UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGÉRIO VICTORIO FERNANDES BALLESTRIN

REDES DE SENSORES SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TRANSPORTE DE CARGAS CRÍTICAS

Porto Alegre
2016

ROGÉRIO VICTORIO FERNANDES BALLESTRIN

REDES DE SENSORES SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TRANSPORTE DE CARGAS CRÍTICAS

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre
2016

ROGÉRIO VICTORIO FERNANDES BALLESTRIN

REDES DE SENSORES SEM FIO DE BAIXO CUSTO PARA CARACTERIZAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM TRANSPORTE DE CARGAS CRÍTICAS

Este Projeto foi julgado adequado para a obtenção dos créditos da Disciplina Projeto de Diplomação do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____
Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Müller, UERGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Tiago Roberto Balen, UFRGS
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Chefe do DELET: _____
Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre, dezembro de 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, que com muito carinho, dedicação e apoio, me acompanhou por todos os passos dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cleia Fernandes e Rogério Ballestrin, que me ensinaram tudo aquilo que uma universidade não pode ensinar.

À minha namorada, Tatiane Teichmann, pelo apoio incondicional e por aceitar a minha ausência em diversos momentos.

Aos professores Valner Brusamarello e Ivan Müller, pelos conhecimentos repassados, que foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Instor, por ter cedido o equipamento utilizado nos ensaios deste trabalho, por ter me ensinado como um engenheiro deve agir em diversos momentos, por ter transformado um estudante em um profissional.

Aos amigos Fernando Ferreira e Giovani Prado, por suas contribuições neste trabalho. Aos colegas que viraram amigos, Guilherme Rosa e Rafael Paz, que me fizeram seguir em frente nos diversos momentos difíceis do curso.

Por fim, ao Departamento de Engenharia Elétrica, por nunca ter diminuído seu nível de exigência, me ensinou a persistir nos meus objetivos.

RESUMO

Neste trabalho foi proposto, desenvolvido e testado um método de caracterização e análise de vibração em tempo real que pode ser aplicado no transporte de cargas sensíveis. Para isso, utilizou-se de nós sensores de uma rede de sensores sem fio que realizavam a aquisição dos dados e calculavam a densidade espectral de potencia (*power spectral densitiy*, PSD). Desta forma, ao transmitir apenas o resultado dos dois pontos mais significativos do PSD para o nó de controle, houve uma redução de 93,4% da quantidade de dados transmitidos, permitindo aumentar o tempo de aquisição dos dados sem recarga da bateria. Outra forma de reduzir o consumo de energia foi a utilização de interrupções por atividade existentes no acelerômetro para acordar o processador, permitindo assim manter o processador em um estado de pouco consumo de energia na maior parte do tempo. Para validar o sistema proposto, foram realizados diversos experimentos utilizando um sistema comercial, onde foi obtido um erro médio relativo na amplitude do PSD de 41% para a frequência de maior energia e 45% para a segunda frequência analisada. Os valores de erro obtidos, embora altos, não invalidam o sistema proposto, uma vez que foi obtido um erro médio absoluto menor que a resolução na identificação das frequências onde ocorreram estes picos. Algumas alterações podem ser feitas com possibilidade de melhoria do sistema proposto, como por exemplo realizar uma calibração do sistema em vez de utilizar os valores informados pelo fabricante e desacoplar mecanicamente o acelerômetro da placa do nó sensor.

Palavras-chave: Vibração, Rede de Sensores Sem Fio, Densidade Espectral de Potência.

ABSTRACT

In this work, a method for characterization and analysis of vibration at real time that can be applied in the transport of sensitive loads was proposed, developed and tested. For that, was used sensors nodes from a wireless sensor network that performed the data acquisition and calculated the power spectral density (PSD). Thus, when transmitting only the result of the two most significant points of the PSD to the control node, there was a reduction of 93.4 % of the amount of data transmitted, allowing to increase the data acquisition time without battery recharging. Another way to reduce power consumption was to use activity interrupts on the accelerometer to wake the processor, keeping the processor in a low power state most of the time. To validate the proposed system, several experiments were performed using a commercial system, where the mean percentage error obtained for PSD amplitude was 41 % for the highest energy frequency and 45 % for the second analyzed frequency. It was high values, but they do not invalidate the proposed system, since the mean absolute error was smaller than the resolution in the identification of the frequencies where these peaks occurred. Some changes can be made with the possibility of improving the proposed system, such as performing a system calibration instead of using the values reported by the manufacturer and detaching the accelerometer from the sensor node board.

Keywords: Vibration, Wireless Sensor Network, Power Spectral Density.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 9

LISTA DE TABELAS 10

LISTA DE ABREVIATURAS 11

LISTA DE SíMBOLOS 12

1 INTRODUÇÃO 13

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
2.1 Redes de Sensores Sem Fio 15
2.1.1 Protocolos I2C e SPI 16
2.1.2 Acelerometria 17
2.2 Algoritmos e Análise de Dados 19
2.2.1 Série e Transformada de Fourier 19
2.2.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Algoritmo de Cooley-Tukey . . 20
2.2.3 Densidade Espectral de Potência 20
2.2.4 Critério de Chauvenet 20

3 REVISÃO DA LITERATURA 22
3.1 Sistemas Instrumentados Portáteis e Acelerometria 22
3.2 Aplicações para agricultura de Precisão 23
3.3 Aplicações para logística 24

4 SISTEMA PROPOSTO 26
4.1 Rede 26
4.2 Hardware 27
4.3 ADXL345 27
4.3.1 FIFO 29
4.4 Software 29

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL 34
5.1 Equipamento de Referência 34
5.2 Aquisição e Tratamento dos dados do sensor de referência 34
5.3 Frequência e Amplitude de Aceleração 35
5.4 Projeto da Base 36
5.5 Montagem do Experimento 36

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 38
6.1 Teste de Impacto 39
6.2 Análise do Erro dos Ensaios 39
6.2.1 Ensaios com maior erro relativo 42
6.2.2 Ensaios com menor erro relativo 44

7 CONCLUSÃO 47
7.1 Trabalhos Futuros 48

REFERÊNCIAS 49

APÊNDICE A TRECHO DE CÓDIGO DESENVOLVIDO 51

APÊNDICE B FUNÇÕES DE CONFIGURAÇÃO E AQUISIÇÃO DO ACELERÔMETRO 54

ANEXO A ATESTADO DE CALIBRAÇÃO 57

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Nó Sensor comercial para medição de temperatura 15
Figura 2: Barramento I2C 16
Figura 3: Barramento SPI 17
Figura 4: Sistema massa mola 18
Figura 5: Acelerômetro MEMS internamente, escala de 100 μm (MASSUDA, 2007) 19
Figura 6: Distribuição normal 21
Figura 7: Fluxograma do Critério de Chauvenet 21
Figura 8: Ekonode (KODALI; RAWAT, 2013) 23
Figura 9: Nó sensor (CHEN *et al*., 2009) 24
Figura 10: Topologia de Rede 26
Figura 11: Diagrama de blocos do Hardware utilizado 27
Figura 12: Hardware utilizado 28
Figura 13: Diagrama de blocos do acelerômetro utilizado 28
Figura 14: Aplicativo desenvolvido em Android 30
Figura 15: Máquina de Estados do software desenvolvido 31
Figura 16: Fluxograma do software desenvolvido 31
Figura 17: Acelerômetro Dytran 3030B5 35
Figura 18: Base para os sensores 36
Figura 19: Montagem do teste 37
Figura 20: Alterações na fixação da placa 38
Figura 21: Ensaio de impacto no domínio tempo 39
Figura 22: Ensaio de impacto no domínio frequência 40
Figura 23: Ensaio no domínio tempo 40
Figura 24: Resultado do Ensaio 10 42
Figura 25: Resultado do Ensaio 11 43
Figura 26: Resultado do Ensaio 12 44
Figura 27: Resultado do Ensaio 7 44
Figura 28: Resultado do Ensaio 5 45
Figura 29: Resultado do Ensaio 15 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características NI 4432 34
Tabela 2: Características Dytran 3030B5 35
Tabela 3: Resultado do ensaio para frequência de maior amplitude do PSD . . . 41
Tabela 4: Resultado do ensaio para frequência de segunda maior amplitude do PSD 41

LISTA DE ABREVIATURAS

ARM	*Advanced RISC Machine*
CS	*Chip Select*
DFT	*Discrete Fourier Transform*
FEFO	*First Expire, First Out*
FFT	*Fast Fourier Transform*
FIFO	*First In, First Out*
I2C	*Inter-Integrated Circuit Protocol*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MEMS	*Micro-Eletro-Mechanical Systems*
MISO	*Master In, Slave Out*
MOSI	*Master Out, Slave In*
PSD	*Power Spectral Density*
RFID	*Radio Frequency IDentification*
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
SCL	*Serial Clock*
SCLK	*Serial Clock*
SD	*Secure Digital*
SDA	*Serial Data*
SPI	*Serial Peripheral Interface*
USB	*Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

F	Força
k	Constante elástica da mola
a	Aceleração
m	Massa
ω	Ômega
$\sum$	Somatório
$\forall$	Para todo
$\in$	Pertence
$\mathbb{N}*$	Grupo dos números naturais não-nulos

1 INTRODUÇÃO

A miniaturização da eletrônica permitiu o desenvolvimento de equipamentos de medição compactos e com baixo consumo de energia. Aliado a isso, a produção em larga escala destes dispositivos permitiu a criação de redes de sensores sem fio com baixo custo, podendo até mesmo serem consideradas descartáveis em alguns casos. Desta forma, torna-se economicamente viável utilizar-se desta estrutura para coleta de variáveis de interesse para uma nova gama de processos existentes na indústria e comércio.

Um dos processos que pode e deve ser monitorado, é o transporte de cargas sensíveis, como por exemplo hortifrutigranjeiros. Sendo o Brasil um país onde 7,2 milhões de pessoas ainda passam por algum tipo de insegurança alimentar (IBGE, 2013), é necessário aprimorar constantemente todos os processos que envolvem a produção agropecuária. Estima-se que, no caso específico de hortifrutigranjeiros, haja uma perda média pós-colheita de 35%, sendo que este valor pode passar de 40%, a depender do produto a ser considerado. Como comparação, em países onde o transporte é mais eficiente, como os Estados Unidos, produtos semelhantes possuem uma perda estimada em 10% (VILELA *et al*., 2003).

Ao considerar apenas o processo de transporte, há poucos dados disponíveis e é possível que tenham-se dados subestimados da perda real. Conforme estudo realizado em um supermercado de Nova Iorque ao longo de 12 anos (JEFFREYÂ KÂ BRECHT, 2002), danos físicos pelo transporte nunca foram considerados como a causa mais comum de descarte de frutas, pois apenas 6% das perdas de maçãs foram por causa de danos físicos causados pelo transporte. A causa mais comum encontrada foi a contaminação por fungos, como os do gênero *Botrytis* e *Penicillium* (ZEEBROECK *et al*., 2007). O que não foi considerado nestes números foi que o dano no tecido da fruta facilita a entrada do fungo. Pesquisa semelhante cita que até 50% das perdas podem ser devidas ao transporte, quando considerados estes dados (STUDMAN *et al*., 1997). Além disso, se o dano físico pudesse ser evitado, poderia ser utilizada uma menor quantidade de fungicidas, tornando o processo mais barato.

Dado o problema de transporte aqui apresentado, propõe-se uma ferramenta para monitorar o transporte de alimentos frescos, capaz de quantificar as vibrações envolvidas visando a utilização destes dados para melhoria dos processos logísticos. Para tal, será modificada em um equipamento existente a forma de coleta e tratamento dos dados, para que seja possível aumentar o tempo de monitoramento sem necessidade de recarga da bateria, uma vez que o tempo de transporte pode passar de 3 semanas.

Este trabalho está estruturado em 6 tópicos principais:

- Fundamentação Teórica: Uma breve revisão de conceitos utilizados no trabalho;
- Revisão da Literatura: Destinado a apresentar diferentes trabalhos desenvolvidos

que possuem algum objetivo em comum;

- Sistema Proposto: Apresenta o sistema proposto, a forma de coleta de dados e como os dados são tratados;
- Metodologia Experimental: Onde será mostrada a forma experimental uitilizada para avaliar a ferramenta;
- Resultados e Discussões: Apresenta os resultados alcançados com o sistema proposto;
- Conclusão: Considerações finais sobre o trabalho e trabalhos futuros;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Avanços recentes em sistemas micro-eletro-mecânicos (tecnologia MEMS, de *micro-eletro-mechanical systems*), comunicação sem fio e eletrônica digital, permitiram o desenvolvimento de nós sensores multifuncionais de baixo custo, baixo consumo de energia e compactos. Estes pequenos nós são constituídos de sensores para medição de variáveis de interesse de um dado processo, processadores para execução de tarefas simples e componentes de comunicação.

Em conjunto, os nós formam uma rede chamada Rede de Sensores sem Fio (RSSF), com um grande número de pontos de sensoriamento. Estas redes apresentam vantagens com relação aos sensores tradicionais, como por exemplo, poder utilizar um número maior de nós de medição para o mesmo efeito físico de interesse, devido a seu custo reduzido em relação a um sistema tradicional.

Outra grande vantagem que impactou positivamente na popularidade das RSSF é a facilidade de instalação e operação. Por não utilizar cabos para alimentação e comunicação, a instalação é facilitada e os pontos de medição podem ser alterados facilmente, ampliando a possibilidade de coleta de dados em um ambiente, sem que seja necessário um custo extra de um novo elemento sensor. Um nó sensor comercial para medição de temperatura, fabricado pela empresa empresa *National Instruments* é visto na Figura 1.

Figura 1: Nó Sensor comercial para medição de temperatura

Uma das diversas formas de operação dessa RSSF é utilizar diversos nós sensores que

possuem apenas o objetivo de realizar a medição e enviar os dados para o nó de controle, que tem o objetivo de receber, tratar e armazenar as informações de todos os pontos da rede. Outra forma possível, válida somente quando o processamento é simples, é tratar os dados parcialmente no nó sensor e então enviar para o controle, sendo esta a forma que será explorada neste trabalho.

2.1.1 Protocolos I2C e SPI

I2C (sigla em inglês para *Inter-Integrated Circuit Protocol*) e SPI (*Serial Peripheral Interface*) são dois protocolos utilizados para comunicação entre circuitos integrados. São amplamente utilizados para comunicação *onboard* entre o microprocessador e os periféricos existentes nos nós sensores de uma RSSF. Ambos os protocolos utilizam a topologia mestre-escravo, onde o mestre é responsável por iniciar a comunicação e o periférico apenas responde aos dados solicitados, utilizando de um sinal do mestre para realizar o sincronismo. Estes dois protocolos estão presentes no acelerômetro que será utilizado neste trabalho, então é necessário explorar as características de cada um para se escolher o mais apropriado para esta aplicação.

O protocolo I2C é considerado mais complexo que o SPI, porém utiliza apenas 2 sinais lógicos, um para tráfego bi-direcional da informação (SDA, *Serial Data*) e outro, operado apenas pelo mestre, que determina o sincronismo da comunicação (SCL, *Serial Clock*), reduzindo assim o número de pinos ocupados em um microprocessador. Cada periférico de uma rede possui um endereço, então em todas as comunicações, o mestre indica para qual periférico está destinada a mensagem, não precisando de mais pinos para endereçamento. Esta topologia de rede pode ser vista na Figura 2. As principais características deste protocolo são:

- Confirmação de recebimento em todas as mensagens trocadas;
- Velocidade máxima limitada a 3,4Mbs (valores práticos são 100 e 400 kHz);
- Necessita de dois resistores para pull-up externo;

Por sua vez, o protocolo SPI utiliza pelo menos 4 sinais lógicos, sendo dois para tráfego de dados, chamados MISO (*Master In, Slave Out*) e MOSI (*Master Out, Slave In*), um para sincronismo (SCLK, *Serial Clock*) e um sinal adicional para cada dispositivo escravo presente na rede, chamado CS (*Chip Select*). Este protocolo possui algumas desvantagens em relação ao I2C, como por exemplo, não possui confirmação de recebimento nas mensagens trocadas e utiliza um número maior de pinos do processador, como pode ser visto na Figura 3.

