráfico de inclinação do densímetro versus densidade. Como se pode ver, as duas curvas são semelhantes. Notar que nesta figura estão listados os valores medidos para cada densidade (sequência de números na parte central da figura).

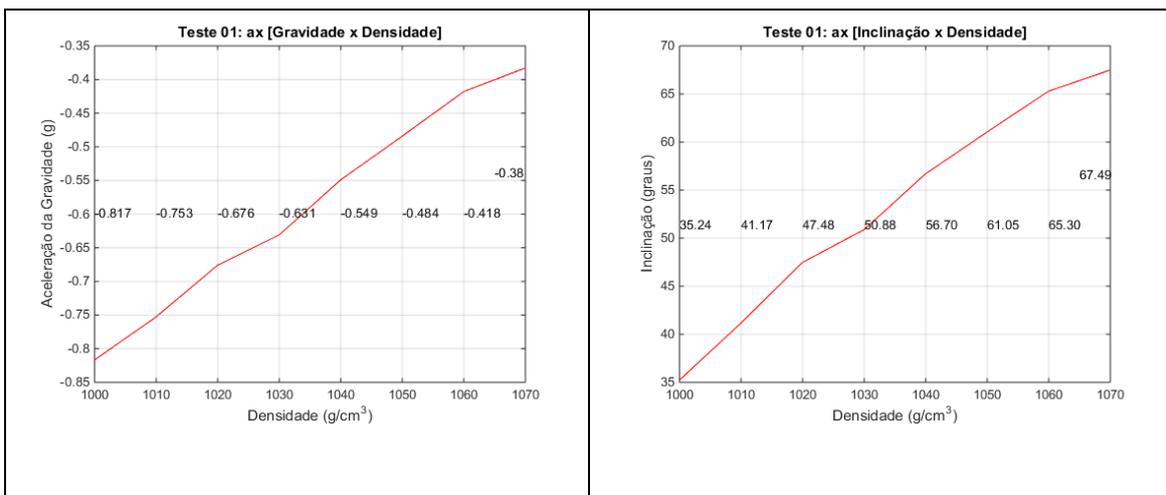


Figura C.7 - Teste 01, inclinação versus densidade.

As equações abaixo indicam como calcular a aceleração da gravidade correspondente a uma medida a_x e a respectiva inclinação (ang). Há uma discrepância

de 11 graus do ângulo calculado para a densidade 1.000, que foi de 35,24° para o ângulo medido a partir da foto apresentada na Figura C.3.

$$g_{ax} = \frac{2 \cdot ax}{32767} \quad e \quad ang_{graus} = \cos^{-1}(g_{ax})$$

Existe ainda a proposta de outra forma de se medir as variações do densímetro que é usando a denominada Soma dos Módulos das Diferenças (SMDif), cuja equação é apresentada a seguir

$$SMDif = |ax_m - ax_R| + |ay_m - ay_R| + |az_m - az_R| \quad ,$$

onde ax_m , ay_m , az_m são os valores medidos no acelerômetro e ax_R , ay_R , az_R são as medidas de referência, que no presente caso são as leituras tomadas com a densidade igual a 1.000 mg/cm³. A Figura C.8 apresenta as três medidas, escalonadas de 0 até 1 para facilitar a comparação. Pode-se ver que existe uma grande semelhança entre elas e não se vê qualquer vantagem apreciável para uma em particular.

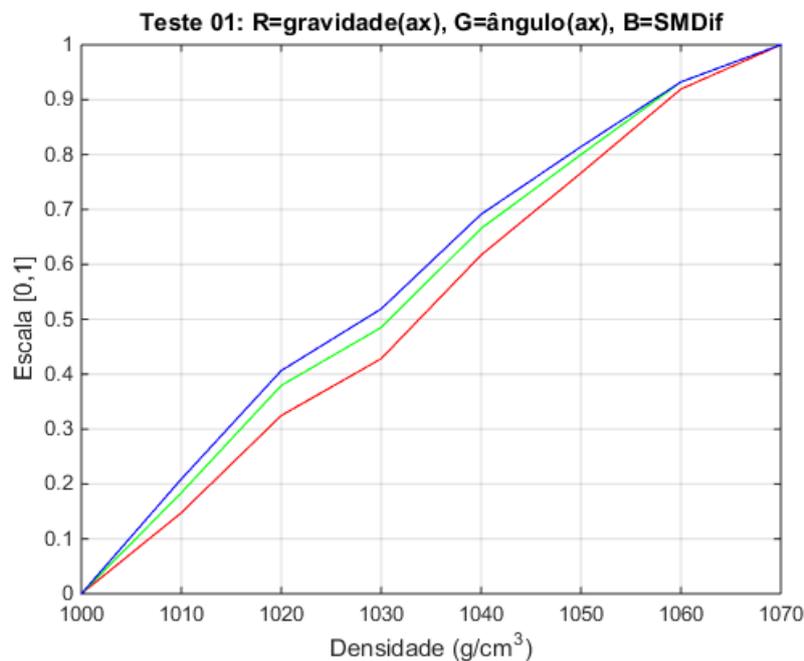


Figura C.8 - Teste 01, apresentação das 3 formas de se analisar as variações de densidade medidas pelo acelerômetro.

Para finalizar a análise do Teste 01, a Figura C.9 apresenta o resultado da soma vetorial das leituras dos 3 eixos do acelerômetro. É sabido que o resultado de tal soma

vetorial deve ser a aceleração da gravidade (1 g). Esta figura é importante pois valida as leituras dos 3 eixos.

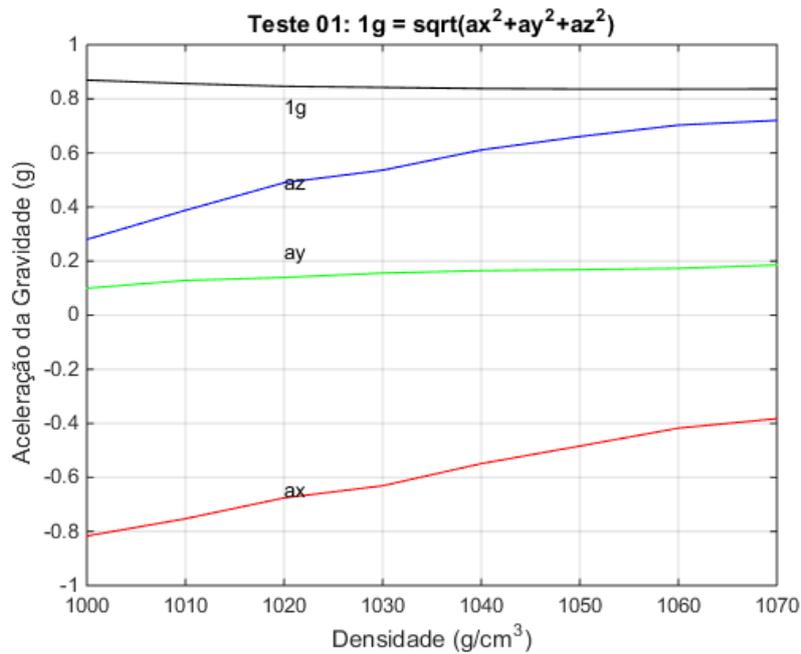


Figura C.9 - Teste 01, soma vetorial das leituras dos 3 eixos do acelerômetro.

Após a apresentação de todos esses detalhes, encerra-se a análise do Teste 01. Como são 11 testes, os próximos 10 serão apresentados de forma resumida, listando apenas os itens mais importantes.

C.3. Teste 02

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 76 bolinhas de chumbo (26 gramas). O peso total do aparelho foi de 200,8 gramas.

Tabela C.4. Densímetro usado no Teste 02

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
3	3	4	-	-	3	1-Panasonic	
91,5	23,1	5,0			3,0	51,7	26,0+0,5

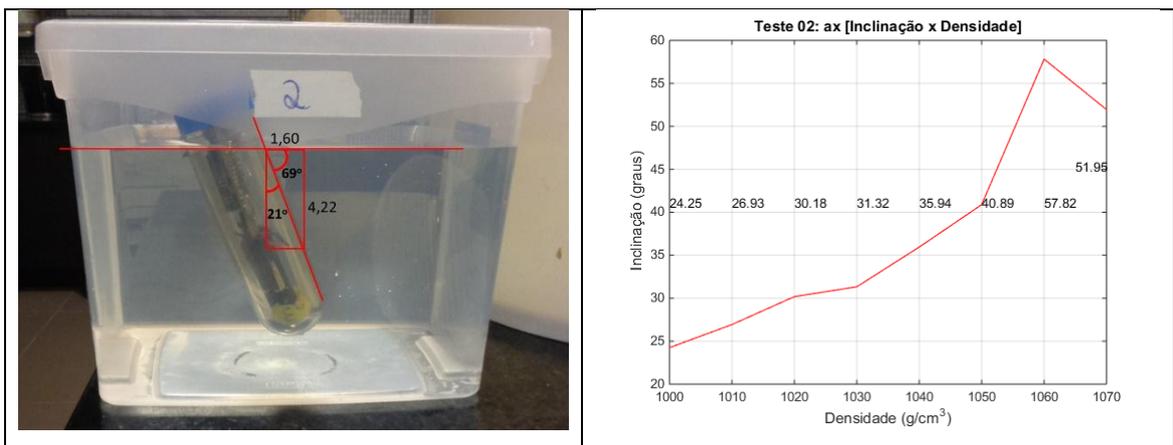


Figura C.10 - Teste 02, posição inicial do densímetro e a curva resultante.

A Figura C.10 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1,000}$ e a curva obtida, que obviamente apresenta problema. A inclinação de 21° calculada pela foto ficou próxima à de $24,25^\circ$ calculada com as leituras do densímetro.

C.4. Teste 03

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 64 bolinhas de chumbo (21,6 gramas). O peso total do aparelho foi de 196,6 gramas.

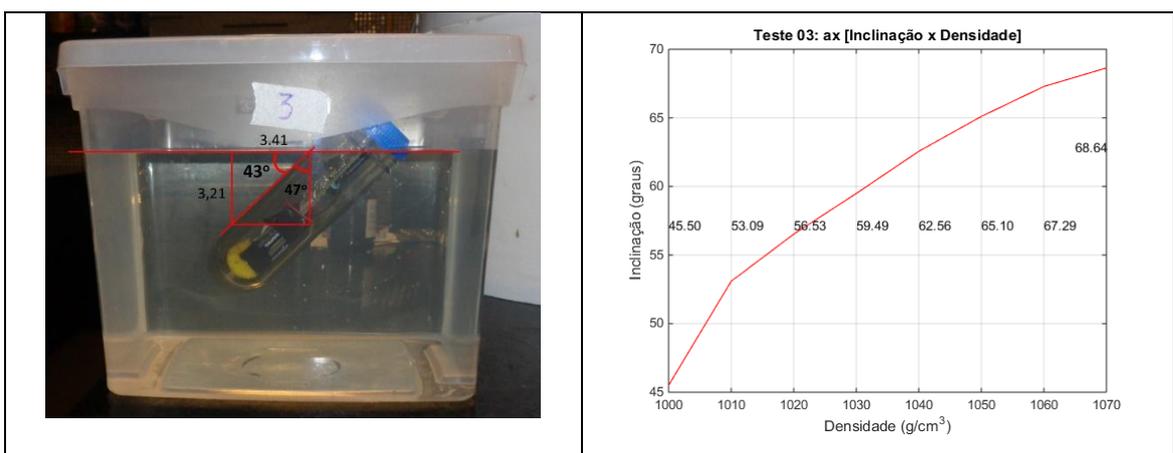


Figura C.11 - Teste 03, posição inicial do densímetro e a curva resultante.

Tabela C.5. Densímetro usado no Teste 03

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
4	4	4	0	0	3	1-Panasonic	
91,6	24,1	4,7			3,1	51,7	21,6+0,5

A Figura C.11 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência R_{1.000} e a curva de inclinação obtida. A inclinação de 43° calculada pela foto ficou próxima à de 45,50° calculada com as leituras do densímetro.