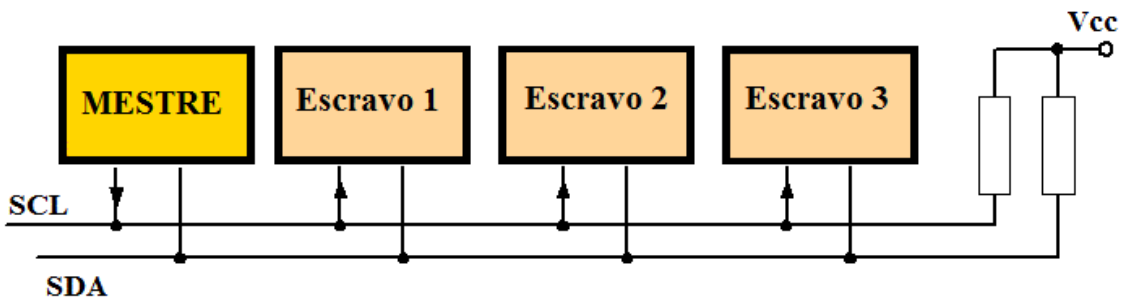


Figura 2: Barramento I2C

Por outro lado, pode-se destacar como vantagens:

- Velocidade não é limitada pelo protocolo;
- Funcionamento mais simples, por não precisar endereçamento por software;
- Não necessita de resistores externos para seu correto funcionamento;

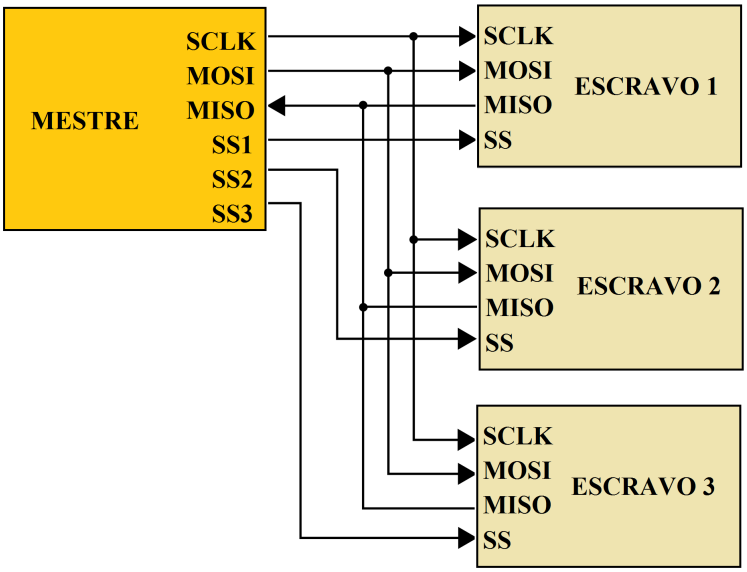


Figura 3: Barramento SPI

Sem a necessidade dos resistores de pull-up, são obtidas mais duas vantagens indiretas do uso deste protocolo: reduz-se o custo de dois componentes que deixam de ser necessários e economiza-se espaço na placa de circuito impresso, um fator que pode ser um diferencial para um sistema embarcado, como é o caso de um nó sensor de uma rede de sensores sem fio.

2.1.2 Acelerometria

Um acelerômetro é um sensor que converte a aceleração de um movimento (ou da gravidade) em um sinal elétrico proporcional. Em sua maioria, os acelerômetros são constituídos por uma massa suspensa por uma estrutura estacionária. Este dispositivo pode ser visto como um transdutor massa-mola, que se encontra no interior do sensor, que por sua vez está unido ao corpo. Sempre que este acelera, a inércia faz com que a massa resista. A força exercida pela massa é equilibrada pela mola e, como o deslocamento permitido pela mola é proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa (FIGUEIREDO *et al.*, 2007).

Segundo a lei de Hooke, $F=-kx$, entretanto, a ação da aceleração na massa suspensa produz força, conforme a segunda lei de Newton, $F=ma$. Utilizando-se destas duas equações, obtemos a Equação 1.

$$a = kx/m \tag{1}$$

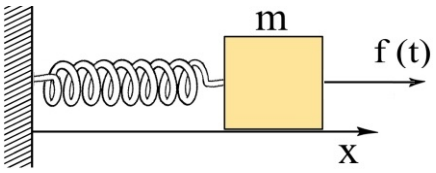


Figura 4: Sistema massa mola

Assim, considerando um sensor onde *k* e *m* são parâmetros construtivos conhecidos, pode-se medir a aceleração de um corpo conhecendo apenas o deslocamento que esta aceleração provoca. Estes parâmetros construtivos também são responsáveis pela alteração da sensibilidade e da faixa de medição do sensor. Uma das maneiras de aumentar a sensibilidade de um acelerômetro é diminuir a constante *k*. Porém, variando este parâmetro, também ocorrerá a variação da frequência de ressonância do sistema, conforme Equação 2.

$$\omega = \sqrt{k/m} \tag{2}$$

Como a faixa de frequência de medição deve ficar abaixo da frequência de ressonância, diminuir *k* irá reduzir a faixa de trabalho em frequência do sensor. Além disso, como o deslocamento máximo permitido pelo sistema é pequeno e constante, ao reduzir *k*, reduz também a amplitude de medição do sensor.

Existem diversos tipos de acelerômetros, com diferentes faixas de medição, custos e incertezas relacionadas a cada princípio físico. As variações de grandezas mais empregadas aos acelerômetros são:

- Capacitivo: Os acelerômetros capacitivos contêm uma massa e uma estrutura de suporte na forma de placas de um capacitor. Uma aceleração da massa provoca variações no espaço entre a placa fixa e móvel do capacitor, que é inversamente proporcional à carga dele. Como resposta à aceleração, a capacitância varia, o que faz variar o sinal de saída do circuito. (FIGUEIREDO *et al*., 2007)

- Piezoelétrico: Este tipo de sensor utiliza uma massa em contato direto com o elemento piezoelétrico. Ao aplicar-se uma aceleração, o sensor recebe uma força proporcional, gerando carga elétrica.

- Piezoresistivo: Acelerômetros onde o elemento sensor é um *strain gauge*. Em geral, possuem sensibilidade consideravelmente menor em relação ao piezoelétrico, porém pode ser utilizado para medir acelerações de baixas frequências, por exemplo, inferiores a 1Hz, e até mesmo para medição de inclinação, onde a aceleração é constante. (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2015)

Utilizando dos princípios físicos de medição citados, foram desenvolvidos os acelerômetro com tecnologia MEMS, que são muito menores que os tradicionais. O material mais utilizado para a criação destes dispositivos é o silício, devido a sua pouca histerese quando flexionado e pequena dissipação de energia. Sendo assim, a massa é um bloco de silício e as molas são feitas de silício policristalino (MASSUDA, 2007). O princípio físico mais comum utilizado é o capacitivo, por ser mais fácil e mais barato de ser produzido em um circuito integrado.

Estes sensores possuem diversas aplicações comerciais e industriais, desde controles de jogos eletrônicos a sistemas de proteção pessoal, como airbags de carros. Desta forma, pode-se dizer que diversos campos do conhecimento têm se beneficiado com a popularização e miniaturização destes transdutores.

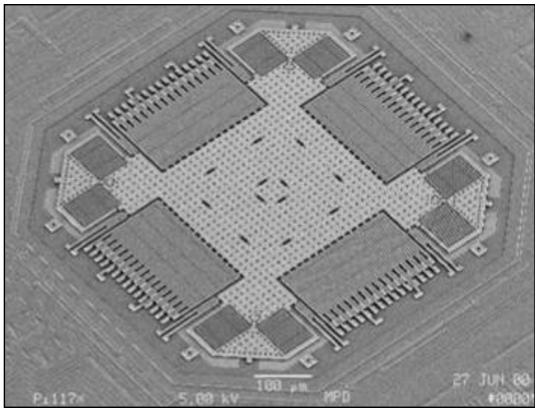


Figura 5: Acelerômetro MEMS internamente, escala de 100 μm (MASSUDA, 2007)

2.2 Algoritmos e Análise de Dados

2.2.1 Série e Transformada de Fourier

Pode-se considerar um sinal periódico no tempo como sendo a superposição ponderada de senóides complexas. Essa representação não somente leva a uma expressão útil de saída de sistemas, como também fornece uma caracterização criteriosa de sinais e sistemas. Esta representação via superposição ponderada deve possuir o mesmo período do sinal original, logo a frequência de cada senóide deve ser um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Assim, considerando $x[n]$ como um sinal periódico de período N, que atende a critérios matemáticos que não serão abordados neste texto, este sinal pode ser representado conforme a Equação 3.

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k} X[k] e^{j\omega_0 kn} \tag{3}$$

Onde ω_0=2πN e N é a frequência natural de $x[n]$. Este somatório pode conter apenas N termos, pois dois sinais discretos do tipo exponencial complexa são idênticos quando a diferença de ω for igual ou múltipla de 2π.

A série de Fourier também pode ser utilizada para representar sinais discretos aperiódicos, limitados no tempo. Para isto, replica-se o sinal no tempo, tornando-o periódico, com período idêntico ao número de amostras em análise. Calculam-se então os coeficientes $X[k]$ e considera-se apenas um período dessa nova série, pois os coeficientes da série de Fourier de um sinal amostrado também são periódicos. Esta série é então denominada Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*,DFT). Considerando então um sinal $y[n]$, que atende aos mesmos critérios de $x[n]$, porém é aperiódico, com frequência de amostragem Fs e com N amostras, a DFT $Y[k]$ deste sinal pode ser calculada por:

$$Y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y[n] e^{-j\omega_0 kn} \tag{4}$$

Cada um dos coeficientes k corresponde a uma frequência, que é calculada pela equação:

$$f = \frac{kF_s}{N} \tag{5}$$

Onde k=0,1,2, ..., $N-1$.

2.2.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Algoritmo de Cooley-Tukey

A transformada rápida de Fourier é um dos mais importantes algoritmos para o processamento de sinais e análise de dados experimentais, pois permite reduzir consideravelmente o custo computacional para realizar as operações necessárias para se calcular a DFT. Se aplicada diretamente, a Equação 4 requer N^2 multiplicações e N(N-1) adições para ser resolvida. Em 1965, James Cooley e John Tukey publicaram um trabalho onde um algoritmo para cálculo rápido da DFT foi proposto, com complexidade multiplicativa de apenas $(N/2)log_2N$, permitindo que fossem possíveis aplicações práticas para cálculo da DFT com grandes sequências de números. Este algoritmo divide o cálculo de uma DFT de N pontos em duas DFTs de N/2 pontos para as amostras pares e ímpares do sinal, de forma sucessiva até se obter apenas dois pontos para serem resolvidos. Por causa dessa forma de abordar o problema, este algoritmo tem como limitação que a entrada de dados deve ser de tamanho 2^x, $\forall x \in \mathbb{N}*$.

Um dos passos iniciais possíveis para se calcular a densidade espectral de potência é o cálculo da Transformada de Fourier. Sendo assim, é importante e relevante ter-se algoritmos que possam diminuir o tempo de processamento necessário para este passo intermediário.

2.2.3 Densidade Espectral de Potência

A densidade espectral de potência (*power spectral density*, PSD) mostra a intensidade da variação de um sinal em função da frequência. Desta forma, permite a análise de quais frequências de um sinal estão mais presentes e são mais relevantes ao processo e quais não são. Matematicamente, o PSD é a transformada de Fourier da função de autocorrelação, porém, pode-se também calcular a potência relacionada às componentes de frequência do sinal após obtida a transformada de Fourier, conforme Equação 6.

$$S_y[k] = \frac{1}{N} |Y[k]|^2 \tag{6}$$

O PSD é muitas vezes utilizado nos estágios iniciais da análise de uma série de dados, pois permite observar os dados brutos, porém em função da frequência em vez do tempo. Neste trabalho, será utilizado para caracterizar a vibração sofrida pelo nó sensor.

2.2.4 Critério de Chauvenet

Ao obter dados medidos de uma variável de interesse, pode haver algumas medidas que são facilmente distinguíveis das outras como errôneas. Se alguma influência externa ou erro experimental puder ser identificado, estes dados incorretos podem simplesmente serem descartados. Porém, em alguns casos, pode não haver uma explicação fácil para esta situação. Nestes casos, deve-se escolher um critério bem definido para descarte destes dados, pois pode ser um indicativo de um erro na metodologia experimental ou simplesmente um valor real do fenômeno, porém diferente do previsto inicialmente.

Desta forma, um critério estatístico deve ser usado para identificar estes pontos que podem ser rejeitados. Um método amplamente aceitado nestes casos é o Critério de Chauvenet. Esta técnica define um espalhamento aceitável dos dados ao redor da média dado uma medida de N pontos. Neste critério, é definido que todos os pontos devem estar contidos em uma banda em volta da média, que corresponda a probabilidade 1-1/(2N). Em outras palavras, uma medida só pode ser descartada se a probabilidade de obter esta medida novamente for menor que 1/2N.

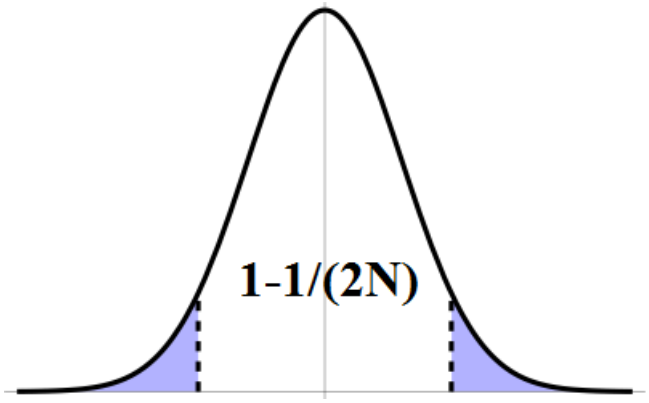


Figura 6: Distribuição normal

Esta probabilidade dos dados estarem distribuídos ao redor da média pode ser relacionado a um desvio máximo da média de uma distribuição Gaussiana (Figura 6). Sendo assim, é possível utilizar uma tabela para determinar o desvio máximo da média em função da quantidade de pontos que se dispõe. O algoritmo completo pode ser visto na Figura 7.

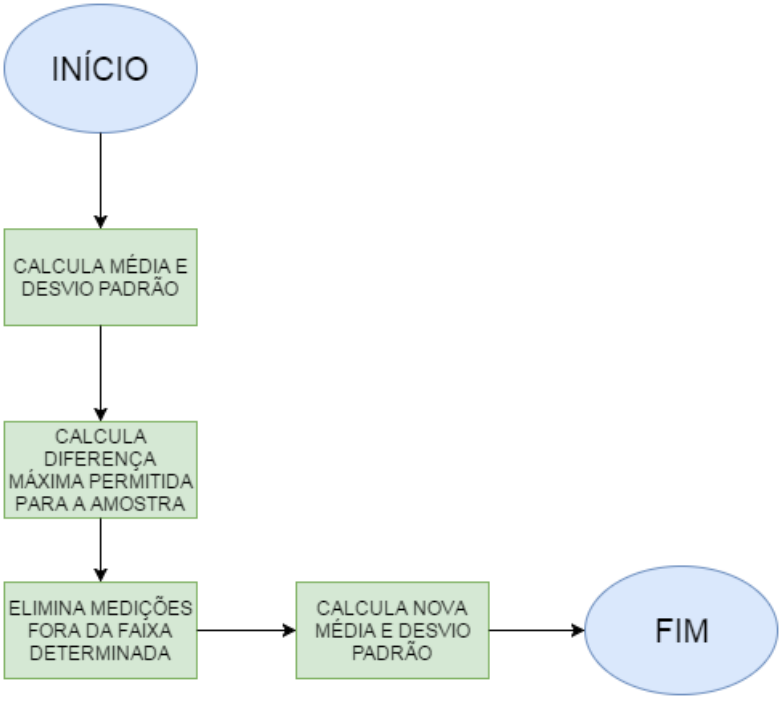


Figura 7: Fluxograma do Critério de Chauvenet

Inicialmente, calcula-se a média e o desvio padrão da amostra que deseja-se avaliar. Então, multiplica-se o valor encontrado na tabela para o tamanho da amostra pelo desvio padrão e obtem-se o desvio máximo aceito para este grupo de valores. Assim, elimina-se todos os pontos que estão mais distantes da média que o determinado anteriormente. Após esta etapa, uma nova média e um novo desvio padrão podem ser calculados, porém o critério de Chauvenet não deve ser aplicado novamente. Para o tamanho da amostra a ser utilizado nos testes realizados neste trabalho (N=17), nenhum valor pode ficar mais distante da média que 2,18 vezes o desvio padrão.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Com o objetivo de determinar um caminho a ser seguido, foi realizada uma pesquisa em uma base de dados de trabalhos publicados, utilizando como tema dispositivos portáteis, acelerometria, sistemas instrumentados, redes de sensores sem fio e aplicações destes na agricultura de precisão. Dessa forma, os trabalhos pesquisados serão divididos em três tópicos. No primeiro, serão apresentados trabalhos relacionados a sistemas portáteis em geral, no segundo, serão abordados os estudos desenvolvidos com foco na agricultura e no terceiro, trabalhos que relacionam sistemas de medição a sistemas de logística, que é o foco principal deste trabalho. Para filtrar os estudos, foi utilizado como parâmetro que o trabalho deve ter sido publicado nos últimos 5 anos, sendo que há uma exceção por tópico.

3.1 Sistemas Instrumentados Portáteis e Acelerometria

Conforme previsto no trabalho desenvolvido em 2002 por (TIEMAN; SCHMALZEL; KRCHNAVEK, 2002), as RSSF e os *smart sensors* se popularizaram, pois houve redução de custos, dimensões e consumo de energia. Para que isso fosse possível, a aquisição de dados é realizada localmente, porém o processamento de dados é realizado em sistemas com maior desempenho. Com o custo reduzido, existe a oportunidade de ampliar essa aplicação de forma a se obter redundância, ocasionando assim em um aumentando substancial de confiabilidade. Além disso, é possível coletar mais informações, melhorando o entendimento dos processos estudados.

Mais recentemente, utilizando dos preceitos citados anteriormente, variáveis que eram facilmente medidas podem ser utilizadas em novas aplicações. Um campo que pode ser citado é a engenharia biomédica, com trabalhos como o de (MENDI *et al*., 2013), que utiliza um acelerômetro e um sistema de aquisição de dados, integrado em um único dispositivo no pulso do paciente, com o objetivo de medir a quantidade de mordidas por minuto realizada enquanto este está se alimentando. Os dados coletados não são processados localmente, mas sim enviados via *Bluetooth* para um *smartphone*, que realiza o processamento e informa ao usuário uma avaliação da sua mastigação.

Outro grande campo com aplicação de sistemas portáteis para medição de aceleração é a indústria. Sendo a vibração um importante indicador da vida útil de uma máquina rotativa, é possível determinar o local e a causa de um problema antes que ele ocorra, permitindo assim uma manutenção preventiva. Utilizando o mesmo transdutor que será utilizado neste trabalho, (SWATHY; ABRAHAM, 2014) realizou um estudo unindo os dados de aceleração e emissão acústica. Estes dados eram enviados a um computador, que calculava o espectro de potência e utilizava destes resultados para detectar possíveis anomalias que levariam a falhas.

3.2 Aplicações para agricultura de Precisão

Utilizando-se da ideia de aplicar redes de sensores sem fio a agricultura, (SIKKA *et al.*, 2006) realizou um estudo em uma fazenda, chegando a utilizar 98 nós sensores alimentados por energia solar ao longo de 6 meses de trabalho. Estes sensores eram utilizados para coletar informações a cerca da composição do solo da fazenda, e algumas variáveis de interesse na agropecuária, como a quantidade de insumos ingeridos e a localização dos animais. Os nós sensores transmitiam as informações para o nó coletor, que as enviava para um servidor na internet, de forma que pesquisadores de diferentes áreas pudessem ter acesso aos dados brutos. Em uma abordagem semelhante, há o trabalho publicado por (KHAIRI *et al.*, 2013), que coleta dados de movimento, umidade e temperatura ambiente dos animais de uma fazenda. Diferente do trabalho de (SIKKA *et al.*, 2006), este realiza a análise dos nós sensores em relação aos dados coletados por equipamentos de referência, chegando a um erro de medição médio menor que 5% em todas as variáveis medidas.

Para aumentar a eficiência da produção, pode-se citar os trabalhos de (RAJPUT; GANDHI; SAXENA, 2012) e (KODALI; RAWAT, 2013), que propõem aplicar RSSF a fazendas de maçã e manga, respectivamente. Estes trabalhos focam principalmente na medição da composição do solo e temperatura. Reduzindo a quantidade de fenômenos físicos e dados coletados, cada nó sensor pode ficar em campo por até 3 meses, tempo este que pode ser estendido para 5 anos, caso utilize-se painéis solar para carga da bateria. O nó sensor utilizado no experimento da fazenda de manga pode ser visto na Figura 8.

Figura 8: Ekonode (KODALI; RAWAT, 2013)

Indo além da eficiência como objetivo único e final, há trabalhos mais completos desenvolvidos, como o de (AMMAD-UDDIN *et al.*, 2014), que propõe utilizar uma rede de sensores sem fio para coletar dados de uma fazenda de aves para produção de ovos e carne. Neste estudo, propõe-se um sistema instrumentado mais completo, com a capacidade de coleta de dados de temperatura, umidade relativa, composição e velocidade do ar, luz, peso das aves, localização, movimento (através de acelerômetros), composição do solo e etiquetas de RFID (*Radio-Frequency IDentification*) para identificação. Com estes sensores, é possível saber onde atuar para que se obtenha o conforto necessário para os animais, e também permite identificar as aves doentes nos primeiros sintomas, de forma que se evite a contaminação de todo o plantel.

E finalmente, tem-se o estudo de (CULIBRINA; DADIOS, 2015), que simula um sistema que além de realizar as medições, atua nos sistemas de distribuição de energia e

irrigação de uma fazenda, e utiliza logica *fuzzy* para decidir os momentos em que se deve atuar, com o objetivo de aumentar a eficiência energética e de produção da fazenda.

3.3 Aplicações para logística

Com objetivo semelhante ao proposto neste estudo, o trabalho de (CHEN *et al.*, 2009) utilizou uma rede de sensores sem fio para monitorar a vibração envolvida no processo de transporte de melões do Brasil até a Suécia ao longo de 20 dias. Utilizou-se um acelerômetro tri-axial, com amplitude de $8g$ e resolução de 10 bits, com taxa de aquisição de 20Hz e largura de banda de 10Hz. Como não seria possível armazenar todos os dados coletados e os algoritmos de compressão existentes possuem um custo alto em processamento para o hardware simples que desejavam utilizar, foi proposta uma forma de compactação, que dividia os dados em 3 diferentes tipos: Nível CC, sinal CA e picos de maior amplitude e menor duração. Armazenando os dados de nível DC e não comprimindo os dados dos picos, devido a menor quantidade de ocorrências, foi aplicado então um algoritmo simples apenas para comprimir o sinal AC. Desta forma, foi possível obter uma compressão de 10:1, com distorções pouco significativas dos dados que se desejava monitorar. O formato e dimensões do nó sensor utilizado neste experimento é muito parecido com o que foi utilizado neste trabalho, e pode ser visto na Figura 9.

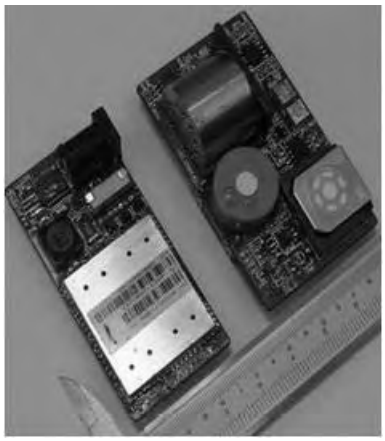


Figura 9: Nó sensor (CHEN *et al.*, 2009)

Para analisar a vibração de um trem de transporte de passageiros, (HEIRICH *et al.*, 2011) utilizou um acelerômetro no compartimento de bagagens, próximo à cabine de comando. Foi utilizada uma taxa de aquisição de 100Hz, e os dados foram coletados durante uma hora. Para obtenção dos resultados, os dados foram pós-processados com o objetivo de computar a transformada de Fourier e a densidade espectral de potência. Com isto, foi possível observar que a vibração é encontrada em todas as dimensões e é fortemente dependente da velocidade, da estrada, do tipo de motor e também da posição onde deseja-se saber a aceleração.

Por fim, o trabalho de (LANG; JEDERMANN, 2015) detalha variáveis de interesse especificamente do transporte de hortifrutigranjeiros, que são temperatura, umidade, aceleração, concentração de gases como o etileno e CO2. Um detalhe importante destacado é que, normalmente, os contêineres para transportes marítimos de frutas possuem poucos pontos de medição de temperatura, então pode haver pontos de calor concentrado devido a má circulação de ar e outros pontos com temperatura excessivamente baixa, o que pode

danificar o tecido da fruta. O uso de diversos nós de uma rede de sensores sem fio é uma das soluções apresentadas para este problema

Além de destacar as grandezas físicas de interesse, o estudo de (LANG; JEDERMANN, 2015) apresenta formas de melhoria no processo logístico utilizando dos dados coletados. Por exemplo, alterar processos logísticos para evitar vibrações e impactos pode ser oneroso, porém se é detectado que houve um evento que pode diminuir a vida útil dos alimentos, é possível alterar a ordem de entrega dos produtos. Este paradigma de logística é chamado de FEFO (*First Expire , First Out*). Duas das recomendações para ferramentas que se proponham a analisar este processo é que se o acelerômetro precisa adquirir dados a todo instante e que se reduza o custo com o envio de dados, enviando apenas avisos de eventos para o nó de controle. De certa forma, estas duas recomendações serão seguidas neste trabalho.

4 SISTEMA PROPOSTO

4.1 Rede

Utilizando o conceito de RSSF, foi aplicada neste trabalho uma rede com topologia do tipo estrela. Nesta topologia, todos nós sensores enviam os dados para um nó controlador, que pode retransmitir estes dados para um computador. No caso do hardware utilizado, existia ainda a possibilidade de armazenar estes dados em um cartão SD. O processamento de dados foi feito diretamente no nó sensor, com o objetivo de diminuir a quantidade de dados enviados, uma vez que o rádio é o componente do nó com maior consumo de energia.

Realizando o processamento diretamente no nó sensor, elimina-se a necessidade de um computador, porém, caso tenha-se um disponível, está aberta a possibilidade de enviar estes dados para a nuvem, em uma arquitetura de rede conforme a da Figura 10:

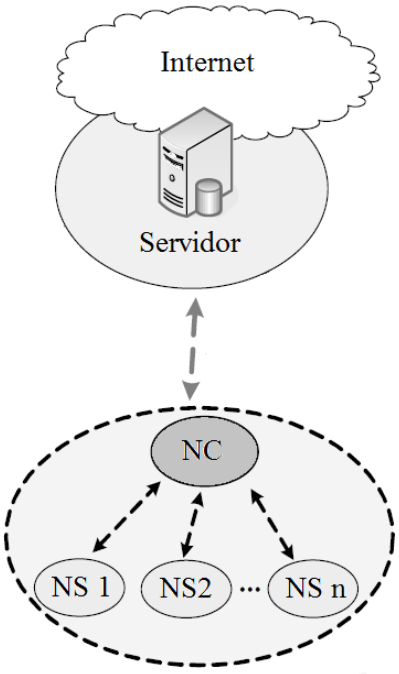


Figura 10: Topologia de Rede

4.2 Hardware

Para testar o algoritmo proposto, foi utilizado um nó sensor para redes sem fio (mote), que possui sensores de temperatura, luminosidade e aceleração triaxial, desenvolvido em um laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (MULLER *et al.*, 2012).

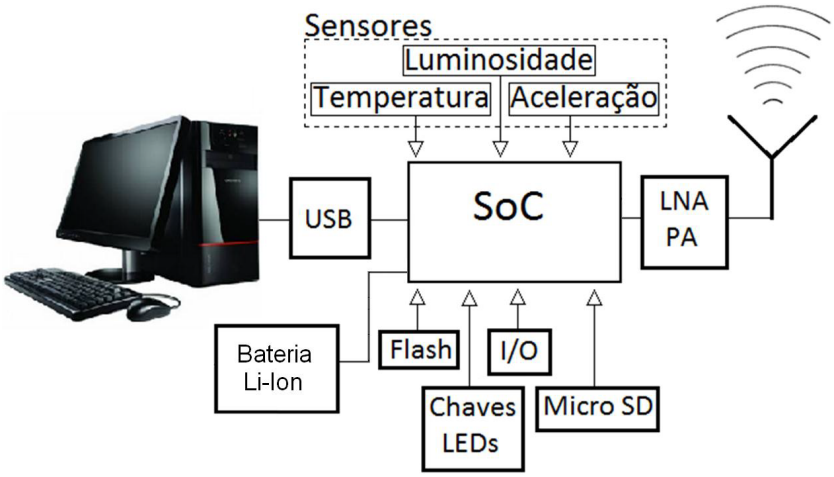


Figura 11: Diagrama de blocos do Hardware utilizado

A Figura 11 apresenta o diagrama de blocos do dispositivo, que possui:

- Microcontrolador ARM 7 com rádio IEEE.802.15.4;
- Amplificador (LNA-PA) para aumento da distância de comunicação;
- Porta USB para coleta de dados e carga da bateria;
- Bateria de Li-íon de 800mAh;
- Memória Flash de baixo consumo;
- Slot para cartão SD;

O protótipo utilizado nos testes pode ser visto na Figura 12. O acelerômetro indicado na imagem é o ADXL345, que foi utilizado como transdutor neste trabalho. O hardware completo, que inclui bateria, case de proteção e antena externa possui aproximadamente 74g.