C.5. Teste 04

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 64 bolinhas de chumbo (21,6 gramas). O peso total do aparelho foi de 199,5 gramas.

Tabela C.6. Densímetro usado no Teste 04

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
4	4	4	1	1	3	1-Panasonic	
91,6	24,1	4,7	0,5	23	3,1	51,7	21,6+0,5

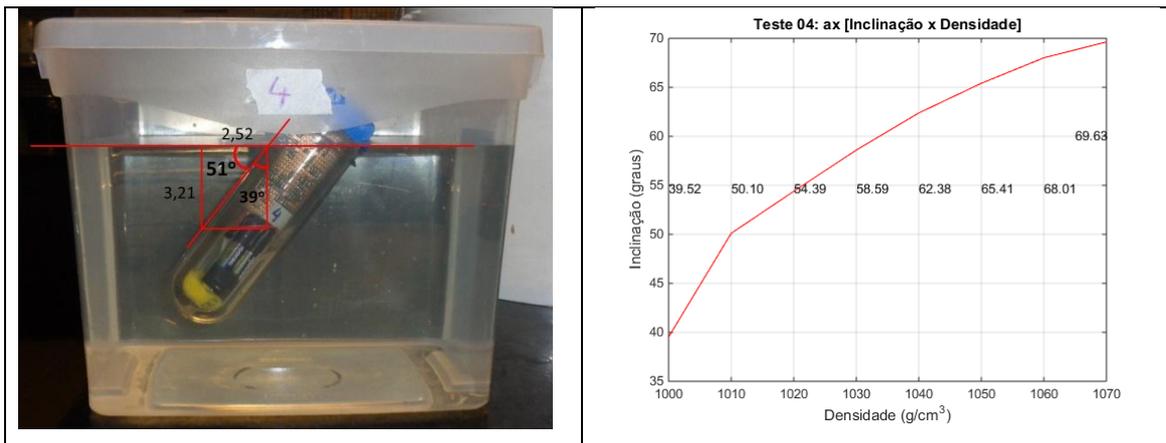


Figura C.12 - Teste 04, posição inicial do densímetro e a curva resultante.

A Figura C.12 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência R_{1.000} e a curva de inclinação obtida. A inclinação de 39° calculada pela foto ficou próxima à de 39,52° calculada com as leituras do densímetro.

C.6. Testes 05 e 06

Os testes 05 e 06 estão relacionados. O Teste 06 é a repetição do Teste 05, sem qualquer alteração no densímetro, apenas para ver se as medições permaneciam as mesmas. A montagem do densímetro empregado nestes ensaios foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 74 bolinhas de chumbo (29,9 gramas). O seu peso total do aparelho foi de 200 gramas.

Tabela C.7. Densímetro usado nos Teste 05 e 06

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
5	5	4	2	0	3	1-Panasonic	
91,7	23,7	4,7	0,6	23	3,1	51,7	29,9+0,5

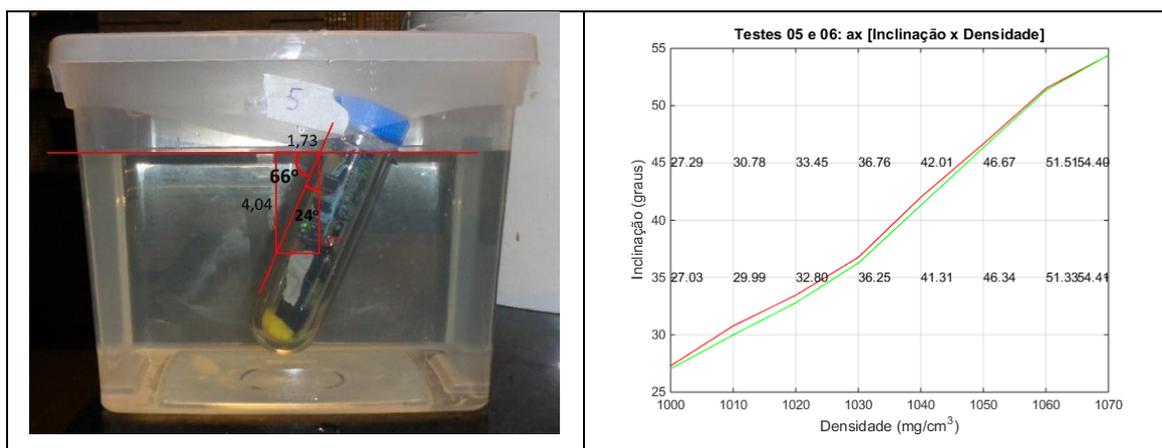


Figura C.13 - Testes 05 e 06, posição inicial do densímetro para o Teste 05 e as curvas de inclinação resultantes (Teste 05 = vermelha Teste 06 = verde).

A Figura C.13 mostra o densímetro usado nesses experimentos na posição inicial para a referência $R_{1.000}$ e as curvas de inclinação obtidas. A inclinação de 24° calculada pela foto ficou próxima às de $27,29^\circ$ e $27,03^\circ$ calculadas com as leituras do densímetro. A porção da direita da Figura C.13 apresenta as duas curvas de inclinação e se pode constatar que elas estão muito próximas, o que comprova a repetibilidade das medições para uma determinada montagem.

Do Teste 05 em diante, foram feitas fotos do densímetro imerso também em solução salina de 1.070 mg/cm^3 . Figura C.14 mostra que a inclinação medida na foto foi de 51° enquanto que o acelerômetro indicou $51,44^\circ$ e $51,52^\circ$.

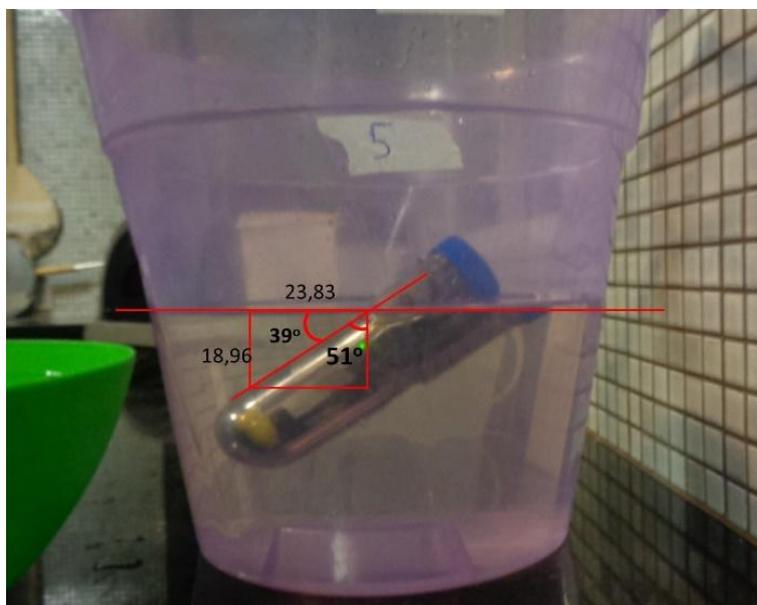


Figura C.14 - Teste 05, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.7. Teste 07

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 69 bolinhas de chumbo (23,6 gramas). O seu peso total do aparelho foi de 199,5 gramas.

Tabela C.8. Densímetro usado no Teste 07

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
5	5	4	2	0	3	1-Panasonic	
91,7	23,7	4,7	0,6	0	3,1	51,7	23,6+0,5

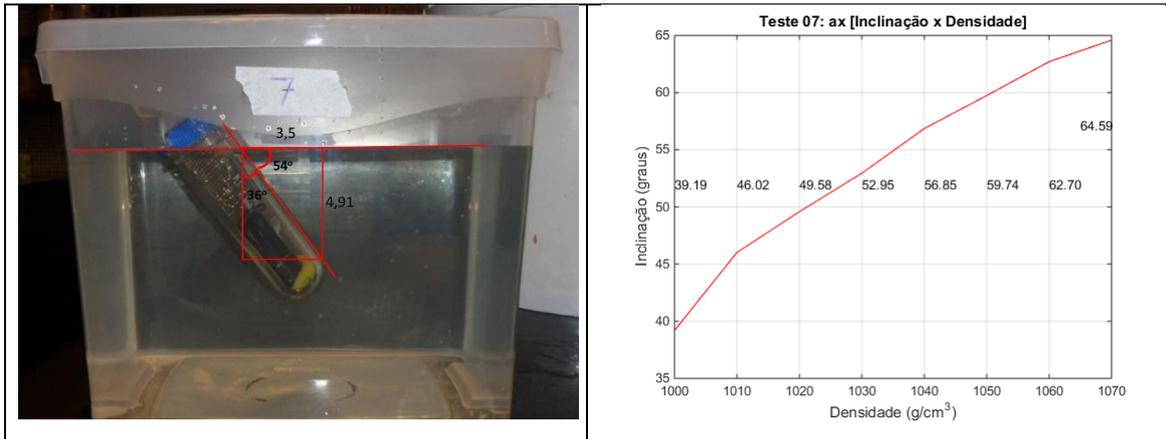


Figura C.15 - Teste 07, posição inicial do densímetro e a curva de inclinação.

A Figura C.15 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1.000}$ e a curva de inclinação obtida. A inclinação inicial de 36° calculada pela foto ficou próxima à de $39,19^\circ$ calculada com as leituras do densímetro. A Figura C.16, com a foto do densidade de 1.070 mg/cm^3 está um pouco ruim, entretanto, ela indica inclinação de 71° enquanto que o acelerômetro mediu $64,59^\circ$.

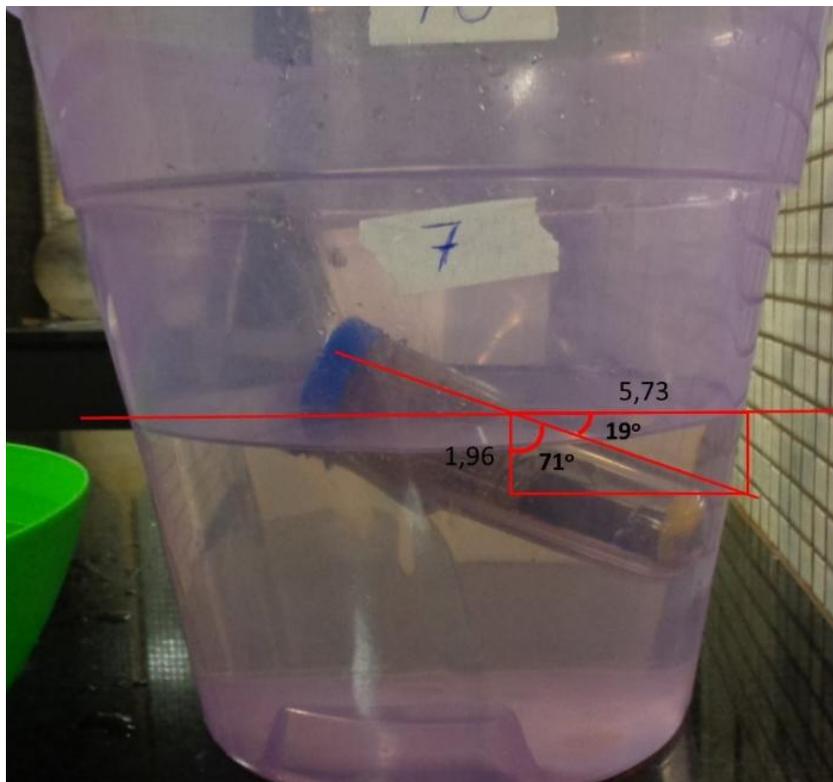


Figura C.16 - Teste 07, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.8. Teste 08

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 69 bolinhas de chumbo (23,6 gramas). O seu peso total do aparelho foi de 200,5 gramas.