4.3 ADXL345

O acelerômetro traixial, modelo ADXL345 do fabricante *Analog Device* possui faixa de medição configurável para ± 2, ± 4, ± 8 e ± 16g. A resolução máxima é de 13 bits quando configurado para medir até 16g, desta forma, mantem-se a sensibilidade em 3,9mg/bit para todas faixas de operação. Os dados estão formatados como complemento de dois e é acessível por SPI (3 e 4 fios) ou I2C. (ADXL345, 2015)

Integrado ao acelerômetro, existe uma memória FIFO (*First In, First Out*) de 32 níveis, que pode ser usada como buffer de dados para reduzir o uso do processador, diminuindo assim o consumo de energia. Há também duas saídas de interrupção configuráveis

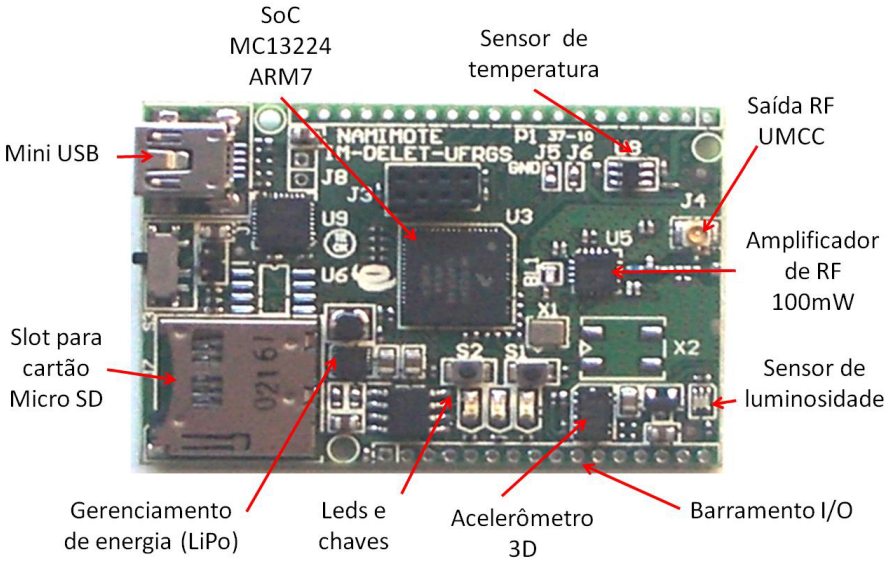


Figura 12: Hardware utilizado

para acontecer quando ocorrem diferentes eventos, tais como atividade e inatividade, *single tap*, *double tap*, queda livre e dados disponíveis para leitura.

Para esta aplicação, será utilizada uma interrupção por atividade. Neste modo de operação, configura-se um limiar de detecção de aceleração. Sempre que um dos eixos estiver acima deste limiar gera-se uma interrupção. Esta interrupção pode modificar o nível lógico de um pino (INT1 ou INT2), também configurável. O diagrama de blocos do dispositivo é mostrado na Figura 13.

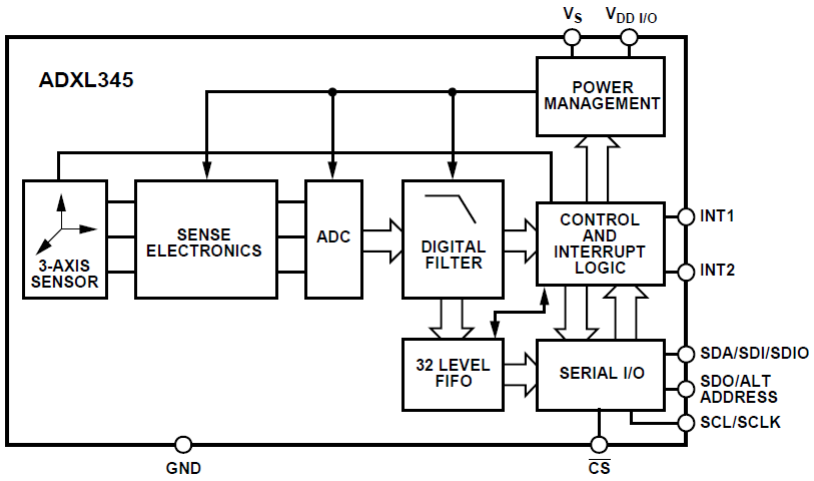


Figura 13: Diagrama de blocos do acelerômetro utilizado

A frequência de aquisição deste acelerômetro é configurável entre 0,10 e 3200Hz. Para baixas frequências de aquisição (0,10 e 12,5Hz) o consumo é reduzido e fica abaixo de 50uA. Para frequências superiores a essa, o consumo aumenta consideravelmente, atingindo 140uA para frequências de aquisição maiores que 100Hz. Mesmo com esse aumento significativo, o dispositivo ainda possui um consumo baixo, apropriado para o uso em sensores de RSSF.

4.3.1 FIFO

O ADXL345 possui uma memória FIFO interna de 32 posições, sendo que cada posição consegue armazenar os 13 bits de informação de cada eixo. Há 4 formas de operação para a memória interna do acelerômetro: *by-pass*, FIFO, *stream* e *trigger*.

No modo *by-pass*, a memória não é utilizada, então a última medição é a que está disponível no registrador de saída. No modo FIFO, o acelerômetro realiza n medições (sendo 0<n<32), gera interrupção e continua lendo novos dados até preencher a memória. No modo *stream*, a memória sempre mantém as últimas 32 amostras, descartando as mais antigas.

Para este trabalho, será utilizado o modo *trigger*. Nesta forma de operação, a memória armazena sempre as últimas 32 aquisições, até que um evento seja detectado e uma interrupção seja enviada ao pino de interrupção. Após o evento, a memória mantem os n dados mais novos (com n configurável, 0<n<32), e passa a operar no modo FIFO, adquirindo novos dados até preencher todos os níveis disponíveis na FIFO.

A leitura de dados da memória deve ser feita no modo *multiple-byte*, que consiste em obter os dados de uma sequência de 6 registradores sem alterar o estado do pino CS. Ao finalizar a leitura, os dados da segunda posição de memória passam para a primeira posição. Caso seja feita a leitura de somente um registrador, por exemplo, os dados dos outros 5 são descartados para que a próxima posição de memória possa ser lida. Após obter todos os dados, para habilitar novamente o modo *trigger*, o acelerômetro deve ser configurado como *by-pass* e então novamente como *trigger*.

4.4 Software

Conforme visto na revisão bibliográfica, é necessário reduzir a quantidade de dados de aceleração salvos ao longo de um transporte de cargas para reduzir o custo em armazenamento de informações. Uma das formas de se fazer é buscar algoritmos de compressão que sejam eficientes na sua compactação sem eliminar informações relevantes do processo, porém ainda sim, dependendo da taxa de aquisição e do tempo de coleta, pode-se chegar a uma quantidade expressiva de dados que ainda deverão ser pós-processados para obter- se algum resultado. Desta forma, propõe-se neste estudo que o nó sensor possua capacidade de realizar um processamento inicial, de forma que fiquem salvos apenas os dados que são realmente importantes para posterior análise.

Inicialmente, o algoritmo havia sido desenvolvido para plataforma *Android*, utilizando a linguagem de programação *Java*. Desenvolver nesta plataforma, permite que qualquer usuário tenha acesso a um sensor para quantificar a vibração de qualquer processo, pois basta que o celular ou tablet possua um acelerômetro triaxial interno, como é o caso da maior parte dos dispositivos. Outra vantagem é a fácil visualização dos dados, que podem estar disponíveis em tempo real, na tela do dispositivo.

Por outro lado, por não ser um dispositivo específico para este fim, há dificuldades em fixar o aparelho no objeto de estudo, podendo danificá-lo ou então introduzir erro na medida por má fixação. Há também o problema da elevada massa de um dispositivo celular, o que também impacta na vibração. O aplicativo desenvolvido pode ser visto na Figura 14.

Além do custo de armazenamento, foi necessário adotar métodos que reduzissem o consumo de energia, para que o sistema atuasse de forma autônoma pelo maior período possível. Estes métodos só podem ser aplicados em dispositivos apropriados para aquisição de dados, como um nó sensor de uma RSSF. Assim, foi necessário reescrever o código

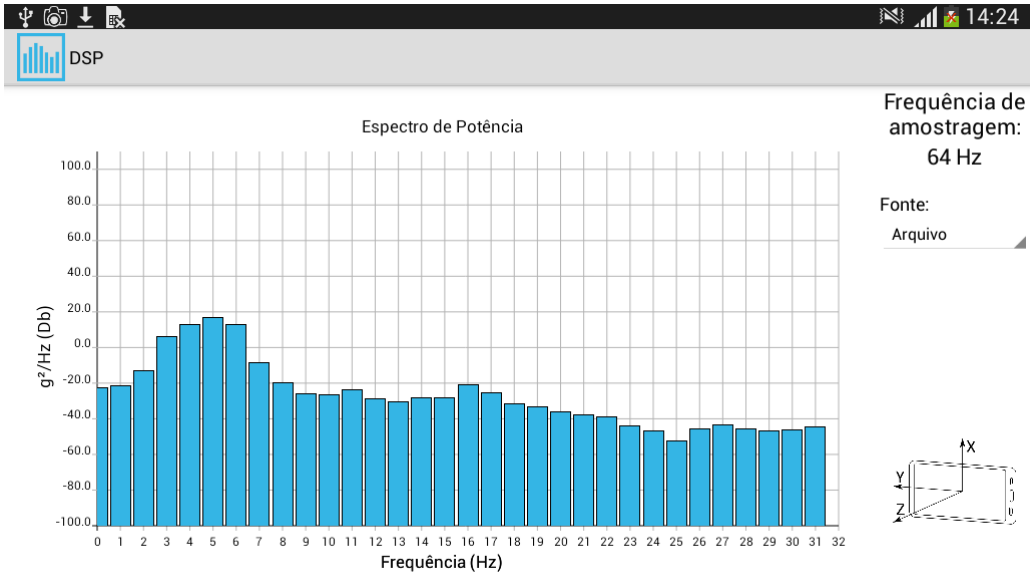


Figura 14: Aplicativo desenvolvido em Android

na linguagem C para operar no dispositivo escolhido. Por causa das diferenças entre as duas linguagens, não foi possível portar o código diretamente, sendo necessário grandes diferenças estruturais no programa desenvolvido, principalmente por causa da forma de tratar *arrays*.

Para reduzir o consumo, utilizou-se de duas estratégias. A primeira foi utilizar a interrupção por atividade presente no acelerômetro para "acordar"o processador. Assim, além de não coletar dados de forma contínua, o processador fica no estado "hibernado"durante todo o período em que não está sendo realizado processamento algum. No estado hibernado, o consumo de energia é reduzido, porém nenhuma ação é executada pelo processador, que apenas aguarda algum dos eventos programados o "acordar". A máquina de estados do programa completo pode ser visto na Figura 15.

Ao energizar o nó sensor, o programa passa pelo estado Início, onde configura alguns parâmetros necessários para o correto funcionamento dos periféricos. Após, o programa entra no estado *Idle*, onde as variáveis de envio e recebimento de dados são zeradas. Neste estado também é realizada a aquisição e tratamento dos dados. Então segue para o estado *Init*, onde é feita a alocação dos dados nas variáveis corretas para o envio da informação. Estando alocados, o programa avança para o estado *Transmission*, onde é realizada a primeira tentativa de envio dos dados. Para que seja possível receber dados no nó sensor, é necessário passar pelo estado *Listen*, que reverte o rádio para o modo receptor. Então é possível passar para o modo *Waiting*, onde o nó sensor irá aguardar receber o sinal de *Acknowledgement*. Caso não seja recebido o sinal, retorna para o estado *Transmission* para tentar enviar os dados novamente, tentativa esta realizada por até 5 vezes antes de avançar o estado sem realizar o envio. Se for recebido o *Acknowledgement* passa para o estado *Sleep*, onde o processador entra no modo hibernado. Quando o processador acorda, o programa retorna para o estado *Idle*, começando novamente o processo.

A segunda estratégia para reduzir o consumo de energia, consiste em realizar o processamento diretamente no nó sensor, para que reduza a quantidade de dados enviados ao nó controlador. Este processamento consiste em calcular a densidade de espectro de potência do sinal adquirido (power spectral density, PSD) e enviar apenas o valor dos dois

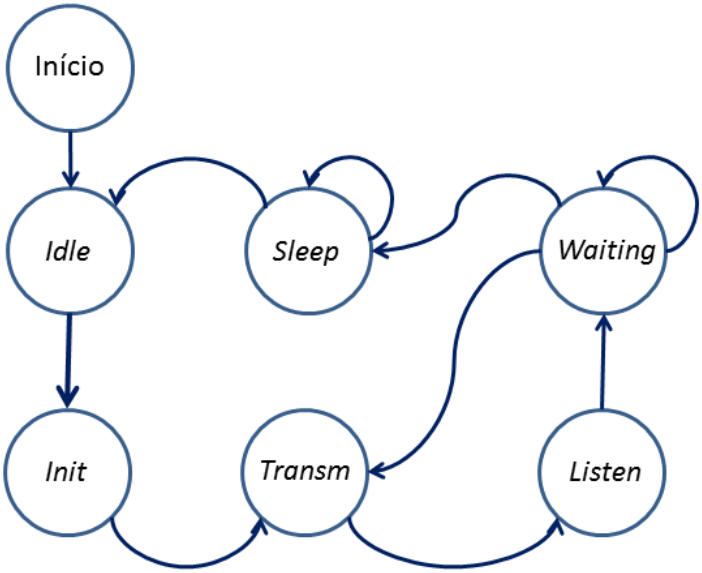


Figura 15: Máquina de Estados do software desenvolvido

maiores picos (em 2 bytes cada, para obter uma resolução de 16 bits) e a frequência onde ocorreram, conforme o fluxograma da Figura 16. Este trecho explicado pelo fluxograma é aplicado ao estado *Idle* da Máquina de Estados.

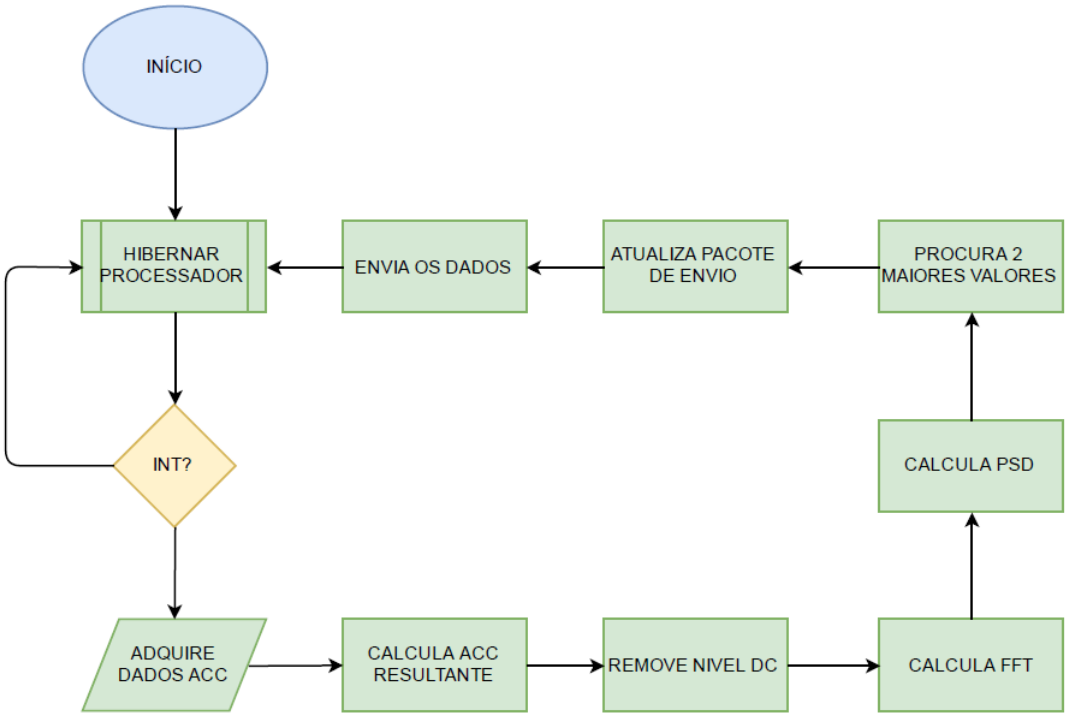


Figura 16: Fluxograma do software desenvolvido

Todas as funções descritas neste fluxograma foram desenvolvidas e testadas em uma aplicação para *Windows* antes de serem aplicadas ao nó sensor. Desta forma, foi possível

validar todas etapas de forma independente. Inicialmente, foi despendido esforço para chegar a um código simples e rápido que calcula a transformada de Fourier de um *array* de valores reais. Como a resposta, em diversos casos, é um número complexo, foi necessário trabalhar com a biblioteca *complex.h*, que é disponível na revisão C99 da linguagem C.

Como partiu-se de um código em Java, que é uma linguagem orientada a objeto, o programa ficou com algumas formas de resolução pouco aplicadas a linguagens procedurais, como por exemplo, uma função *privateFft*, que não é chamada diretamente pelo laço principal, mas sim por uma função chamada somente de *fft*, que prepara os vetores conforme necessário para o calculo correto da transformada de Fourier.

```
1  void privateFft(float complex saida[], float complex temp[],
2                          float complex twiddle[], int n, int step)
3  {
4          int i;
5          if (step<n) {
6                  privateFft(temp,saida,twiddle,n,step*2);
7                  privateFft(temp+step, saida+step,twiddle,n,step*2);
8                  for (i=0;i<n;i+=2*step) {
9                          saida[i/2]=temp[i]+twiddle[i]*temp[i+step];
10                         saida[(i+n)/2]=temp[i]-twiddle[i]*temp[i+step];
11                 }
12         }
13 }
14
15 void fft(float complex entrada[],float complex saida[],
16                         float complex twiddle[],int n)
17 {
18         int i;
19         float complex temp[n];
20
21         for (i=0;i<n;i++){
22                 temp[i]=entrada[i];
23                 saida[i]=entrada[i];
24         }
25         privateFft(saida, temp,twiddle, n, 1);
26 }
```

Uma das modificações mais significativas em relação ao código em Java é no retorno das funções. Devido a maior complexidade e maior gasto de tempo de processamento para se retornar um vetor de dados de uma função em C, optou-se por passar junto com o vetor de entrada o vetor de saída desejado. Assim, as funções desenvolvidas não retornam nada (void). Algumas opções foram consideradas na hora da implementação, como por exemplo utilizar ponteiros para esta passagem de vetores entre funções, alocar os espaços de memória de forma dinâmica e utilizar listas encadeadas em vez de arrays com contiguidade física, porém nenhuma destas opções traria melhorias para esta aplicação.

Após calculada a transformada de Fourier, estes dados podem ser utilizados para calcular o PSD. Novamente é utilizada funções da biblioteca *complex.h* para poder calcular o módulo de cada valor da transformada de Fourier obtida anteriormente. Após calculado o módulo, a solução fica trivial, podendo utilizar novamente funções comuns e que utilizam menor processamento.

```
1 void psd(float complex fft[], float saida[], int n){
2         int i;
3         float abs;
4         for (i=0; i<n; i++){
5                 abs=cabs(fft[i]);
6         saida[i]=(abs*abs)/n;
7     }
8 }
```

De forma geral, as funções desenvolvidas ficaram simples e podem ser reaproveitadas em outros códigos, pois, de forma independente, nenhuma delas está ligada diretamente a resolução do problema proposto. Todos estes cálculos que são realizados pelo nó sensor possuem um custo de processamento, porém foi determinado empiricamente que o tempo necessário para processar os dados é menor que o tempo transmitindo todos os dados para o nó controlador, então há redução no consumo de energia tanto no processador, quanto na transmissão, pois neste método transmite-se uma menor quantidade de dados, que é o principal objetivo desta forma de trabalho proposta.

Também foram desenvolvidas funções para realizar as seguintes operações:

- Transformar o valor recebido do acelerômetro (binário, complemento de dois) em aceleração;
- Retirar o nível CC da aceleração medida;
- Identificar o maior e o segundo maior valor do PSD;
- Configuração dos parâmetros do acelerômetro;

O código completo desenvolvido pode ser visto no Anexo A. Os parâmetros configurados no acelerômetro e a função de aquisição podem ser vistos no Anexo B.

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1 Equipamento de Referência

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia, um Procedimento de Medição de Referência é um "Procedimento de medição considerado capaz de fornecer resultados de medição adequados para a avaliação da veracidade de medição de valores medidos obtidos a partir de outros procedimentos de medição para grandezas de mesma natureza, em calibração ou em caracterização de materiais de referência". Sendo assim, utilizando desta definição, será considerado que um sistema comercial de incerteza baixa e conhecida seja capaz de fornecer o resultado de medição adequado para comparação.

Para realizar os testes necessários para validação sistema proposto, foi utilizado um sistema de aquisição de dados comercial, da empresa *National Instruments* , modelo NI-4432 USB. As características principais deste equipamento pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1: Características NI 4432

Característica	Valor
Nº Canais	5
Resolução	24 bits
Frequência de Aquisição	1 a 102,4 kHz
Frequência de Corte Inferior	0,1Hz
Frequência de Corte Superior	0,49 $\times$ Frequência de Amostragem
Offset Típico	2,6mV

Não há informações do fabricante da placa de aquisição sobre a resolução real, considerando os erro de amostragem e/ou ruído, então está sendo considerado que esta é a resolução real. Como esta resolução é muito superior a do sistema utilizado (59,6 μg/bit contra 3,9mg/bit), mesmo que haja uma diferença para a resolução real, ela poderá ser desprezada para esta análise.

O transdutor utilizado foi um acelerômetro piezoelétrico da empresa Dytran, modelo 3030B5 (Figura 17). Suas características podem ser vistas na Tabela 2. Este acelerômetro possui calibração atestada pelo fabricante, onde consta que o valor da sensibilidade deve ser considerada 9,95mV/g.

5.2 Aquisição e Tratamento dos dados do sensor de referência

Diferente do sensor proposto, não foi calculado o PSD diretamente ao adquirir os dados do sensor de referência, mas sim, feito apenas um software utilizando a linguagem de programação Labview, que faz a coleta e armazena a informação em um arquivo de

Figura 17: Acelerômetro Dytran 3030B5

Tabela 2: Características Dytran 3030B5

Característica	Valor
Massa	6,8g
Sensibilidade	10mV/g
Faixa de medição de Aceleração	-500 a 500g
Faixa de medição de Frequencia	5 a 10000Hz

extensão *lvm (LabVIEW Measurement)*. Neste arquivo, ficam salvos dados como data, hora, taxa de amostragem, unidade, separador, entre outros. Os dados coletados ficam armazenados em duas colunas, uma para o tempo e outra para a aceleração. Não foi necessário desenvolver uma interface com muitas opções, apenas um campo para definir o local e nome para salvar o arquivo e um botão para finalizar a aquisição.

Posteriormente, os dados coletados foram processados para obter o PSD. Este processamento foi realizado utilizando o software *Scilab*. Diferente do sensor proposto, onde foi necessário escrever um código mais elaborado para cálculo da DFT e PSD, no *Scilab* existem funções prontas que realizam estes procedimentos.

5.3 Frequência e Amplitude de Aceleração

Utilizando o equipamento de referência, foram realizados testes com o objetivo de conhecer as frequências e amplitudes associadas ao processo de interesse. Com estes parâmetros, foi possível configurar o ADXL345 para operar com a maior resolução em frequência possível, sem perder dados relevantes do processo, uma vez que o número de pontos adquiridos é constante, a resolução é inversamente proporcional a banda de passagem. A configuração final do acelerômetro foi amplitude máxima de $\pm$ 16g e frequência de aquisição de 100Hz, chegando assim a uma largura de banda de 50Hz. Esta amplitude está de acordo com (ZEEBROECK *et al.*, 2007), que diz que os níveis de aceleração no transporte de fruta são da ordem de 0,25 a 0,5 G, podendo haver impactos de até 7g. Em relação a frequência, há diferenças significativas em função dos tipos de carga e transporte, mas tem-se como exemplo o estudo realizado por (TIMM; BROWN; ARMSTRONG, 1996), que apresenta medições realizadas para determinar a frequência de ressonância da maçã e estima esse valor entre 7 e 15Hz, havendo também importância na medição entre 15 e 28Hz, pois esta é a faixa onde há efeito rotacional, que é a rotação do fruto ao redor de seu eixo central devido a vibração sofrida.

5.4 Projeto da Base

Para realizar o experimento, foi necessário utilizar uma peça metálica que garantisse que a vibração entre o sensor de referência e o proposto fosse aproximadamente igual. Os requisitos necessários eram que fosse uma peça pequena, de massa elevada, onde fosse possível colar os sensores há uma pequena distância e que pudesse ser fixada no objeto de interesse. O desenho desta peça, que já havia sido utilizada em outro projeto, pode ser visto na Figura 18.

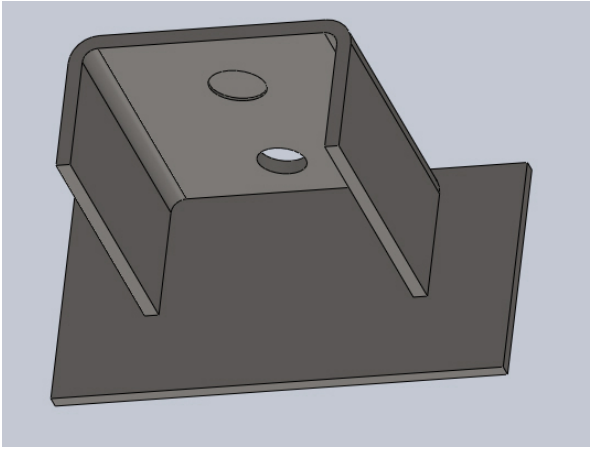


Figura 18: Base para os sensores

Esta peça foi construída em aço 1020 e possui aproximadamente 1200g.

5.5 Montagem do Experimento

Após o sistema ter sido configurado, o sistema de medição proposto foi colado próximo ao sensor de referência, como pode ser visto na Figura 19. Para fixação de ambos, foi utilizado cola a base de cianocrilato, conforme recomendação da fabricante do transdutor de referência (CHANGE, 2010). Este tipo de cola é recomendado porque:

- Cola rapidamente;
- Pouca cola é necessária para manter as partes fortemente unidas, então a película de cola é muito fina;
- Fácil limpeza, pois é solúvel em acetona;
- Interfere no sistema de forma relevante apenas em altas frequências;

Figura 19: Montagem do teste

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o experimento montado, foram realizados ensaios para testar a validade do sistema. As medições destes ensaios apresentaram erro baixo em frequência e um erro grande em amplitude, sendo a diferença entre o sistema proposto e o de referência maior que 10 vezes. Desta forma, foi observado que havia uma atenuação da vibração muito grande no sistema proposto devida a má fixação das placas à caixa, sendo necessário modificações antes de coletar novos dados. Esta nova fixação pode ser vista em detalhes na Figura 20.

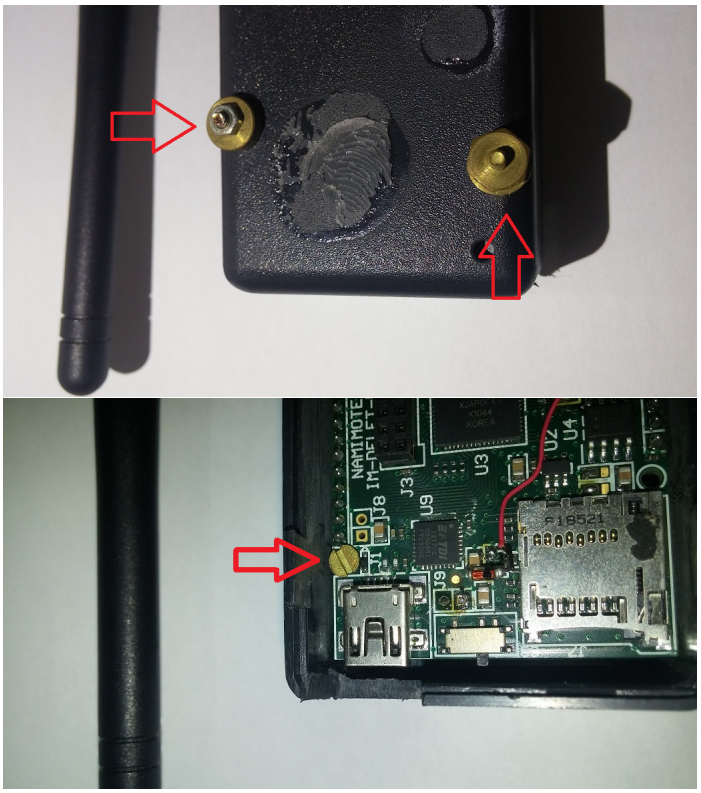


Figura 20: Alterações na fixação da placa

Após modificada a fixação, foram realizados 17 experimentos com o sistema de medição proposto. Os ensaios tinham como objetivo quantificar a validade da ferramenta para caracterização de vibrações, utilizando como motivação a aplicação em transporte de cargas sensíveis, tal como hortifrutigranjeiros. Conforme equação 5, $f = kF_s/N$, então a resolução em frequência do sistema de medição é 3,125Hz, valor este bem maior que o

desejado, porém é uma limitação do sistema, pois a memória do ADXL345 possui apenas 32 níveis.

Uma das formas de melhorar a resolução do sistema, conforme pode ser visto na Equação 5, seria diminuir a frequência de aquisição, haja visto que o tamanho da memória FIFO é fixa. Neste caso, haveria uma redução da largura de banda e os dados relevantes da vibração do processo de transporte poderiam não ser adquiridos, uma vez que o pico de máxima amplitude do PSD poderia estar facilmente acima da frequência máxima de operação do sistema.

6.1 Teste de Impacto

Em um ensaio utilizando apenas o sensor de referência, tentou-se simular o resultado de um impacto na estrutura avaliada. Neste ensaio, foram observadas amplitudes máximas de vibração e frequências principais bem maiores do que as que este sistema se propõe a medir, como pode ser visto nas Figuras 21 e 22, então pode-se considerar que o sistema deve ser aplicado apenas para medição de vibrações envolvidas no transporte, não podendo caracterizar impactos sofridos, sendo esta a outra limitação do sistema.

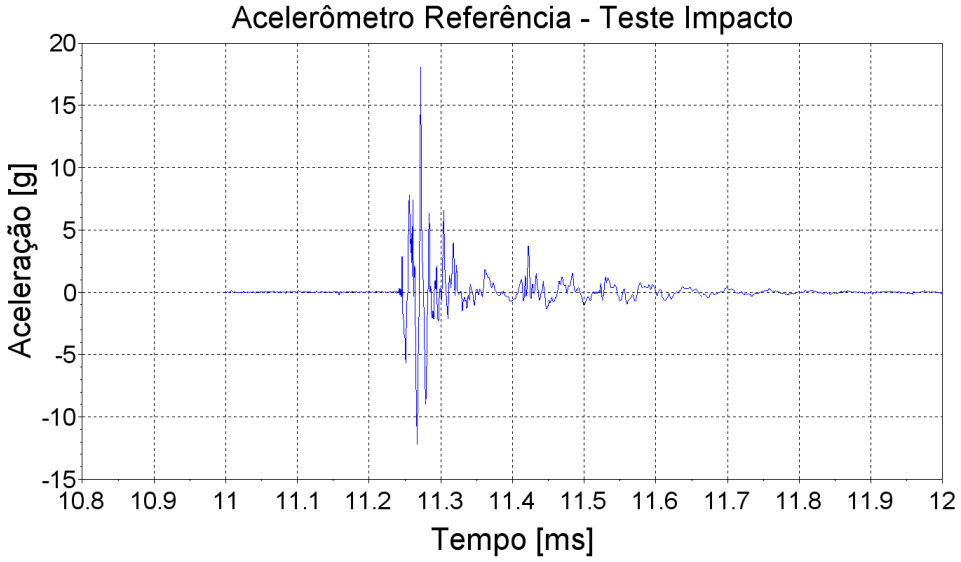


Figura 21: Ensaio de impacto no domínio tempo

6.2 Análise do Erro dos Ensaios

Com o sistema de ensaio descrito no capitulo 5, foram realizadas simulações das vibrações envolvidas no transporte. No domínio do tempo, todos os ensaios tiveram resultados semelhantes ao da Figura 23, havendo pequenas diferenças em sua frequência fundamental e na amplitude da vibração, que serão observadas no gráfico do PSD.