Tabela C.9. Densímetro usado no Teste 08

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
5	5	4	2	1	3	1-Panasonic	
91,7	23,7	4,7	0,6	23	3,1	51,7	23,6+0,5

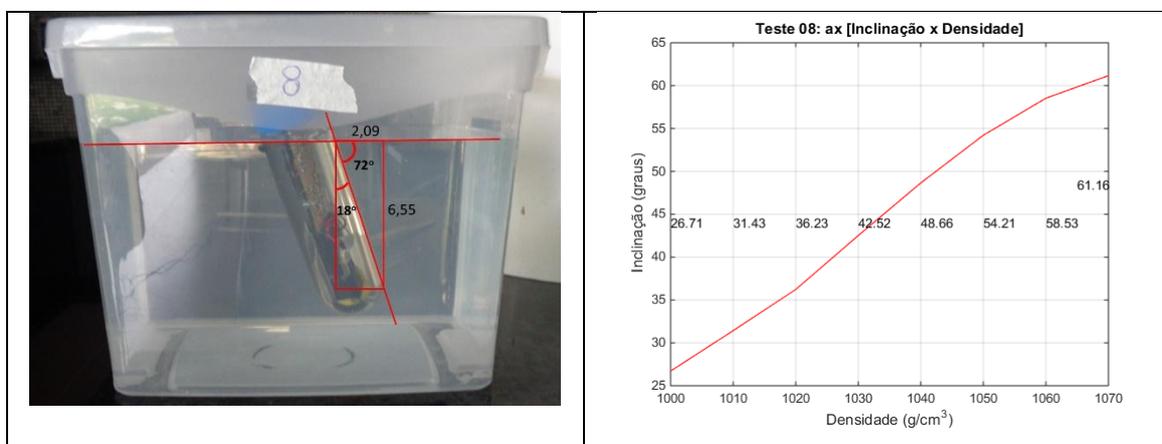


Figura C.17 - Teste 08, posição inicial do densímetro e a curva de inclinação.

A Figura C.17 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1.000}$ e a curva de inclinação obtida. A inclinação inicial de 18° calculada pela foto não ficou próxima à de $26,7^\circ$ calculada com as leituras do densímetro. A Figura C.18, com a foto do densidade de 1.070 mg/cm^3 está um pouco ruim, entretanto, ela indica inclinação de 64° enquanto que o acelerômetro mediu $61,16^\circ$.

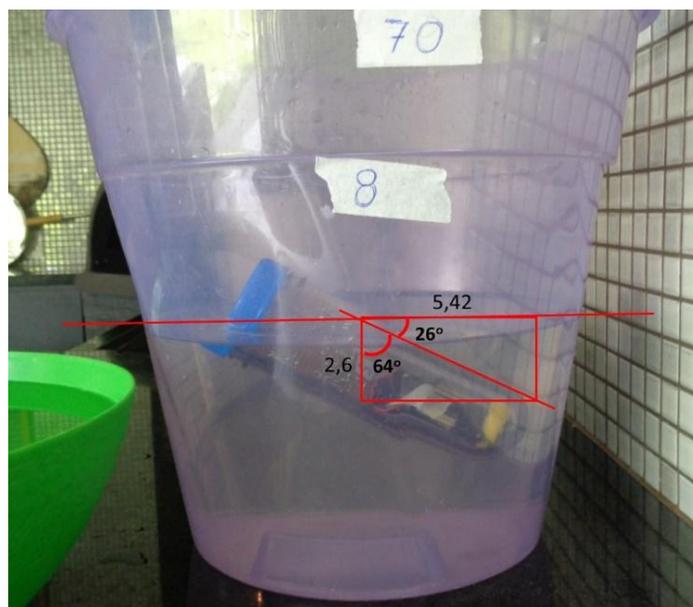


Figura C.18 - Teste 08, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.9. Teste 09

Nesse ensaio foram utilizados os mesmos componentes do Teste 08. Porém, o densímetro foi desmontado e montado novamente para que fosse verificada a influência da montagem na sua flutuabilidade. Nesta segunda montagem, a posição inicial ficou muito próxima da vertical o que demonstra grande dependência para com a montagem.

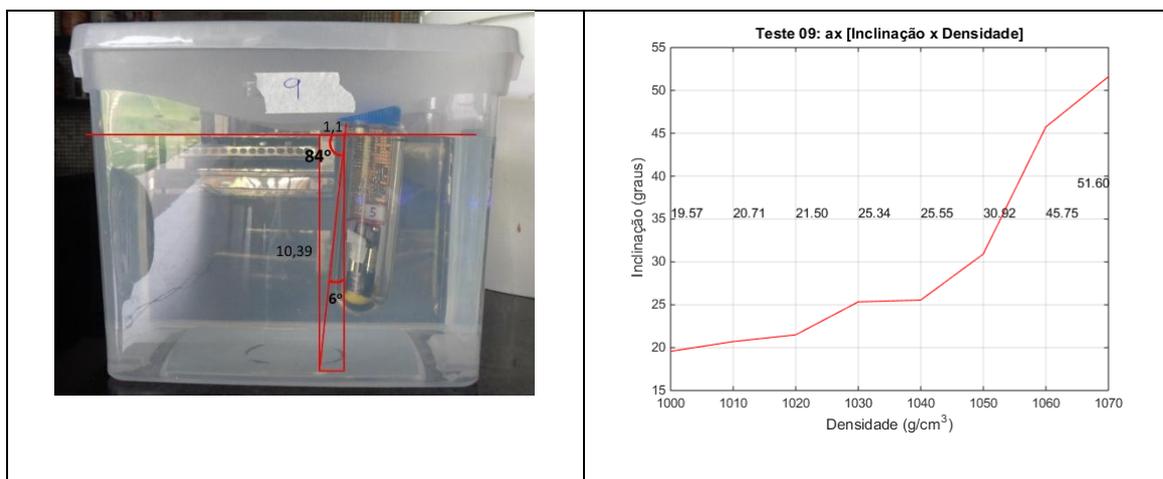


Figura C.19 - Teste 09, posição inicial do densímetro e a curva de inclinação.

A Figura C.19 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1.000}$ e a curva de inclinação obtida. É de se notar que ele ficou muito próximo da vertical, o que não parece ser bom pois a curva de inclinações ficou muito ruim. A inclinação inicial de 6° calculada pela foto ficou bem distante da $19,57^\circ$

calculada com as leituras do densímetro. Na Figura C.20, a foto do densidade de 1.070 mg/cm^3 indica inclinação de 55° enquanto que o acelerômetro $51,60^\circ$.

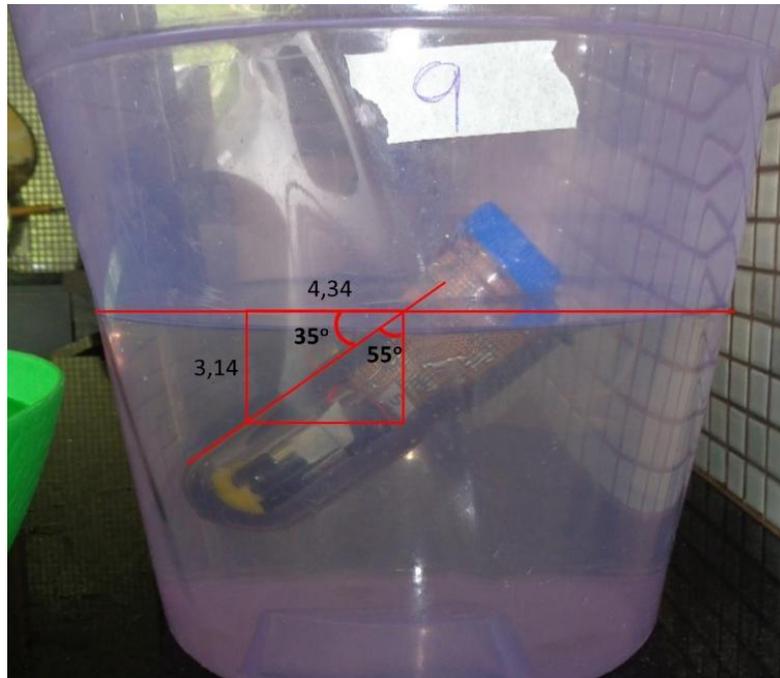


Figura C.20 - Teste 09, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.10. Teste 10

Nesse ensaio foram utilizados os mesmos componentes do Teste 08. Repetindo o que foi feito no Teste 09, o densímetro foi desmontado e montado novamente para que fosse verificada a influência da montagem na sua fluabilidade. Nesta montagem, a posição inicial ficou um pouco melhor.

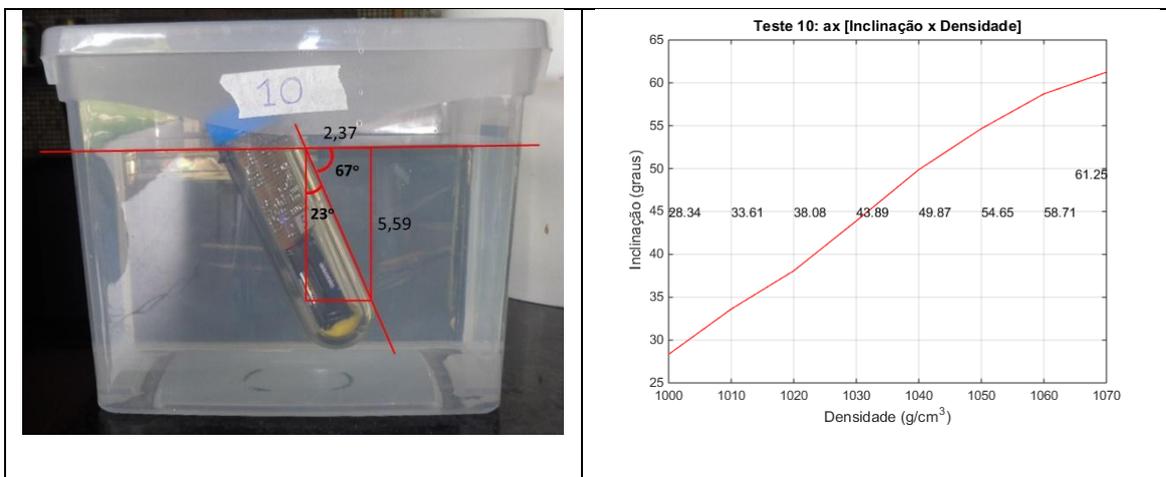


Figura C.21 - Teste 10, posição inicial do densímetro e a curva de inclinação.

A Figura C.21 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1.000}$ e a curva de inclinação obtida, que está muito boa para o propósito desejado (bastante linear). A inclinação inicial de 23° calculada pela foto ficou próxima da $28,34^\circ$ calculada com as leituras do densímetro. Na Figura C.20, a foto do densímetro com uma densidade de 1.070 mg/cm^3 indica inclinação de 62° , muito próxima da calculada pelo $61,25^\circ$.



Figura C.22 - Teste 10, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.11. Teste 11

A montagem do densímetro empregado nesse ensaio foi feita com os componentes apresentados na tabela abaixo. O lastro deste dispositivo foi obtido utilizando-se 64 bolinhas de chumbo (22,8 gramas). O seu peso total do aparelho foi de 198,9 gramas.

Tabela C.10. Densímetro usado no Teste 11

Tubo/Tampa	Placa	Nano	Flash	Rádio	Blue	Soq+Bat	Lastro
4	4	5	1	0	2	1-Duracell	
91,7	24,0	4,6	0,6	0	3,0	52,1	22,8+0,5

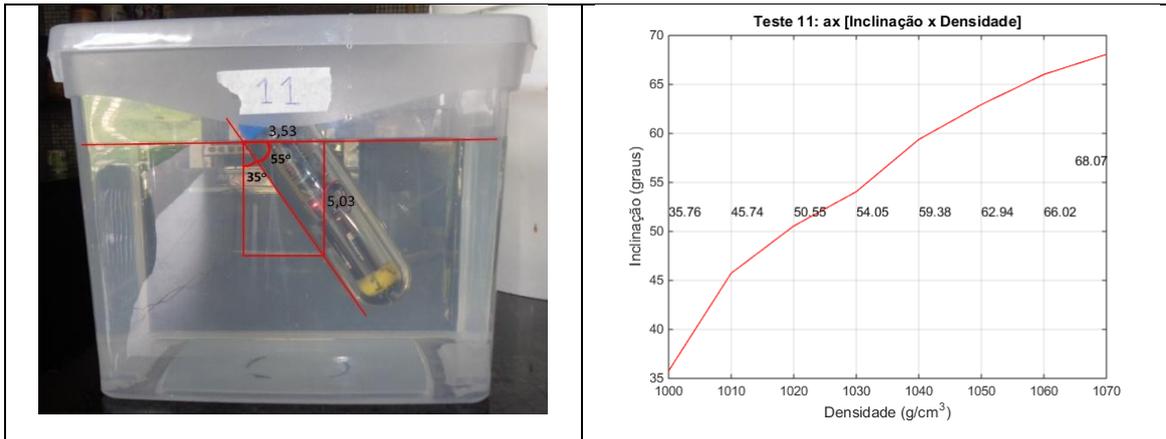


Figura C.23 - Teste 11, posição inicial do densímetro e a curva de inclinação.