O resultado da medição do sensor de referência e do sensor proposto para a primeira harmônica de todos os ensaios pode ser visto na Tabela 3.

Com exceção dos dois primeiros ensaios, todas as medidas ficaram com erro em frequência entre 0 e a resolução do equipamento. O erro médio encontrado foi de 2,76Hz

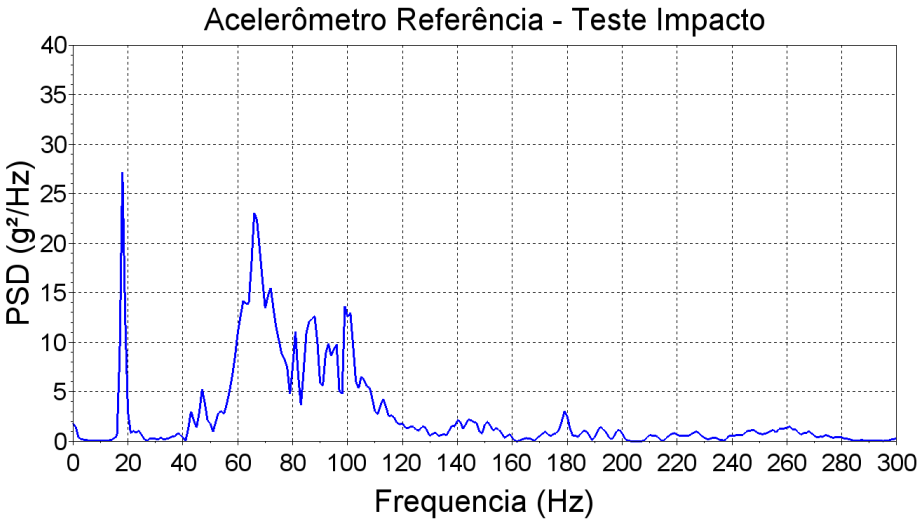


Figura 22: Ensaio de impacto no domínio frequência

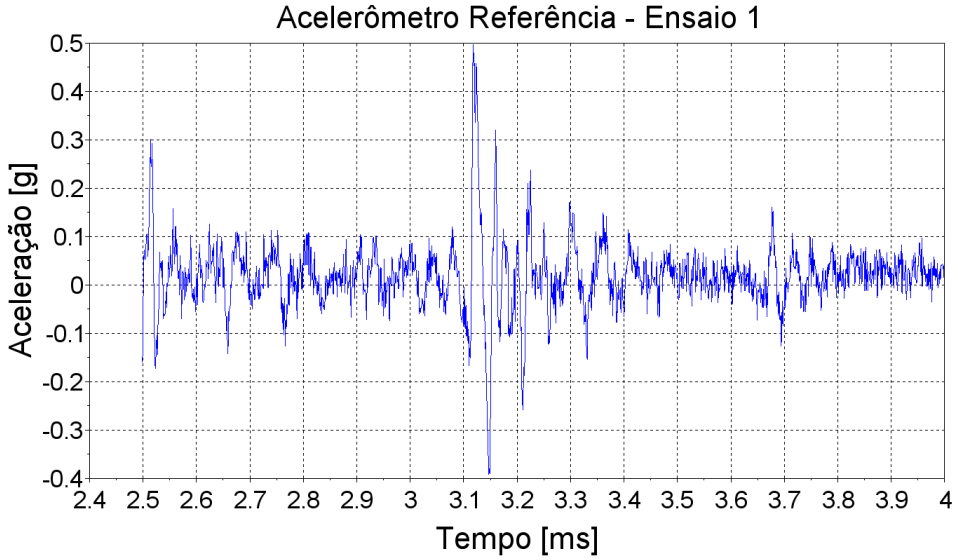


Figura 23: Ensaio no domínio tempo

com desvio padrão de 4,53Hz. Se fosse aplicado o critério de Chauvenet para este grupo de dados, os ensaios com erro em frequência maior que 12,65Hz poderiam ser eliminados, como é o caso do segundo ensaio. Aplicando este critério, o novo erro médio seria 1,76Hz com desvio padrão de 1,97Hz.

Com relação a amplitude do PSD, o erro absoluto médio encontrado foi de 0,235 g^2/Hz, com desvio de 0,173g^2/Hz. Como as amplitudes deste processo são pequenas, este erro é relevante, uma vez que quando calculado o erro relativo médio, o valor encontrado foi 41%. Mesmo que seja aplicado o critério de Chauvenet, mas desta vez usando como

Tabela 3: Resultado do ensaio para frequência de maior amplitude do PSD

	Sensor de Referência		Sensor Proposto	
Ensaio	Frequencia	Amplitude	Frequencia	Amplitude
1	21,875	0,351	15,625	0,4
2	31,25	2,168	12,5	2,4
3	15,625	2,997	15,625	2,5
4	15,625	2,076	15,625	1,5
5	18,75	0,3885	15,625	0,4
6	28,125	0,895	28,125	0,7
7	18,75	1,497	18,75	1,5
8	18,75	0,875	18,75	1,2
9	21,875	0,750	25,00	0,4
10	18,75	0,1215	18,75	0,5
11	21,875	0,6509	18,75	1,0
12	12,50	0,3672	12,50	0,2
13	21,875	0,483	25,00	0,4
14	21,875	0,474	21,875	0,3
15	15,625	0,648	12,50	0,6
16	18,75	0,75	15,625	0,6
17	15,625	1,199	18,75	0,8

entrada os dados da amplitude do PSD, não haveria descarte de dados, uma vez que neste caso, poderiam ser descartados apenas os dados com erro maior que 0,612g^2/Hz.

Tabela 4: Resultado do ensaio para frequência de segunda maior amplitude do PSD

	Sensor de Referência		Sensor Proposto	
Ensaio	Frequencia 2	Amplitude	Frequencia 2	Amplitude
1	28,125	0,325	21,875	0,3
2	12,5	2,024	15,625	2,0
3	18,75	2,080	18,75	1,7
4	9,375	0,26	12,5	0,2
5	28,125	0,3695	21,875	0,4
6	18,75	0,672	18,75	0,6
7	15,625	1,346	15,625	1,5
8	34,375	0,351	34,375	0,8
9	31,25	0,4024	31,25	0,3
10	21,875	0,0918	15,625	0,4
11	12,5	0,445	12,5	0,8
12	21,875	0,131	25	0,2
13	28,125	0,3099	15,625	0,4
14	12,5	0,204	12,5	0,2
15	18,75	0,593	21,875	0,6
16	15,625	0,6106	18,875	0,4
17	18,75	0,700	15,625	0,7

Para a frequência com segunda maior amplitude do PSD o erro encontrado foi maior.

Em frequência, foi encontrado um erro médio absoluto de 2,95Hz com desvio padrão de 3,40Hz. Se aplicado o critério de Chauvenet, haveria descarte apenas do ensaio 13. O novo erro médio encontrado seria de 2,35Hz com desvio padrão 2,42Hz. Nas duas formas de análise, o erro encontrado foi maior para a segunda frequência.

Por outro lado, houve redução no erro absoluto médio do PSD para esta segunda frequência, onde foi encontrado 0,138 g^2/Hz, com desvio padrão de 0,147 g^2/Hz. Analisando o erro relativo, fica evidente que não houve melhora na medição em relação a primeira frequência de vibração, pois o erro relativo médio foi de 45%, valor próximo ao encontrado anteriormente. Este erro absoluto menor é influenciado pelo pequeno valor do mensurando, que possui, em média, valor aproximadamente 35% menor do que o da frequência principal.

6.2.1 Ensaios com maior erro relativo

Ao analisar somente a informação sobre o erro relativo, pode-se levar facilmente a um erro sobre a validade do sistema proposto, pois este número sozinho não leva em consideração, por exemplo, o pequeno valor absoluto do mensurando, onde um erro sistêmico, porém constante, pode influenciar fortemente neste valor.

Conforme visto anteriormente, obteve-se um valor de erro absoluto baixo, então é necessário avaliar, de forma independente, onde ocorreram as principais divergências para poder obter uma análise mais completa do sistema proposto. Primeiramente, deve ser citado o ensaio mais discrepante de todos realizados, que foi o de número 10. O gráfico, em frequência, deste ensaio pode ser visto na Figura 24.

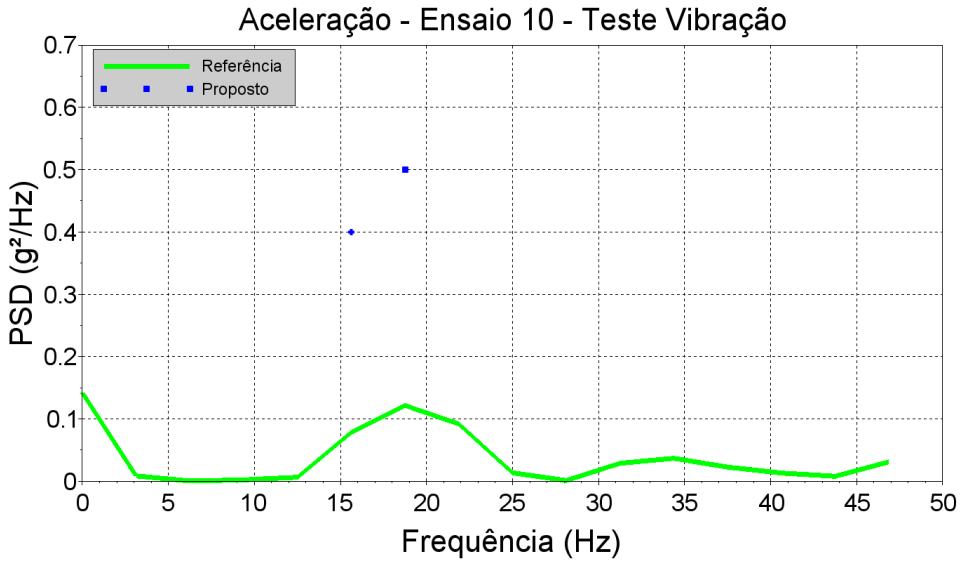


Figura 24: Resultado do Ensaio 10

Este ensaio mostra um forte indicativo de erro sistêmico, uma vez que fica evidente que o sistema proposto conseguiu "copiar"o comportamento em frequência do fenômeno, porém acabou com um erro relativo e absoluto muito acima de todos os outros ensaios realizados. Não há como saber o que ocorreu com este ensaio, porém é possível observar que os ensaios 11 e 12, realizados na sequência, também possuem um erro superior a

média, para as duas frequências medidas, então há um indicativo que pode ter havido alguma alteração no sistema que pode ter levado a uma alteração nas condições de ensaio. Algumas das possibilidades são:

- Deterioração da fixação de um dos sensores;
- Mal contato no cabo do sensor de referência;
- Alteração nas condições de temperatura da sala
- Erro na comunicação entre o microprocessador e o acelerômetro;

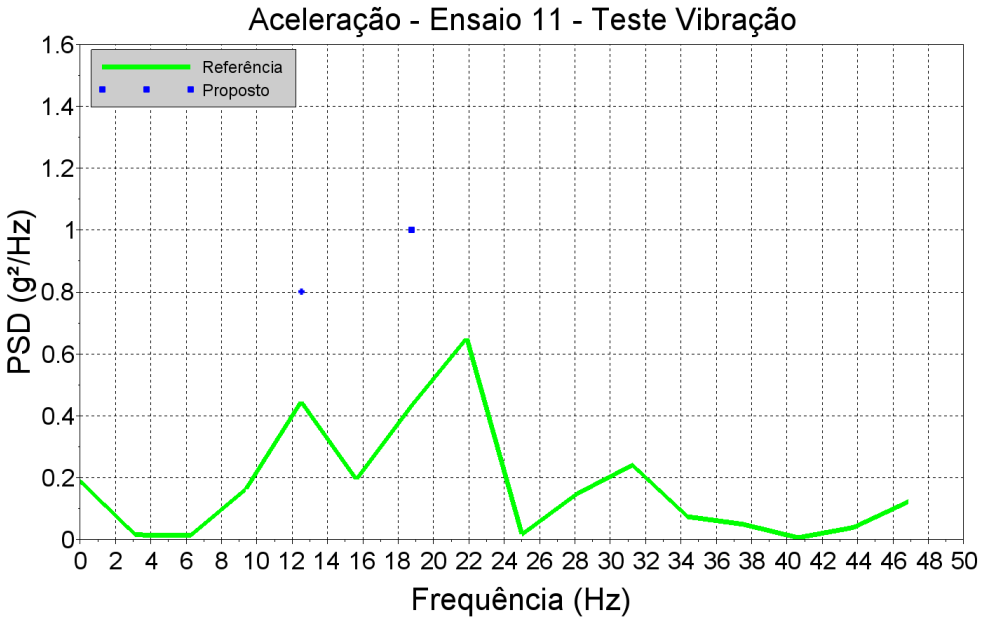


Figura 25: Resultado do Ensaio 11

O ensaio 11, realizado na sequencia e que pode ser visto na Figura 25, mostrou um comportamento de erro muito semelhante ao do ensaio 10, medindo corretamente as frequências onde ocorrem as componentes de vibração de maior amplitude, porém mostrando novamente um valor de PSD bem acima do esperado. Este ensaio ficou com um erro relativo de 53,63% para o ponto de maior amplitude, sendo este o segundo maior erro encontrado. Por outro lado, o ensaio 12 mostrou-se com erro grande, porém um comportamento diferente, como pode ser visto na Figura 26.

Neste caso, onde foi encontrado o terceiro maior erro para a frequência principal, o valor medido foi menor do que o apresentado pelo sensor de referência, mostrando que o erro encontrado não pode ser facilmente modelado e identificado. Neste ensaio, o erro relativo encontrado foi de 45,53%. Se o erro relativo encontrado nos 3 ensaios foi alto, o erro absoluto possui um valor pequeno para a possível dimensão máxima do mensurando. Para estes ensaios citados, o erro absoluto ficou em 0,3785, 0,3491 e 0,1672g^2/Hz. Levando em consideração que o PSD possui uma relação quadrática com a aceleração, é possível justificar que, para uma medição de pequena amplitude de PSD, um erro pequeno na aquisição dos dados leve a um grande erro relativo médio.

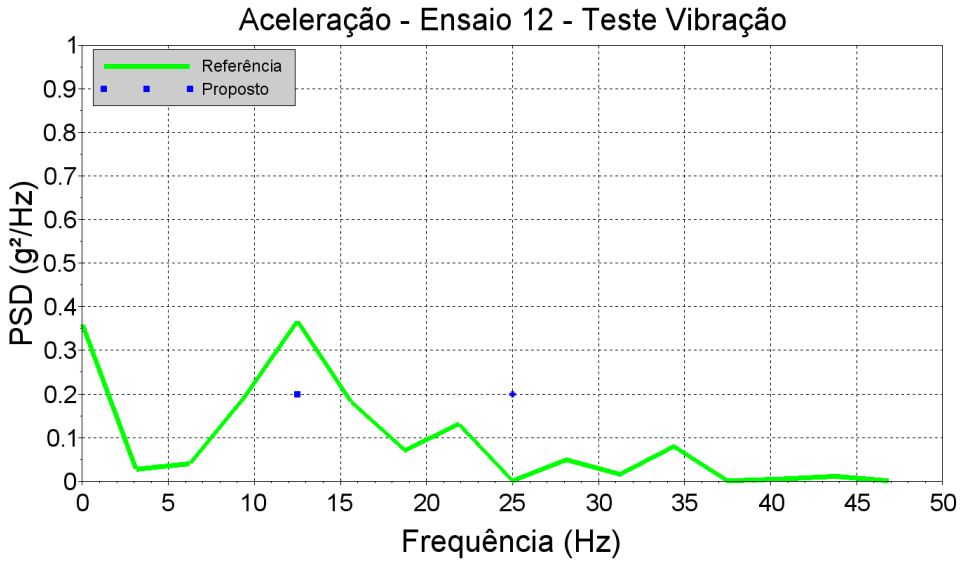


Figura 26: Resultado do Ensaio 12

6.2.2 Ensaios com menor erro relativo

Se por um lado é importante analisar os ensaios com maior erro, também é relevante analisar estes ensaios que possuem o menor erro relativo. Foram obtidos 3 ensaios com erro relativo menor que 10% para a primeira frequência de vibração e 6 ensaios com este erro na segunda frequência.

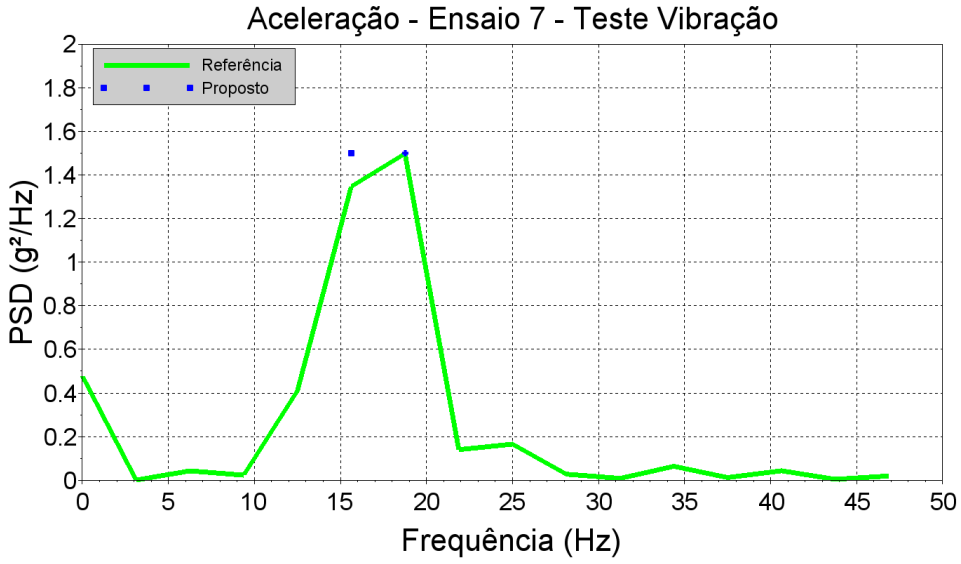


Figura 27: Resultado do Ensaio 7

O menor erro relativo encontrado para a primeira frequência de vibração foi no ensaio 7 (Figura 27), onde foi encontrado um erro de apenas 0,20%. O pequeno erro relativo tam-

bém foi observado na medição da segunda frequência de vibração, que ficou em 11,44%. Além do pequeno erro na amplitude, foi observado que não houve desvios em relação a identificação das frequências identificadas, sendo este o melhor resultado obtido.

Comportamento semelhante foi observado no ensaio 5 (Figura 28), onde o erro relativo encontrado foi de 2,96% e 8,25% para a primeira e segunda frequência de vibração, respectivamente. Neste ensaio, houve uma particularidade, há 4 pontos medidos com amplitude diferentes e em frequências próximas. O sistema reconheceu as frequências principais em torno da frequência máxima observada pelo sensor de referência, não sendo capaz de identificar o ponto mais distante como a segunda frequência de vibração observada. É possível que o resultado deste ensaio tivesse ficado melhor se não houvesse a limitação em frequência.

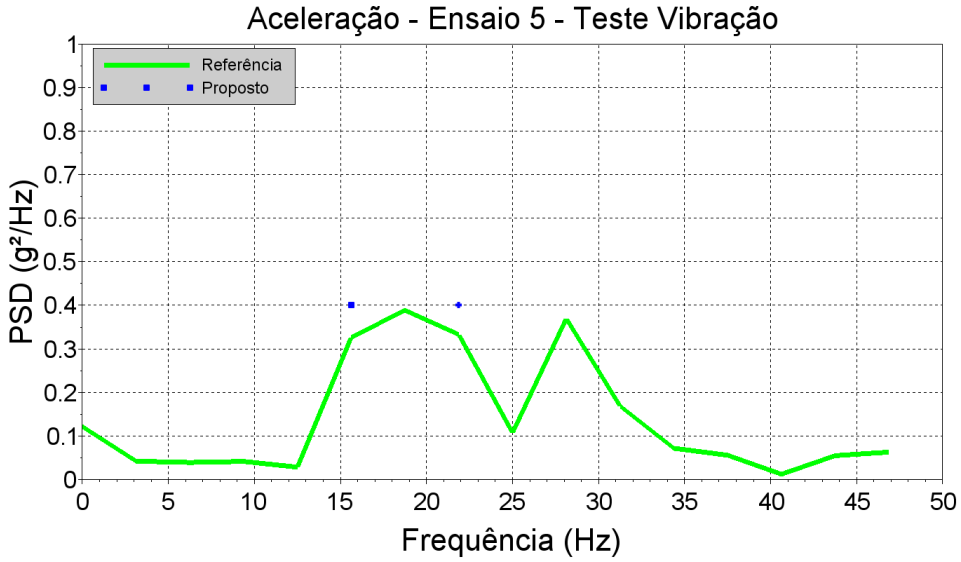


Figura 28: Resultado do Ensaio 5

Por fim, vale a menção do ensaio 15 (Figura 29). Neste ensaio, foi obtido erros de 7,41% e 1,18%, porém foram observados desvios significativos na frequência, que também podem ser explicados pela baixa resolução do sistema proposto. Apesar da limitação, ainda sim foi possível caracterizar a vibração também neste ensaio.

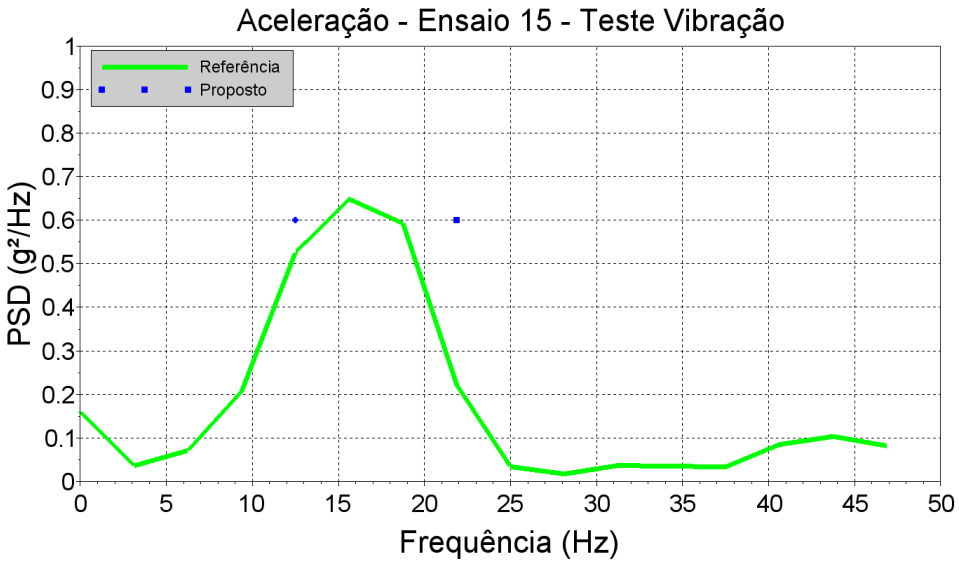


Figura 29: Resultado do Ensaio 15

7 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e testar uma ferramenta que tornasse possível a caracterização da vibração envolvida em processos logísticos usando dos preceitos de uma rede de sensores sem fio. Desta forma, foi despendida atenção a algumas características específicas desta tecnologia, como redução do consumo de energia e do custo financeiro, uma vez que é de interesse uma medição distribuída em diversos pontos deste fenômeno.

Para a redução do consumo de energia, indo além do uso de um hardware de baixo consumo, foram aplicadas técnicas que permitem a qualquer dispositivo um aumento significativo de seu tempo de coleta sem necessidade de uma recarga da bateria, como é o caso de manter o processador em um estado de baixo consumo enquanto não for necessária sua atividade. Além disso, ao realizar o processamento diretamente no nó sensor, foi possível reduzir a quantidade de dados transmitidos em 93,4%. Sendo a transmissão de dados a etapa de principal consumo de energia de um nó sensor, fica evidente a melhoria alcançada por este método.

Como forma de viabilizar uma medição distribuída quando fosse aplicado em campo, não foi utilizados sensores e sistemas de aquisição de alta confiabilidade, uma vez que o custo seria um fator limitante no momento da aplicação. Desta forma, ao utilizar componentes de baixo custo, foram encontradas algumas limitações do sistema, como por exemplo, a baixa resolução em frequência e a pequena banda de passagem, que ficou limitada a 50Hz, o que impossibilitou a caracterização de impactos. Além disso, ao se utilizar um sensor de baixo custo, são encontrados erros maiores, facilmente perceptíveis em um sistema onde a relação entre o sinal adquirido e o dado de saída é quadrática, como é o caso da aceleração e da densidade de espectro de potência deste sinal.

Desta forma, foram encontrados erros médios relativos de 41% no ponto de maior amplitude do PSD e 45% no segundo maior. Por outro lado, o sistema foi perfeitamente capaz de caracterizar as frequências onde se encontravam estas amplitudes, ficando nos dois casos com erros médios absolutos abaixo da resolução. O baixo erro em frequência é um indicativo que, após realizar algumas melhorias no sistema, é possível ser obtido um resultado superior. Como melhorias, podem-se propor as seguintes alterações:

- Retirar o acelerômetro da placa do nó sensor, para fixa-lo diretamente ao corpo de prova;
- Calibrar o acelerômetro antes do uso, desconsiderando a calibração de fábrica;

Com estas melhorias, se encontrada a redução necessária do erro para a correta caracterização da vibração, novos trabalhos podem ser realizados.

7.1 Trabalhos Futuros

Após aplicar as alterações destacadas, novos trabalhos podem ser realizados com o sistema proposto, como por exemplo:

- Estudo de caso em campo, para que a validade da ferramenta seja avaliada por quem realiza estudos na área de hortifrutigranjeiros;
- Utilizar os dados coletados em campo para replicar, em laboratório, as condições encontradas;
- Quantificar a redução do consumo de energia;
- Determinar o tempo máximo de aquisição de dados sem necessidade de recarga da bateria;
- Determinar a incerteza do acelerômetro do sistema proposto;
- Determinar o erro máximo do PSD dada a incerteza encontrada;

REFERÊNCIAS

ADXL345. 2015.

AMMAD-UDDIN, M. *et al*. Wireless sensor network: a complete solution for poultry farming. In: TELECOMMUNICATION TECHNOLOGIES (ISTT), 2014 IEEE 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2014. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2014. p.321–325.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2.ed. [S.l.]: LTC, 2015. v.2.

CHANGE, N. D. **Accelerometer Mounting Considerations**. [S.l.]: Dytran Instruments, INC., 2010.

CHEN, J. *et al*. A novel acceleration data compression scheme for wireless sensor network application in fresh food tracking system. In: ELECTRONIC MEASUREMENT INSTRUMENTS, 2009. ICEMI '09. 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2009. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2009. p.3–1–3–5.

CULIBRINA, F. B.; DADIOS, E. P. Smart farm using wireless sensor network for data acquisition and power control distribution. In: HUMANOID, NANOTECHNOLOGY, INFORMATION TECHNOLOGY,COMMUNICATION AND CONTROL, ENVIRONMENT AND MANAGEMENT (HNICEM), 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2015. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2015. p.1–6.

FIGUEIREDO, L. J. *et al*. **Aplicações de Acelerometros**. [S.l.]: Universidade Tecnica de Lisboa, 2007.

HEIRICH, O. *et al*. Measurement and analysis of train motion and railway track characteristics with inertial sensors. In: INTERNATIONAL IEEE CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC), 2011., 2011. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p.1995–2000.

IBGE. **Pesquisa Suplementar de Segurança Alimentar - PNAD 2013**. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e EstatÃstica, 2013.

JEFFREYÂ KÂ BRECHT, R. by. Fruit Quality and its Biological Basis. Edited by Michael Knee. **The Quarterly Review of Biology**, [S.l.], v.77, n.4, p.460–460, 2002.

KHAIRI, N. A. *et al*. Wireless sensor node for farm monitoring. In: CIRCUITS AND SYSTEMS (ICCAS), 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2013. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2013. p.150–153.

KODALI, R. K.; RAWAT, N. Wireless sensor network in mango farming. In: NIRMA UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING (NUICONE), 2013., 2013. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2013. p.1–6.

LANG, W.; JEDERMANN, R. The intelligent container - What can MEMS do for logistics of food? In: SENSORS, 2015 IEEE, 2015. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2015. p.1–4.

MASSUDA, S. M. **Uso de Acelerometro MEMS para aferir o desempenho de automóveis**. [S.l.]: Centro Universitario de Brasilia, 2007.

MENDI, E. *et al*. Food intake monitoring system for mobile devices. In: ADVANCES IN SENSORS AND INTERFACES (IWASI), 2013 5TH IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON, 2013. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2013. p.31–33.

MULLER, I. *et al*. Namimote: a low cost sensor node for wireless sensor network. In: INTERNET OF THINGS, SMART SPACES, AND NEXT GENERATION NETWORKS., 2012. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. v.1, p.391–400.

RAJPUT, N.; GANDHI, N.; SAXENA, L. Wireless Sensor Networks: apple farming in northern india. In: COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND COMMUNICATION NETWORKS (CICN), 2012 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2012. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2012. p.218–221.

SIKKA, P. *et al*. Wireless ad hoc sensor and actuator networks on the farm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 2006., 2006. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2006. p.492–499.

STUDMAN, C. J. *et al*. BRUISING ON BLUSH AND NON-BLUSH SIDES IN APPLE-TO-APPLE IMPACTS. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, [S.l.], v.v.40, p.1655–1663, 1997.

SWATHY, L.; ABRAHAM, L. Analysis of vibration and acoustic sensors for machine health monitoring and its wireless implementation for low cost space applications. In: COMPUTATIONAL SYSTEMS AND COMMUNICATIONS (ICCSC), 2014 FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2014. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2014. p.80–85.

TIEMAN, J.; SCHMALZEL, J.; KRCHNAVEK, R. Design of a MEMS-based, 3-axis accelerometer smart sensor. In: SENSORS FOR INDUSTRY CONFERENCE, 2002. 2ND ISA/IEEE, 2002. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2002. p.19–23.

TIMM, E. J.; BROWN, G. K.; ARMSTRONG, P. Apple Damage in Bulk Bins During Semi-Trailer Transport. **American Society of Agricultural Engineers**, [S.l.], 1996.