A Figura C.23 mostra o densímetro usado nesse experimento na posição inicial para a referência $R_{1,000}$ e a curva de inclinação obtida, que não está muito linear. A inclinação inicial de 35° calculada pela foto ficou muito próxima da $35,76^\circ$ calculada com as leituras do densímetro. Na Figura C.24, a foto na densidade de 1.070 mg/cm^3 indica inclinação de 70° , muito próxima da calculada pelo $68,07^\circ$.

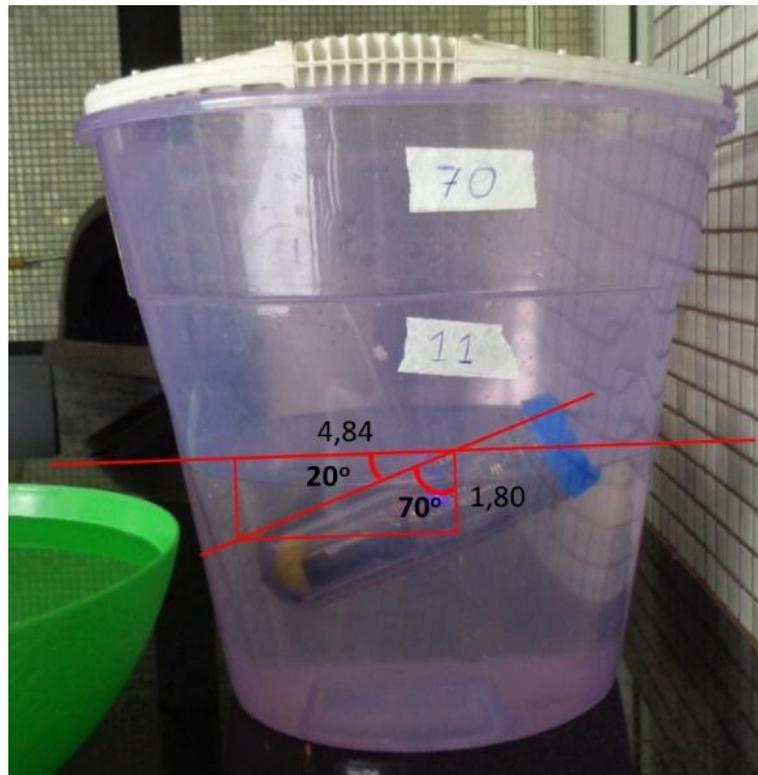


Figura C.24 - Teste 11, inclinação na densidade 1.070 mg/cm^3 .

C.12. Curvas de Inclinação versus Densidade

A Figura C.25 apresenta os 11 gráficos de inclinação (graus) versus densidade. As imagens estão pequenas, porém a intenção é classificar as curvas e por isso é importante que todas estejam em uma única página.

O que se constata de pronto é que as curvas dos Testes 02 e 09 apresentam grandes irregularidades e devem ser descartadas.

Na figura citada, notam-se dois tipos de curvas: as convexas e as côncavas ou quase lineares. Parece haver uma forte relação entre a inclinação em água pura e o formato da curva. A tabela abaixo relaciona esses dois parâmetros.

Tabela C.11. Duas classes de curvas

Tipo de curva	Inclinação em água pura: R_{1000}
Convexa (1, 3, 4, 7 e 11)	35° , 45° , 39° , 39° e 35°
Côncava ou quase linear (5, 6, 8 e 10)	27° , 27° , 26° e 28°

A Figura C.26 apresenta as curvas de inclinação para esses dois casos. As duas curvas na parte superior correspondem às curvas convexas. A parte da direita apresenta as mesmas curvas, mas descontado o valor de referência R_{1000} , por isso todas elas partem do valor zero. As duas curvas na parte inferior correspondem às curvas côncavas ou quase lineares.

Analisando as curvas da Figura C.26 é de se notar que as chamadas convexas apresentam uma dispersão maior. Já as côncavas parecem ter um comportamento mais próximo. Entretanto, vale lembrar que as curvas 05 e 06 devem ser semelhantes pois correspondem à mesma montagem.

A análise da Figura C.26 demonstra que ainda há muita variabilidade no comportamento do densímetro. Os testes comprovaram que a disposição interna dos componentes tem uma influência muito grande no seu comportamento. Da análise das duas classes de curvas, percebe-se que se a inclinação do densímetro em água comum for entre 20 ou 30 graus, a curva da inclinação se aproxima do caso linear.

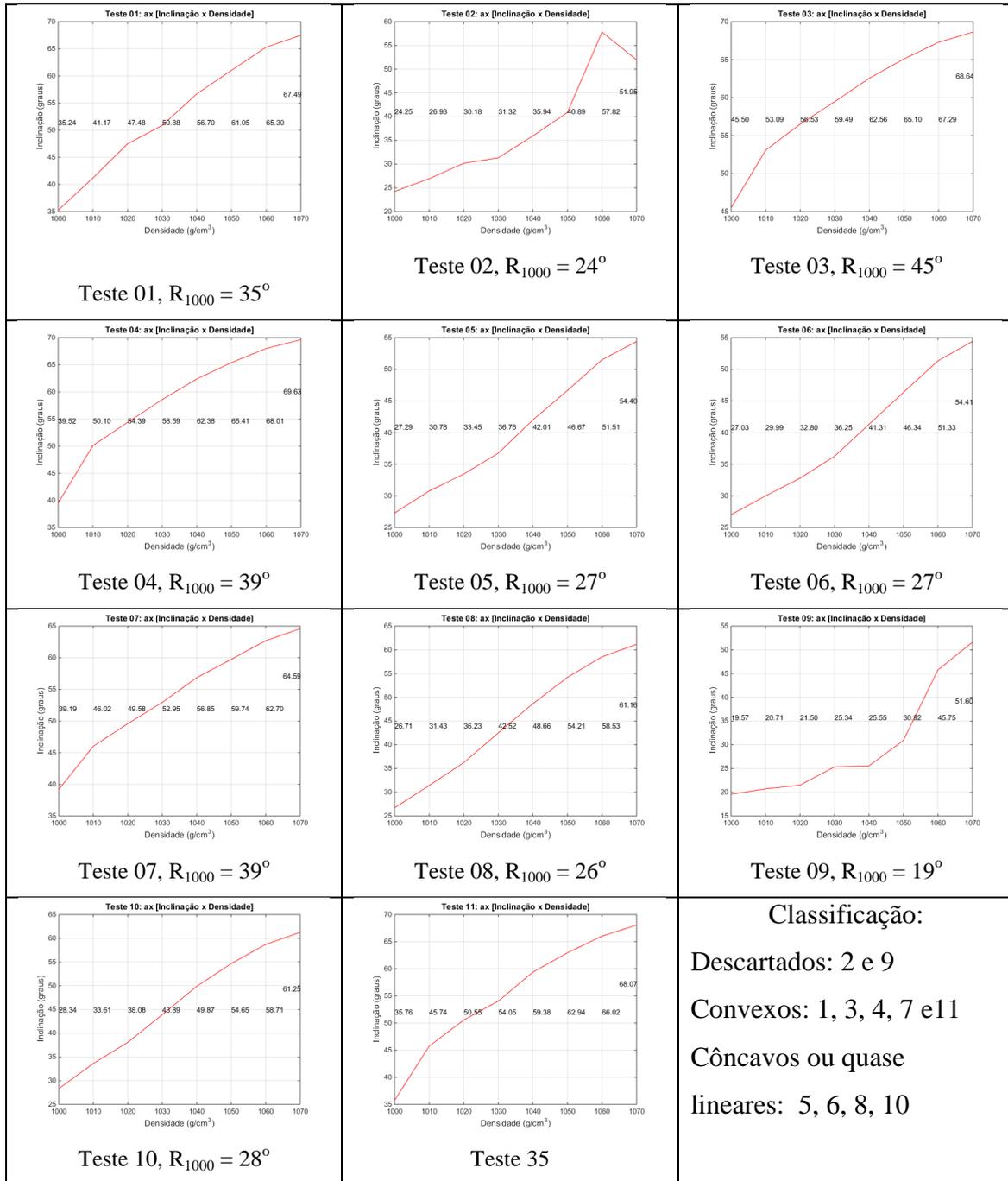


Figura C.25 – Curvas de inclinação (graus) versus densidade, para os 11 testes realizados.

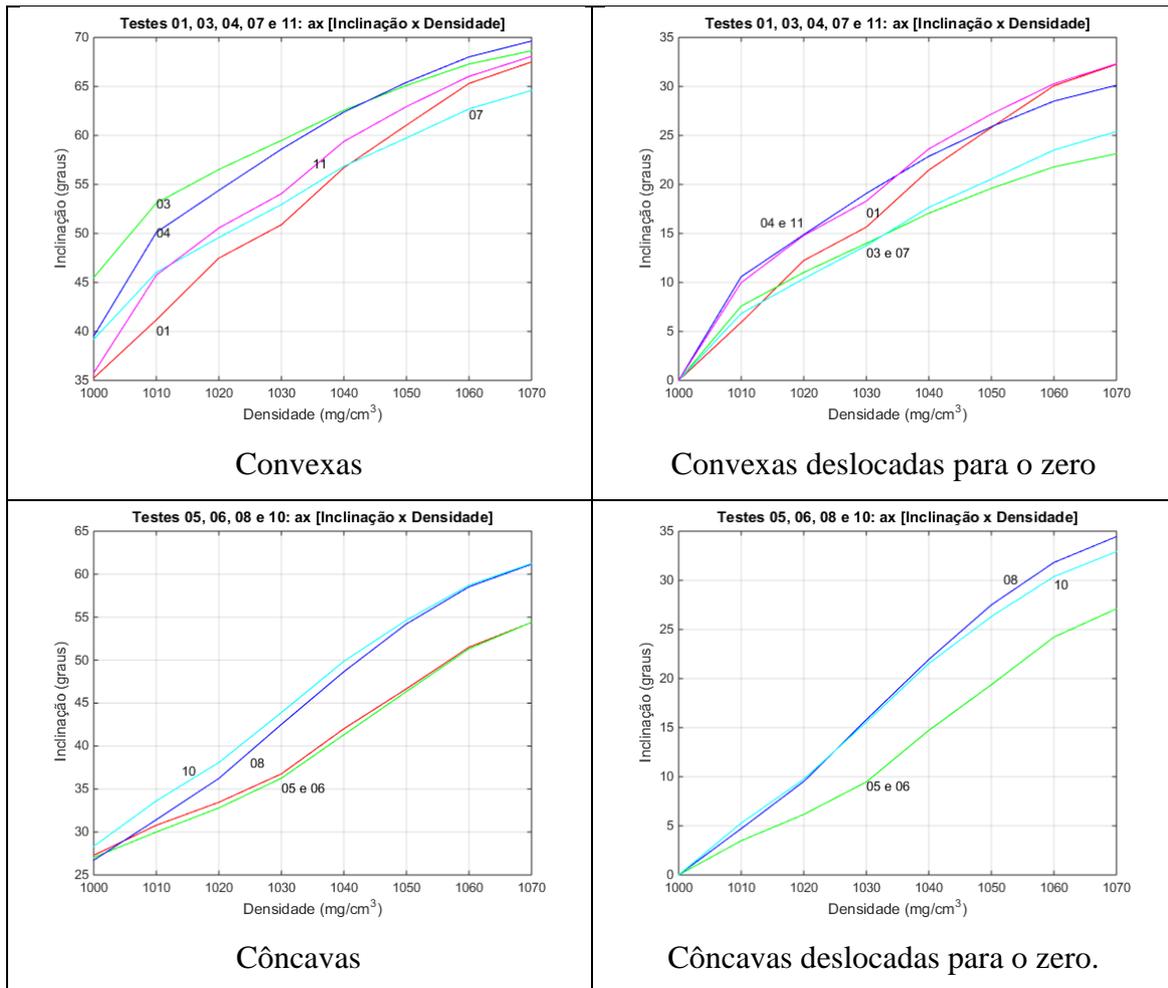


Figura C.26 – Curvas de inclinação (graus) versus densidade. Na metade superior estão os casos convexas e na metade porção inferior, os casos côncavos.

C.13. Conclusões

Os testes realizados permitem responder às principais perguntas propostas na introdução.

P1) Existe um valor ideal (inclinação inicial) para a $R_{1.000}$?

Sim, o caso côncavo parece ser o ideal, pois se aproxima do caso linear, para tanto a inclinação em água comum deve ficar entre 20 e 30 graus.

P2) É possível estimar as demais medidas conhecendo-se apenas $R_{1.000}$?

Sim, pelo que comprovou com os Testes 5 e 6, há repetibilidade no comportamento do densímetro. Assim, se os elementos internos forem devidamente fixados, a curva deverá ser sempre a mesma.

P3) Quanto $R_{1.000}$ influencia nas demais medidas?

A densidade de referência, denominada de $R_{1.000}$ tem grande influência no formato das curvas. Se a inclinação correspondente a $R_{1.000}$ estiver acima de 30 graus, as curvas afastar-se-ão do caso linear.

P4) É necessária a adição de uma segunda referência?

Pelo que se constatou nos testes, parece ser desnecessário uma segunda referência. Mais importante que essa segunda referência é conseguir a fixação dos componentes internos e regulagem do lastro de forma a conseguir inclinação entre 20 e 30 graus em água comum.

P5) Quanto variam as medidas a cada nova montagem do densímetro?

O comportamento do densímetro varia muito com a distribuição interna dos componentes. Em especial a bateria merece bastante atenção. Constatou-se que duas montagens com os mesmos componentes levam a resultados completamente distintos, como foi comprovado com os Testes 8 e 9.

P6) A métrica para estimar a agitação do líquido está sendo útil?

A métrica para estimar a agitação do líquido é bastante efetiva e foi fundamental para determinar o fim da agitação em todos os testes. Ela também indica de forma confiável a qualidade de uma medida.

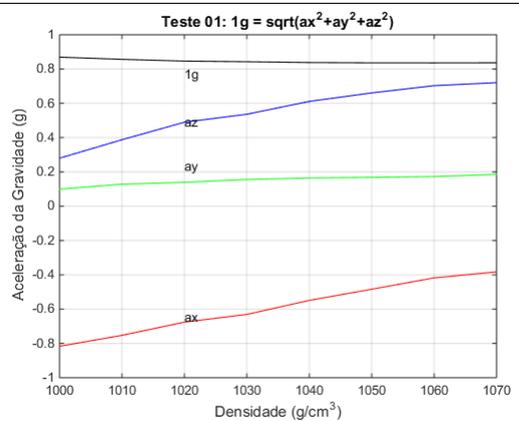
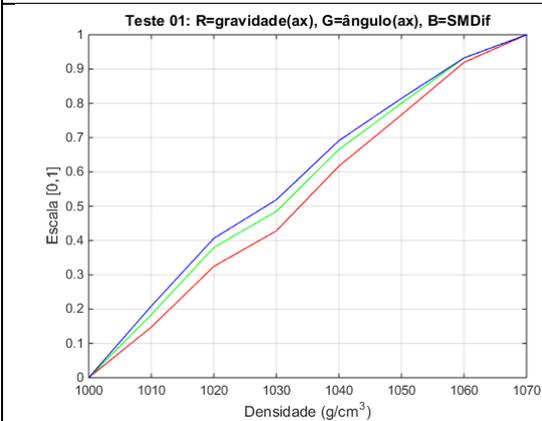
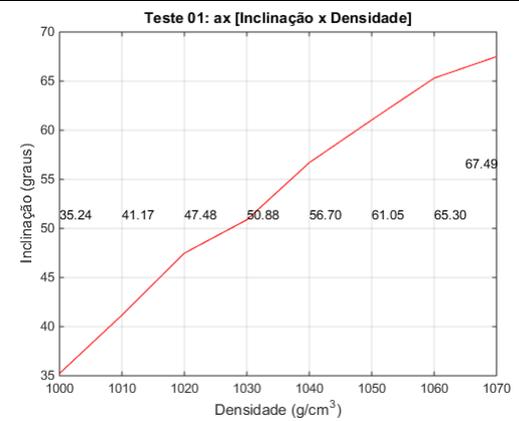
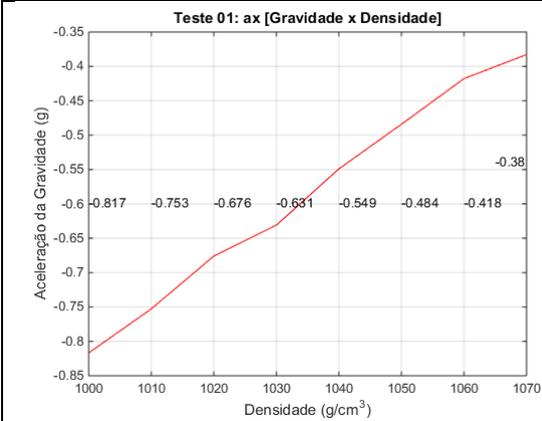
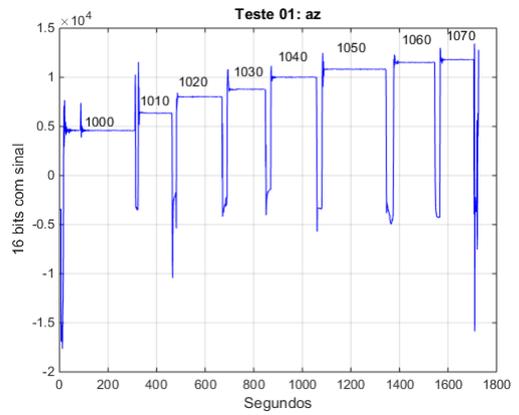
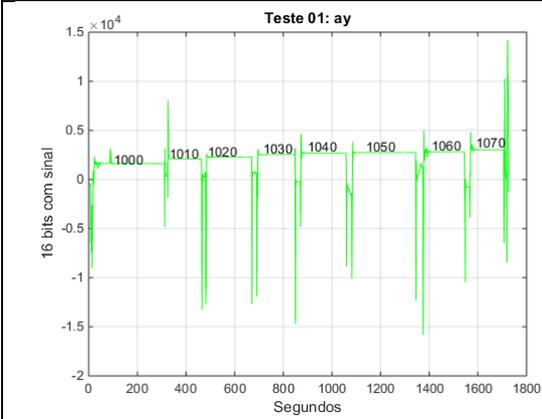
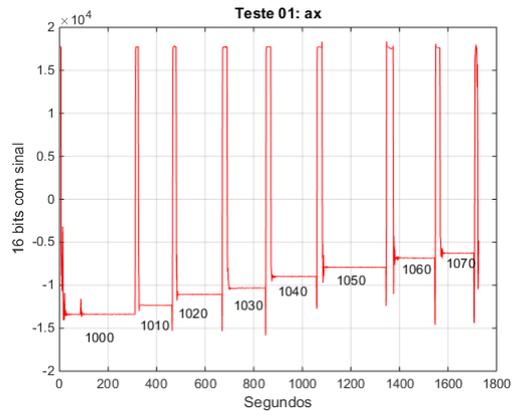
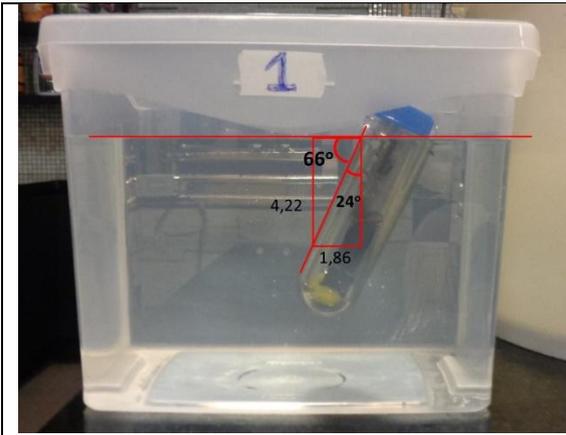
P7) Qual a melhor métrica para estimar a densidade:

As curvas apresentadas foram calculadas para indicar a inclinação em graus. Elas são interessantes pois têm um forte apelo com a realidade. Entretanto, pelo que se constatou até aqui, as curvas feitas em graus, ou em aceleração da gravidade ou ainda usando o SMDif (Soma dos Módulos das Diferenças) acabam ficando semelhantes e pode-se dizer que podem ser usadas de forma indistinta. Nas figuras apresentadas a seguir é

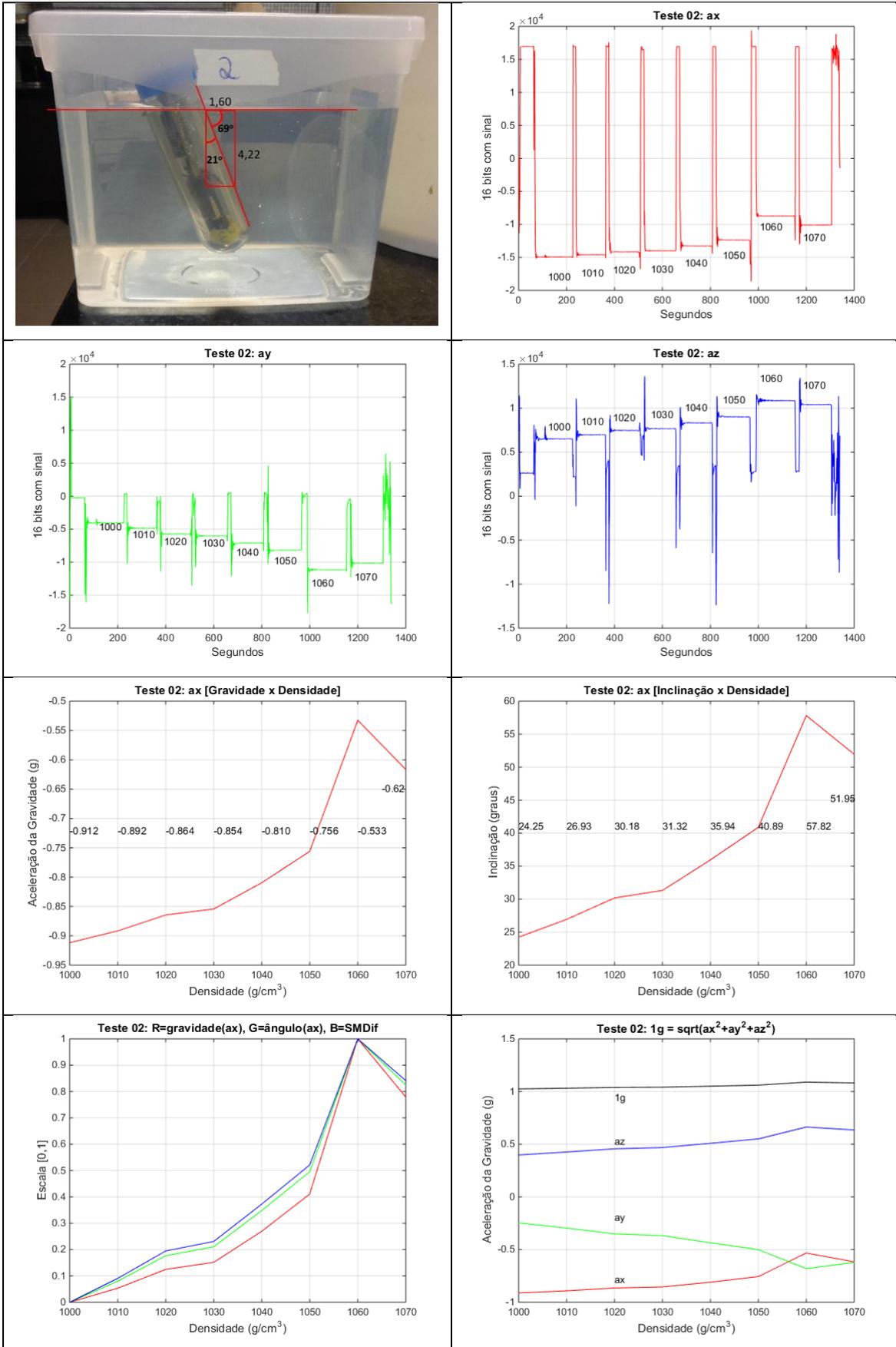
possível ver o caso das três curvas em uma única figura, onde se constam suas semelhanças.