VILELA, N. J. *et al*. O peso da perda de alimentos para a sociedade: o caso das hortaliças. **Horticultura Brasileira**, [S.l.], v.v.21, n.2, p.141–143, abril/junho 2003.

ZEEBROECK, M. V. *et al*. Impact damage of apples during transport and handling. **Postharvest Biology and Technology**, [S.l.], 2007.

APÊNDICE A TRECHO DE CÓDIGO DESENVOLVIDO

```
1  void Adquire_Sensores_ADC(void)
2  {
3
4  #ifdef USAR_ACCEL
5
6  #ifdef BURST_TRESHOLD
7
8      if (acc_multiple == TRUE)
9      {
10         Acc_Read(MULTIPLE);
11         float complex accResultante[tamanhoAmostra];
12                 float complex respFft[tamanhoAmostra];
13         float respPsd[tamanhoAmostra];
14         float accX, accY,accZ,psdMaior=0,psdMaior2=0;
15         uint8_t i;
16         float media=0;
17
18         //Calcula a acc resultante para calculo da fft
19         for(i=0;i<tamanhoAmostra;i++)
20         {
21           accX=AccToFloat(acc_vector[0][i],acc_vector[1][i]);
22           accY=AccToFloat(acc_vector[2][i],acc_vector[3][i]);
23           accZ=AccToFloat(acc_vector[4][i],acc_vector[5][i]);
24           accResultante[i]=sqrtf((accX*accX + accY*accY + accZ*accZ));
25           media=media+accResultante[i];
26         }
27         //Calcula a acc resultante para calculo da fft
28         media=media/tamanhoAmostra;
29          for(i=0;i<tamanhoAmostra;i++)
30         {
31           accResultante[i]=accResultante[i]-media;
32         }
33         //Chama FFT passando acc resultante
34         fft(accResultante,respFft,t,tamanhoAmostra);
35         //Chama PSD passando resposta FFT
36         psd(respFft, respPsd, tamanhoAmostra);
```

```
37          //Procura os dois maiores picos
38          for (i = 0; i <= (tamanhoAmostra/2); i++) {
39            if (respPsd[i] > psdMaior) {
40              psdMaior = respPsd[i];
41              freq1=i;
42            }
43          }
44          for (i = 0; i <= (tamanhoAmostra/2); i++) {
45            if (respPsd[i] > psdMaior2 && i!=freq1) {
46              psdMaior2 = respPsd[i];
47              freq2=i;
48            }
49          }
50          //Coloca na variável correta para envio.
51          psd1H=((int)(psdMaior*100)>>8);
52          psd1L=(int)(psdMaior*100);
53          psd2H=((int)(psdMaior2*100)>>8);
54          psd2L=(int)(psdMaior2*100);
55          acc_multiple=FALSE;
56      }
57  }
58
59  void privateFft(float complex buf[], float complex out[],
60                                      float complex t[], int n, int step)
61  {
62      int i;
63      if (step<n) {
64        privateFft(out,buf,t,n,step*2);
65        privateFft(out+step, buf+step,t,n,step*2);
66        for (i=0;i<n;i+=2*step){
67          buf[i/2]=out[i]+t[i]*out[i+step];
68          buf[(i+n)/2]=out[i]-t[i]*out[i+step];
69        }
70      }
71  }
72  void fft(float complex buf[],float complex output[],
73                   float complex t[],int n)
74  {
75      int i;
76      float complex out[tamanhoAmostra];
77      for (i=0;i<n;i++){
78        out[i]=buf[i];
79        output[i]=buf[i];
80      }
81      privateFft(output, out,t, n, 1);
82  }
83  void psd(float complex fft[], float output[], int n){
84      int i;
```

```
85      float abs;
86      for (i=0; i<n; i++){
87        abs=cabsf(fft[i]);
88        output[i]=(abs*abs)/n;
89      }
90  }
91  //X0=LSB do eixo n, X1=MSB do eixo n
92  float AccToFloat (uint8_t X0, uint8_t X1){
93    float acc;
94    //Conversao de complementos de 2 para decimal
95    if (X1 & 0xF0)
96      acc = (float)(((X1&0x0F)<<8|X0)-4096)/256;
97    else
98      acc = ((float)((X1&0x0F)<<8|X0))/256;
99    return acc;
100 }
```

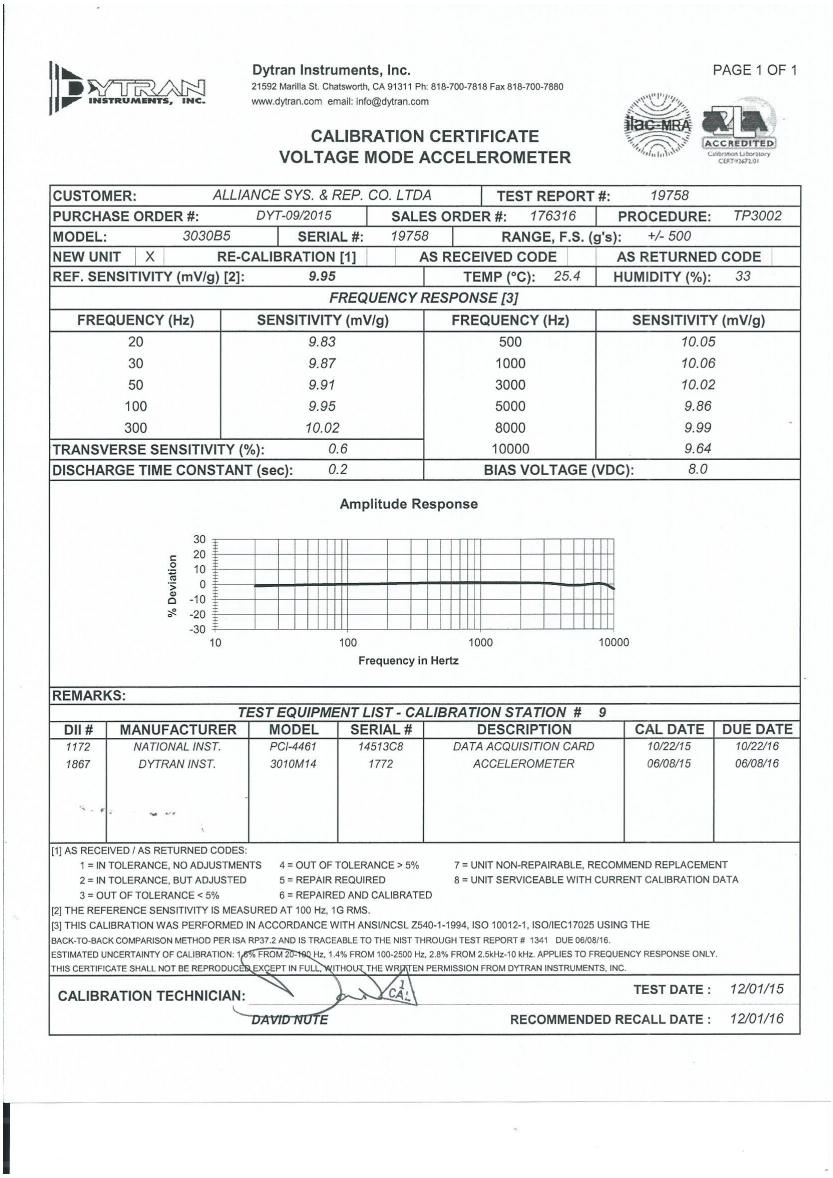
APÊNDICE B FUNÇÕES DE CONFIGURAÇÃO E AQUISIÇÃO DO ACELERÔMETRO

```
 1  uint8_t Acc_Init(void)
 2 {
 3         ATIVA_ACELEROMETRO;
 4         //Escreve a largura de banda do acelerometro
 5     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_BW_RATE);
 6     SPI_Send_byte(0x1A); //0x1A=100Hz
 7     DESATIVA_ACELEROMETRO;
 8
 9
10     ATIVA_ACELEROMETRO;
11     //Desabilita interrupcoes do acelerometro
12     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_INT_ENABLE);
13     SPI_Send_byte(0);
14     DESATIVA_ACELEROMETRO;
15
16     ATIVA_ACELEROMETRO;
17         //Definicao do formato de dados da com. SPI do ACC
18     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_DATA_FORMAT);
19     //SPI_Send_byte(ACC_INT_POLARITY | ACC_FS_16g | ACC_FULL_RES);
20     SPI_Send_byte(0x2B);
21     DESATIVA_ACELEROMETRO;
22
23     ATIVA_ACELEROMETRO;
24     //Coloca o Acelerometro em modo MEASURE
25     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_POWER_CTL);
26         //Argumento = modo de funcionamento
27     SPI_Send_byte(ACC_PWR_MEASURE | ACC_PWR_AUTOSLEEP);
28     DESATIVA_ACELEROMETRO;
29
30     /* Controle de interrupcao por atividade / inatividade */
31     ATIVA_ACELEROMETRO;
32     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_THRESH_ACT);
33         //Limiar de deteccao para interrupcao por aceleracao
34     SPI_Send_byte(0x15);
35     DESATIVA_ACELEROMETRO;
```

```
36
37      ATIVA_ACELEROMETRO;
38      SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_ACT_INACT_CTL);
39  //Programa eixos envolvidos na deteccao de Atividade/Inatividade
40      SPI_Send_byte(ACC_ACT_EIXO_X | ACC_ACT_EIXO_Y | ACC_ACT_EIXO_Z);
41      DESATIVA_ACELEROMETRO;
42
43
44      ATIVA_ACELEROMETRO;
45      SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_FIFO_CTL);
46          //Habilita interrupcoes do acelerometro
47      SPI_Send_byte(0xC1);//  0xC1 = (Modo Trigger, INT1, 1 amostras);
48      DESATIVA_ACELEROMETRO;
49
50      ATIVA_ACELEROMETRO;
51      SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_INT_ENABLE);
52          //Habilita interrupcoes do acelerometro
53      SPI_Send_byte(ACC_INT_ACTIVITY);
54      DESATIVA_ACELEROMETRO;
55  }
56
57  uint8_t Acc_Read(uint8_t mode)
58  {
59      uint8_t x;
60      if (mode == MULTIPLE)
61      {
62        DelayMs(320); //aguarda encher a FIFO
63        for (x=0;x<32;x++)
64        {
65              DelayUs(5);
66              ATIVA_ACELEROMETRO;
67              SPI_Send_byte(ACC_READ_BLOCK | ACC_DATAX0);
    //
68              acc_vector[0][x] = SPI_Receive_byte();
69              acc_vector[1][x] = SPI_Receive_byte();
70              acc_vector[2][x] = SPI_Receive_byte();
71              acc_vector[3][x] = SPI_Receive_byte();
72              acc_vector[4][x] = SPI_Receive_byte();
73              acc_vector[5][x] = SPI_Receive_byte();
74              DESATIVA_ACELEROMETRO;
75          }
76
77      }
78      else{
79        DESATIVA_RTC;
80        ATIVA_ACELEROMETRO;
81        SPI_Send_byte(ACC_READ_BLOCK | ACC_DATAX0);          //
82        acc_X0 = SPI_Receive_byte();
```

```
83        acc_X1 = SPI_Receive_byte();
84        acc_Y0 = SPI_Receive_byte();
85        acc_Y1 = SPI_Receive_byte();
86        acc_Z0 = SPI_Receive_byte();
87        acc_Z1 = SPI_Receive_byte();
88        DESATIVA_ACELEROMETRO;
89      }
90
91      releaseTriggerAcc();
92      ATIVA_ACELEROMETRO;
93      //Le as fontes de interrupcao do  acelerometro
94      SPI_Send_byte(ACC_READ | ACC_INT_SOURCE);
95      SPI_Receive_byte();
96      DESATIVA_ACELEROMETRO;
97      return(OK);
98  }
99
100 void releaseTriggerAcc(void){
101     ATIVA_ACELEROMETRO;
102     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_FIFO_CTL);
103     SPI_Send_byte(0x1F);
104     DESATIVA_ACELEROMETRO;
105     ATIVA_ACELEROMETRO;
106     SPI_Send_byte(ACC_WRITE | ACC_FIFO_CTL);
107     SPI_Send_byte(0xC1);
108     DESATIVA_ACELEROMETRO;
109 }
```

ANEXO A ATESTADO DE CALIBRAÇÃO



Dytran Instruments, Inc.
21592 Marilla St. Chatsworth, CA 91311 Ph: 818-700-7818 Fax 818-700-7880
www.dytran.com email: info@dytran.com

PAGE 1 OF 1

CALIBRATION CERTIFICATE
VOLTAGE MODE ACCELEROMETER

CUSTOMER:	ALLIANCE SYS. & REP. CO. LTDA	TEST REPORT #:	19758
PURCHASE ORDER #:	DYT-09/2015	SALES ORDER #: 176316	PROCEDURE: TP3002
MODEL:	3030B5	SERIAL #: 19758	RANGE, F.S. (g's): +/- 500
NEW UNIT	X	RE-CALIBRATION [1]	AS RECEIVED CODE / AS RETURNED CODE
REF. SENSITIVITY (mV/g) [2]:	9.95	TEMP (°C): 25.4	HUMIDITY (%): 33

FREQUENCY RESPONSE [3]

FREQUENCY (Hz)	SENSITIVITY (mV/g)	FREQUENCY (Hz)	SENSITIVITY (mV/g)
20	9.83	500	10.05
30	9.87	1000	10.06
50	9.91	3000	10.02
100	9.95	5000	9.86
300	10.02	8000	9.99
TRANSVERSE SENSITIVITY (%):	0.6	10000	9.64
DISCHARGE TIME CONSTANT (sec):	0.2	BIAS VOLTAGE (VDC):	8.0

Amplitude Response

REMARKS:

TEST EQUIPMENT LIST - CALIBRATION STATION # 9

DII #	MANUFACTURER	MODEL	SERIAL #	DESCRIPTION	CAL DATE	DUE DATE
1172	NATIONAL INST.	PCI-4461	14513C8	DATA ACQUISITION CARD	10/22/15	10/22/16
1867	DYTRAN INST.	3010M14	1772	ACCELEROMETER	06/08/15	06/08/16

[1] AS RECEIVED / AS RETURNED CODES:
1 = IN TOLERANCE, NO ADJUSTMENTS
2 = IN TOLERANCE, BUT ADJUSTED
3 = OUT OF TOLERANCE < 5%
4 = OUT OF TOLERANCE > 5%
5 = REPAIR REQUIRED
6 = REPAIRED AND CALIBRATED
7 = UNIT NON-REPAIRABLE, RECOMMEND REPLACEMENT
8 = UNIT SERVICEABLE WITH CURRENT CALIBRATION DATA

[2] THE REFERENCE SENSITIVITY IS MEASURED AT 100 Hz, 1G RMS.

[3] THIS CALIBRATION WAS PERFORMED IN ACCORDANCE WITH ANSI/NCSL Z540-1-1994, ISO 10012-1, ISO/IEC17025 USING THE BACK-TO-BACK COMPARISON METHOD PER ISA RP37.2 AND IS TRACEABLE TO THE NIST THROUGH TEST REPORT # 1341 DUE 06/08/16.
ESTIMATED UNCERTAINTY OF CALIBRATION: 1.0% FROM 20-100 Hz, 1.4% FROM 100-2500 Hz, 2.8% FROM 2.5kHz-10 kHz. APPLIES TO FREQUENCY RESPONSE ONLY.
THIS CERTIFICATE SHALL NOT BE REPRODUCED EXCEPT IN FULL, WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION FROM DYTRAN INSTRUMENTS, INC.

CALIBRATION TECHNICIAN: DAVID NUTE
TEST DATE : 12/01/15
RECOMMENDED RECALL DATE : 12/01/16

Figura 30: Atestado de Calibração