Para finalizar, nas páginas seguintes são apresentadas as principais curvas de cada teste. É uma grande quantidade de curvas. Entretanto, se preferiu mantê-las para tornar completo este documento.

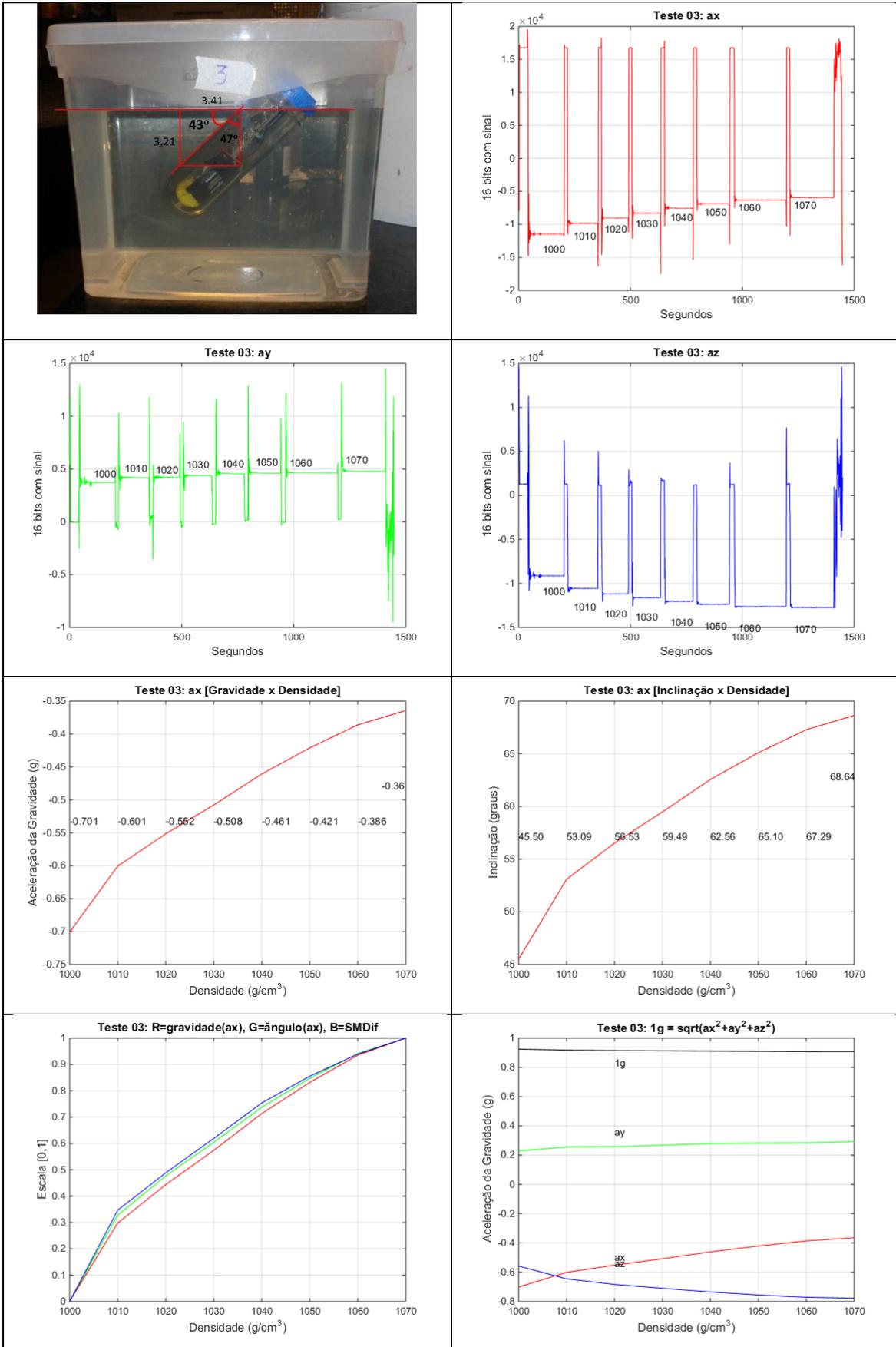
TESTE 01



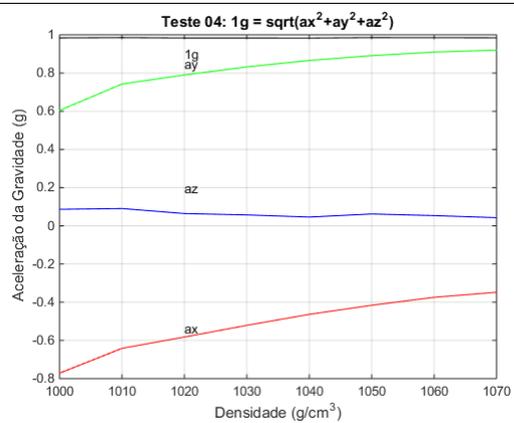
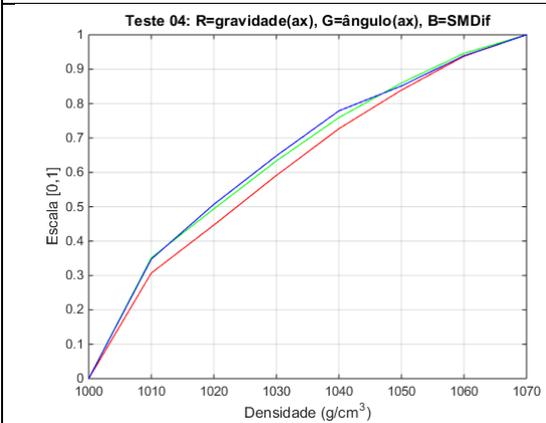
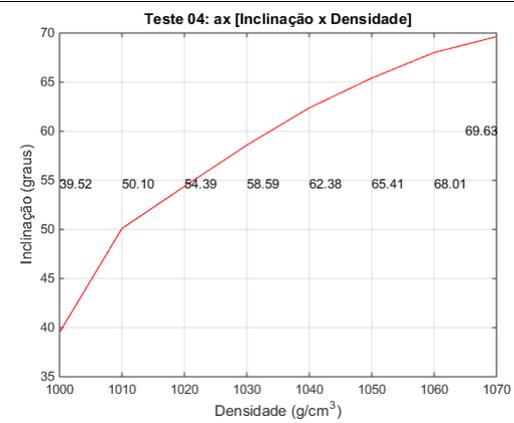
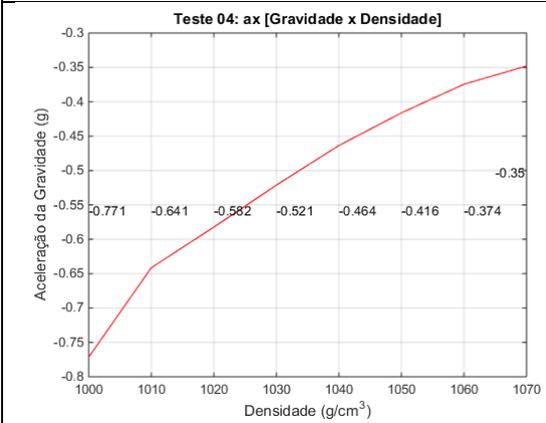
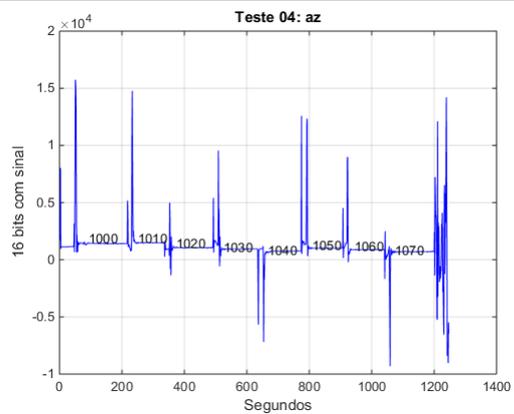
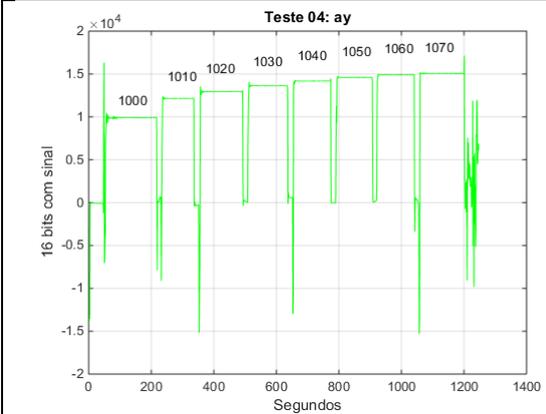
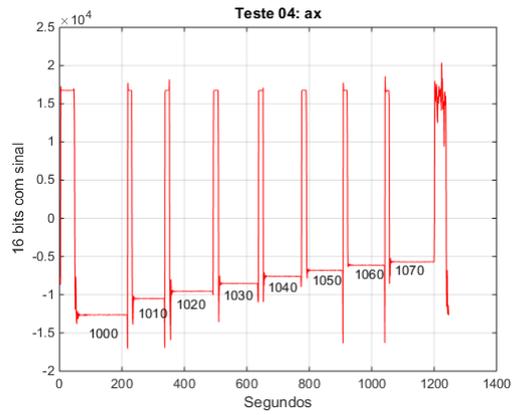
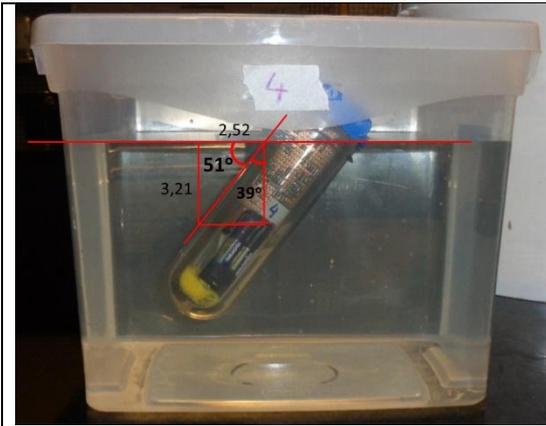
TESTE 02



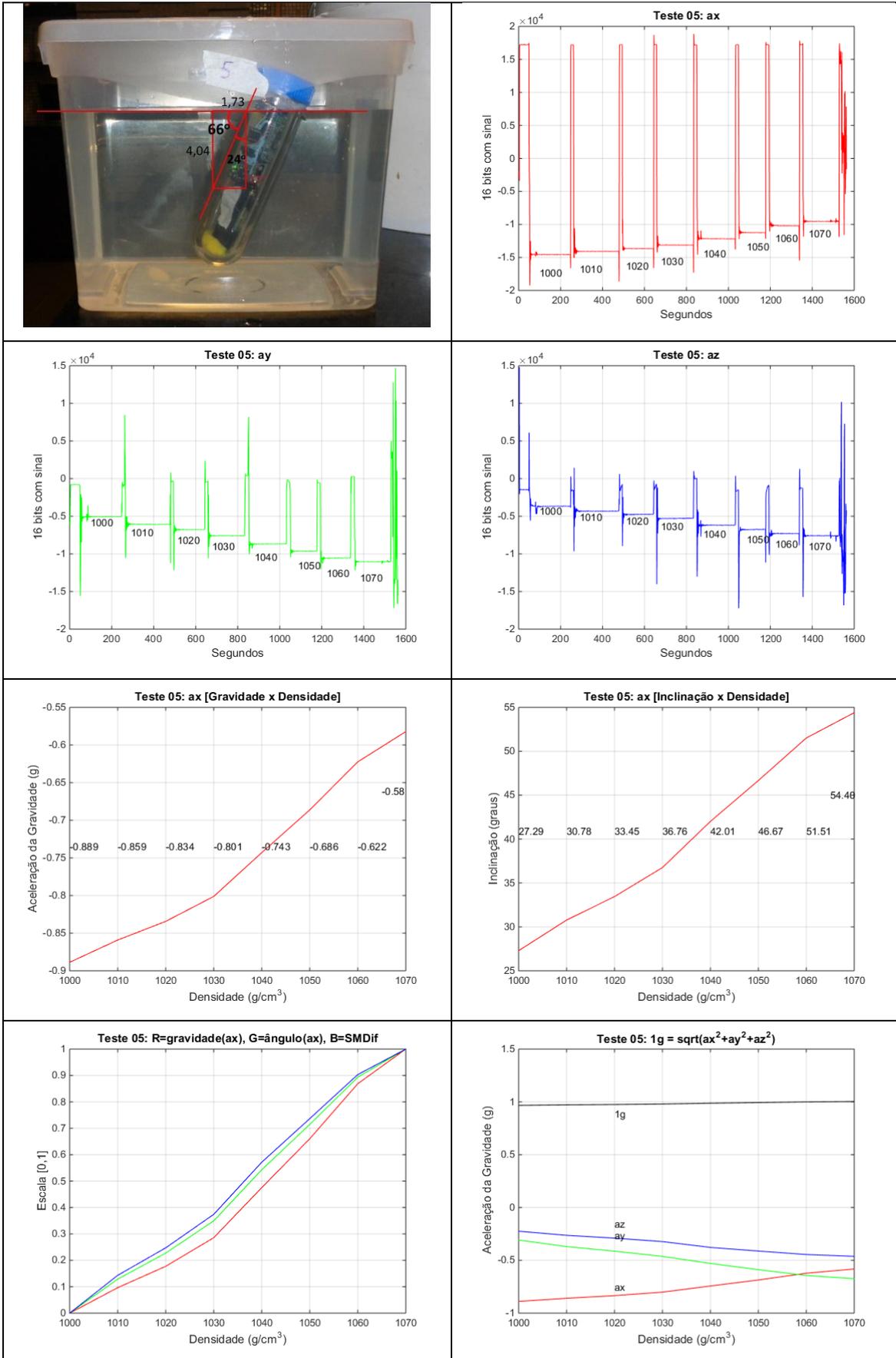
TESTE 03



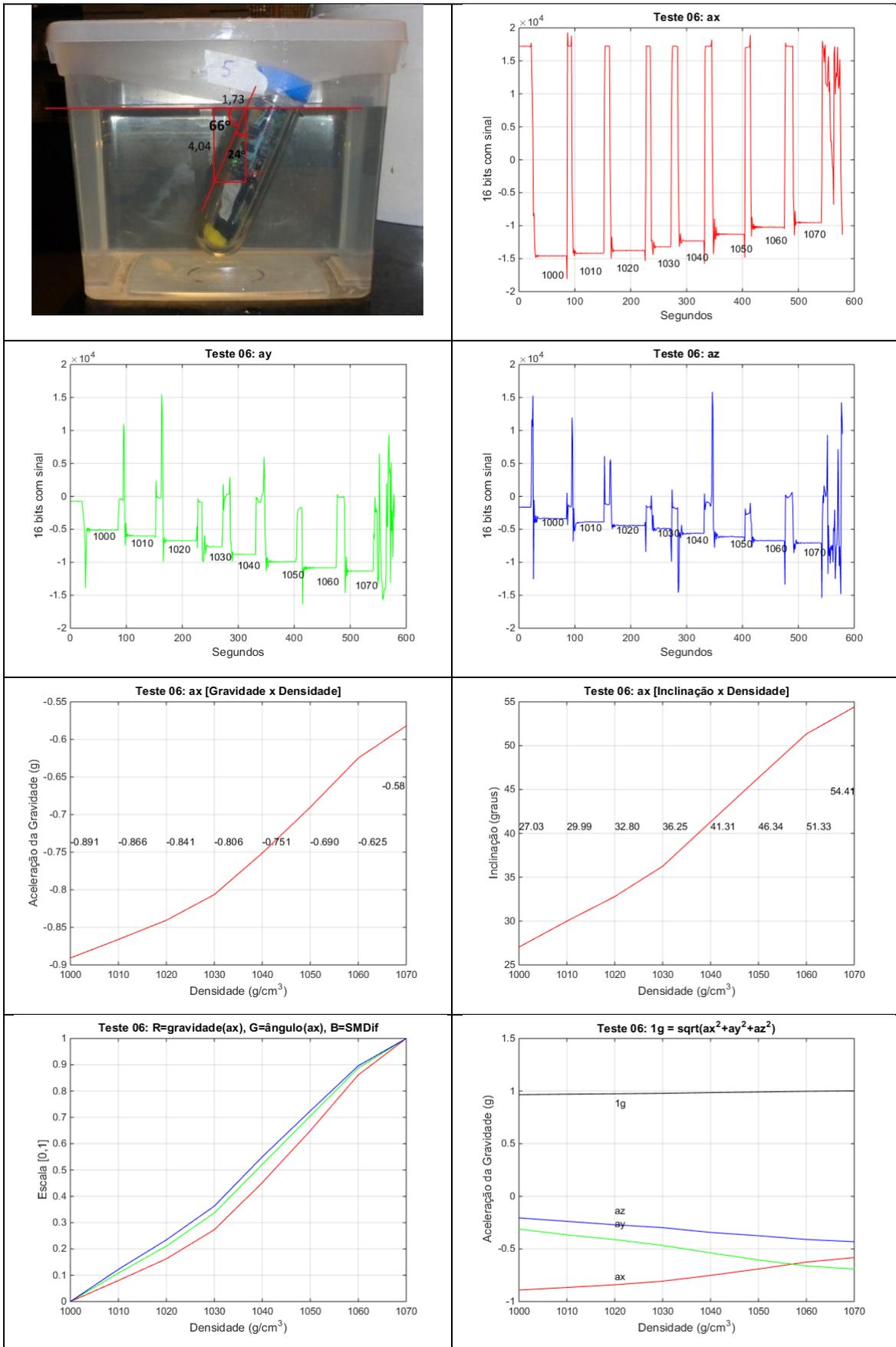
TESTE 04



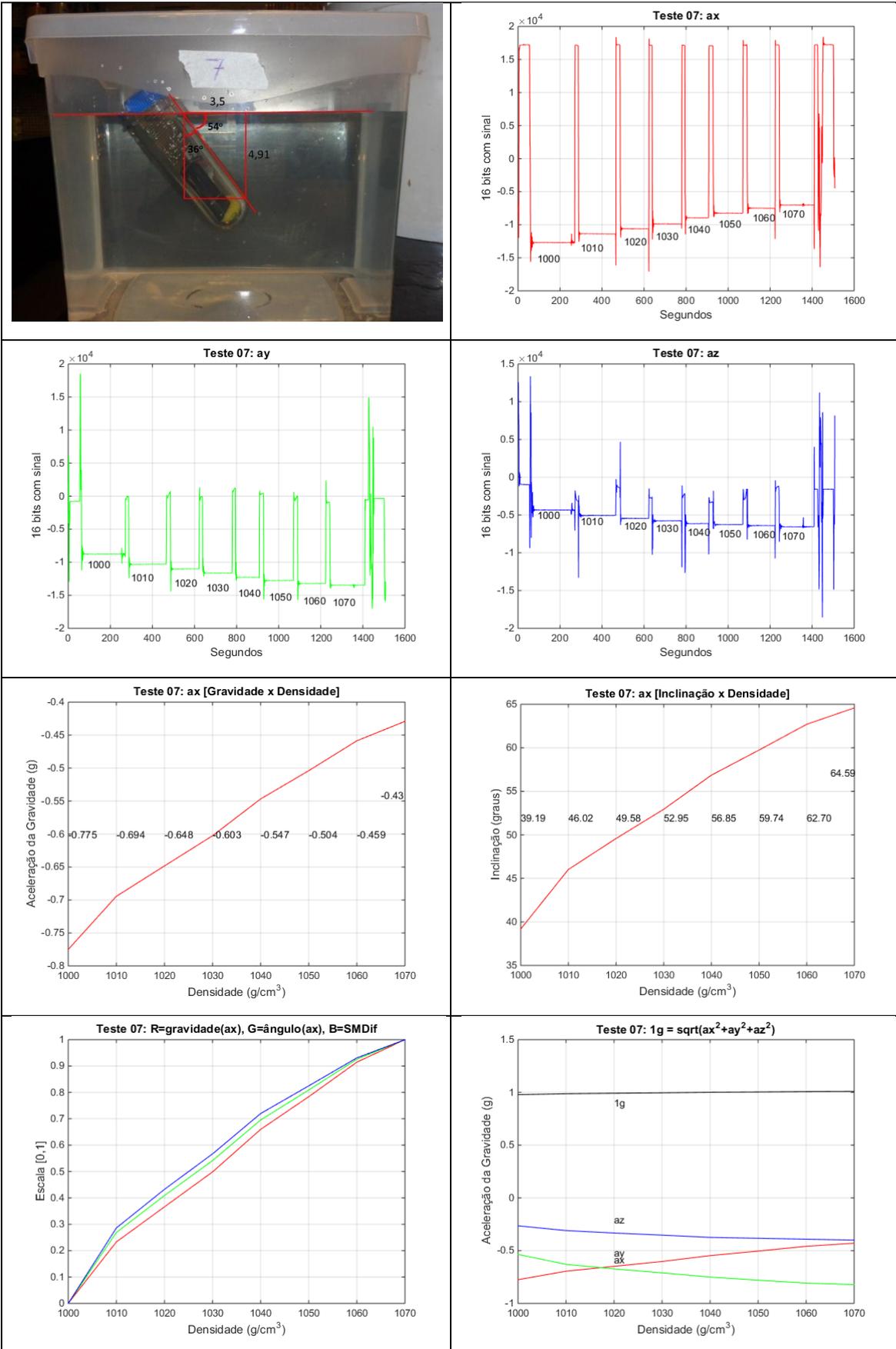
TESTE 05



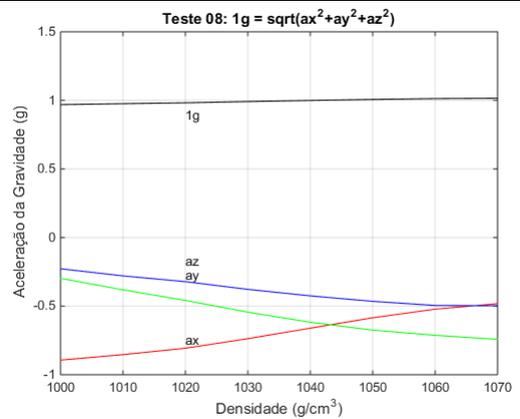
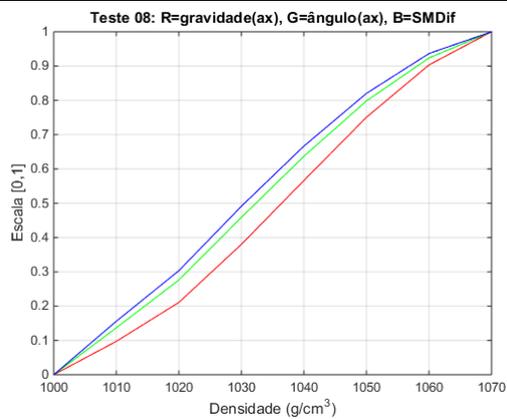
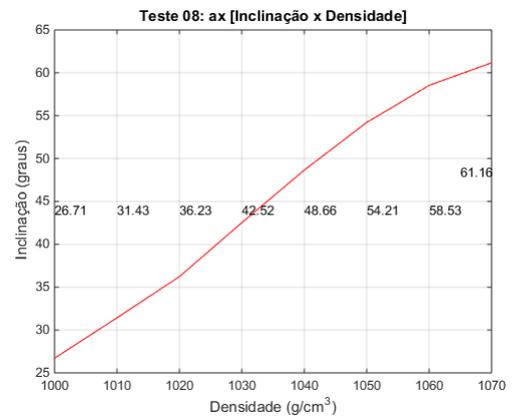
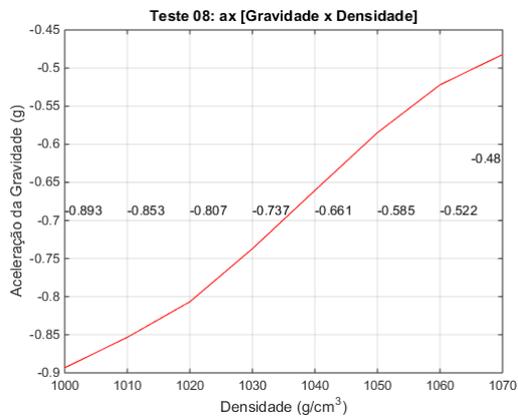
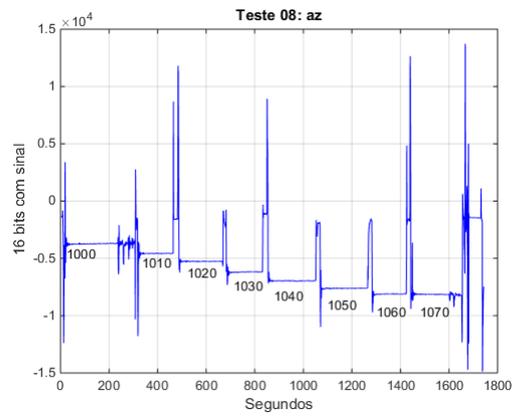
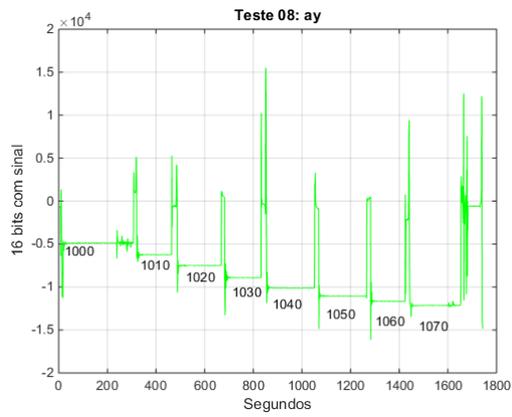
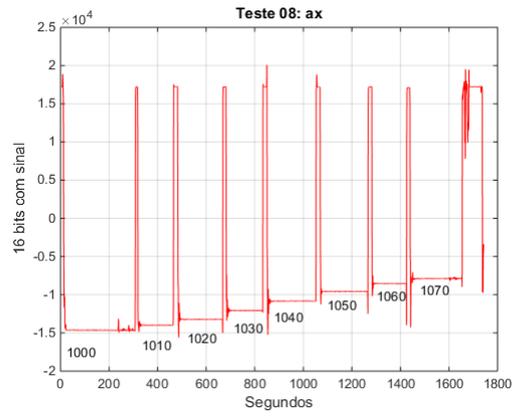
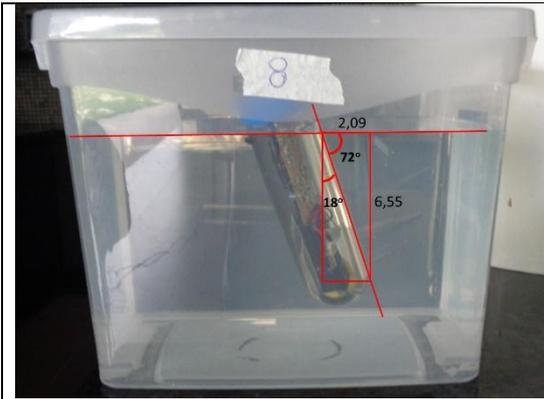
TESTE 06 – Repetição do Teste 05



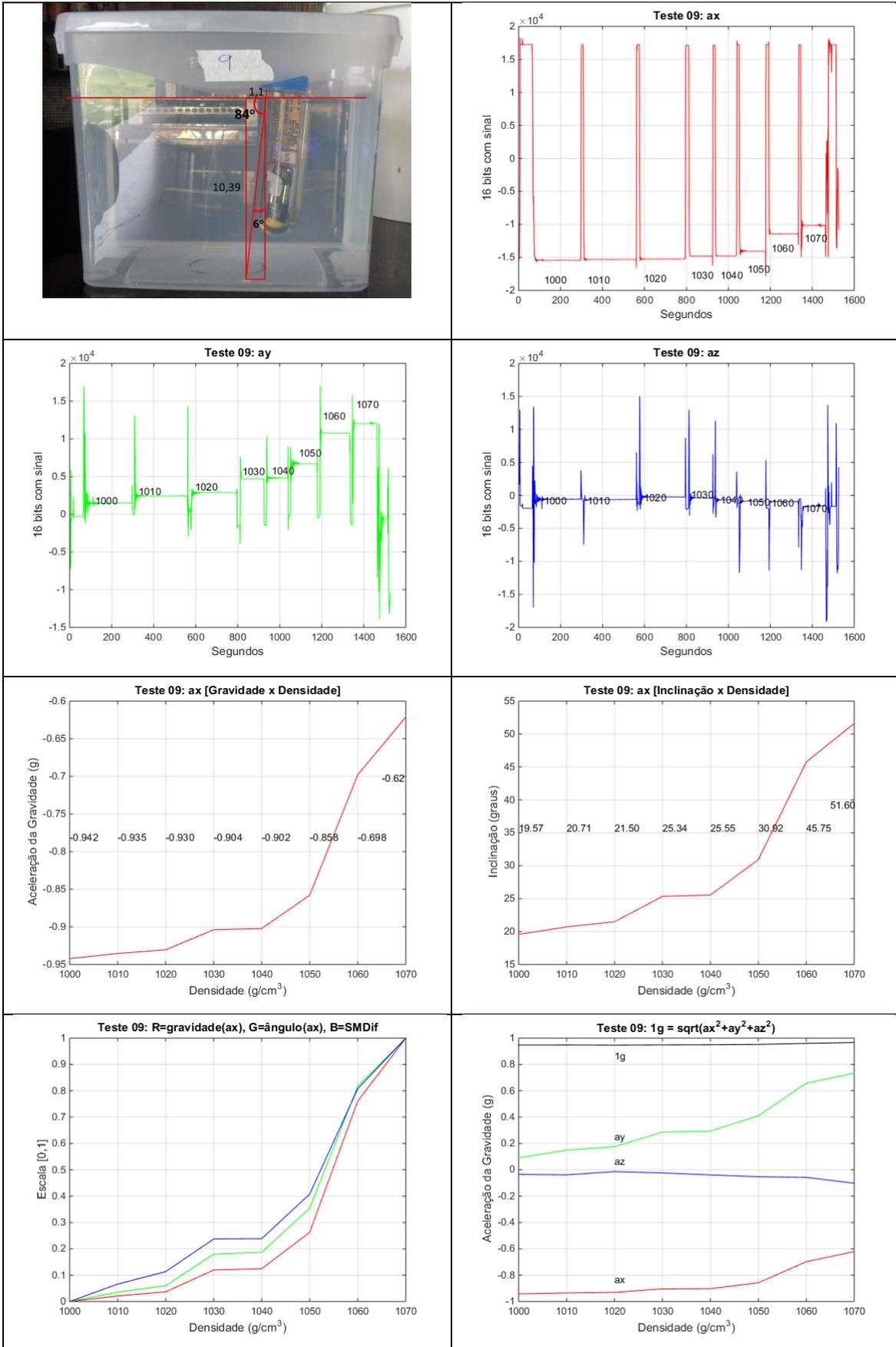
TESTE 07



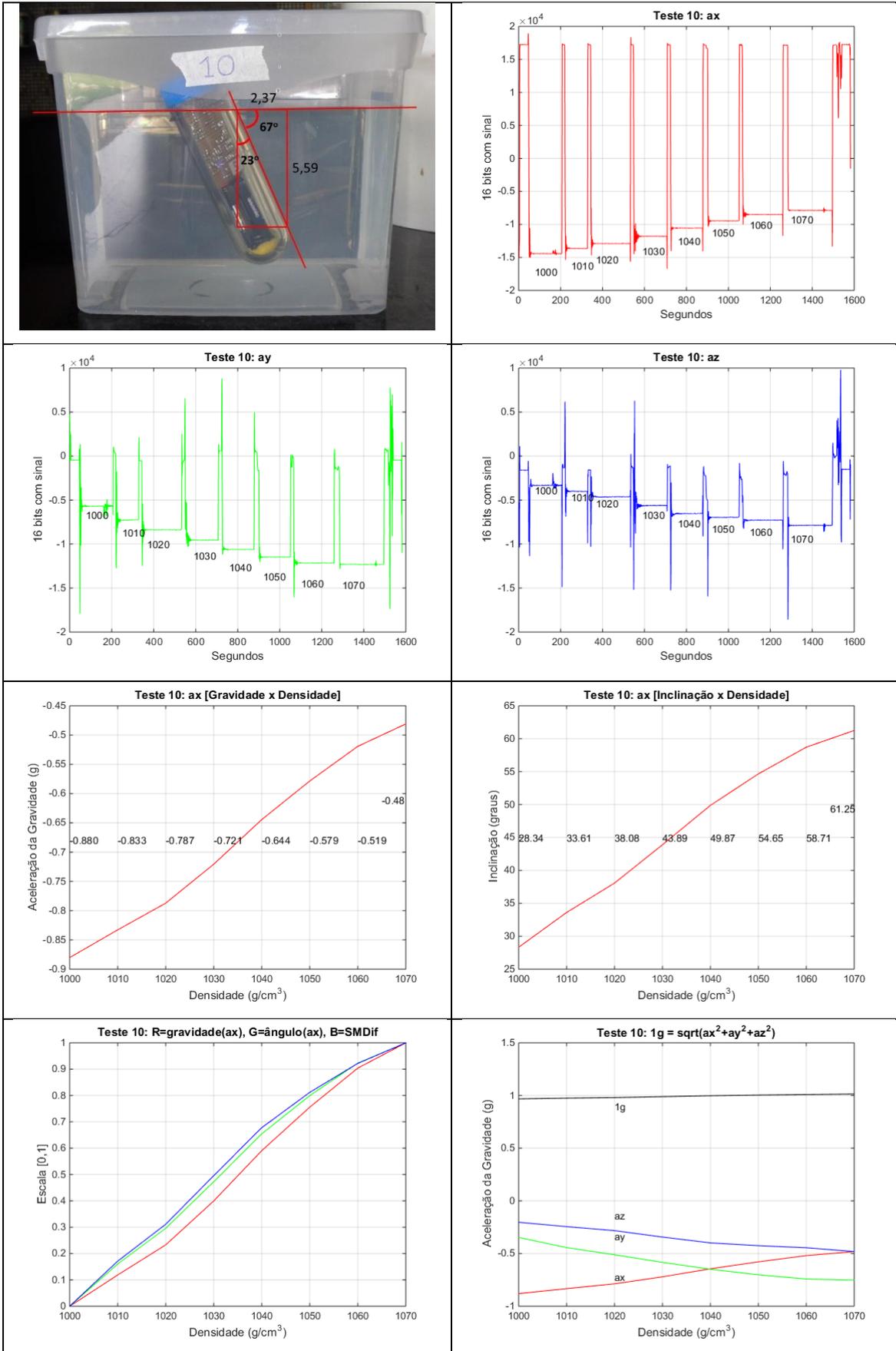
TESTE 08



TESTE 09



TESTE 10



TESTE 11

