

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

NICOLAS DE FREITAS LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES SEM FIO PARA O
MONITORAMENTO DO TRANSPORTE DE FRUTAS E LE-
GUMES**

**PORTOALEGRE-RS
2018**

NICOLAS DE FREITAS LOPES

Desenvolvimento de sensores sem fio para o monitoramento do transporte de frutas e legumes

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgadora como pré-requisito para aprovação na atividade.

Orientador: Valner João Brusamarello

**PORTOALEGRE-RS
2018**

NICOLAS DE FREITAS LOPES

**Desenvolvimento de sensores sem fio para monitoramento do transporte
de frutas e legumes**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia
de Controle e Automação da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, apresentado à Banca Julgado-
ra como pré-requisito para aprovação na atividade.

PORTO ALEGRE, 15 DE JUNHO DE 2018

Banca Examinadora

Prof. Ivan Müller

Prof. Pedro Rafael Bolognese Fernandes

Prof. Renato Ventura Bayan Henriques

Prof. Valner João Brusamarello

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais Tânia Maria de Freitas Lopes e Eduardo Marçal Pereira Lopes, por todo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida e por todos os conhecimentos por eles passados para mim. Ainda no âmbito familiar gostaria de agradecer ao meu avô Armando Valente de Freitas por ter sempre introduzido tecnologias de ponta à mim, fomentando meu interesse por inovações e pela engenharia.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e todos os professores e servidores que me proporcionaram uma formação de excelência.

Aos professores Valner Brusamarello, Ivan Müller e Renar Bender por terem me proporcionado ferramentas, auxílio e conhecimentos necessários para confecção deste trabalho de conclusão de curso.

À todos os meus amigos que sempre me apoiaram e principalmente para meus colegas de apartamento, João Cardoso, Guilherme Fernandes e Jefferson Martinelli que acompanharam minha batalha até o topo.

“Não tenho nenhum talento especial. Sou apenas apaixonadamente curioso”

(Albert Einstein, 1952)

RESUMO

Neste trabalho foi proposta uma solução para a aquisição de dados através de um sistema de redes de sensores sem fio, referentes à aceleração envolvida no transporte de frutas e legumes. Foi projetado e fabricado um invólucro robusto o suficiente para proteger uma placa de circuito impresso muito frágil durante o transporte dos itens em questão. Também foi feita uma implementação em *Firmware* para a utilização dos nós sensores sem a necessidade de um usuário monitorando os dados em tempo real, este contemplou a utilização de um cartão SD em um nó coletor, pois desta maneira todos os dados adquiridos, não somente de aceleração, mas também temperatura e umidade, durante o trajeto, pudessem ser analisados posteriormente. Para a validação do sistema desenvolvido, foi feito um teste de campo, no qual os nós sensores e o nó coletor foram submetidos à uma situação real de aplicação. Estes foram instalados em um caminhão com uma carga de melões e realizaram uma viagem de aproximadamente uma hora. Após o teste de campo pode-se verificar que todo o sistema proposto e desenvolvido obteve resultados satisfatórios. Dados foram coletados e analisados, porém existe ainda uma incerteza quanto à precisão dos mesmos, já que o acelerômetro em questão não foi devidamente calibrado. Este último item fica então para ser realizado em um trabalho futuro.

Palavras chave: Rede de sensores sem fio, Acelerometria

ABSTRACT

This paper proposed a solution to data acquisition thru a wireless network system that involved acceleration in the transport of fruits and vegetables. An involvement was designed and fabricated, who had to be robust enough to protect a very fragile printed circuit board during the transport of the itens quoted before. A Firmware implementation was also developed, so that the sensor nodes could be utilized without the presence of user monitoring the data in real time, this part was developed by using a SD card in the collector node, because this way all the data acquired, not only regarding acceleration, but also regarding temperature and humidity, during the route, could be analyzed afterwards. To validate the developed system, a Field test was conducted, in wich the sensor nodes and the collector node were submitted to a real application situation. They were installed in a truck containing melons and went in a trip by aproximatelly one hour. After this field test, it could be concluded that the results were satisfactory. The data was collected and analyzed, but there is still a certain uncertainty regarding the precision of the data, since the accelerometer used was not properly calibrated. This last item was left to be done in a future study with the same system.

Key Words: Wireless Network System, accelerometry

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais topologias utilizadas na comunicação entre dispositivos.....	20
Figura 2 – Sistema massa mola.	20
Figura 3 - Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS (ACAR e SHKEL., 2003).....	21
Figura 4 - Esquema de ligação entre dispositivos mestre e escravo para o protocolo SPI (PINHEIRO, 2017).....	23
Figura 5 – <i>Hardware</i> utilizado	28
Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado do microcontrolador (NXP, 2010).	29
Figura 7 – Diagrama de blocos do acelerômetro (ANALOG DEVICES, 2009).	30
Figura 8 – Desenho das partes inferior e superior do invólucro em 3D.....	33
Figura 9 – Desenho da parte inferior do invólucro em 3D com correções.....	33
Figura 10 – <i>Hardware</i> inserido no invólucro inferior	34
Figura 11 – <i>Hardware</i> inserido no invólucro completo	34
Figura 12 – Fluxograma referente ao <i>Firmware</i> desenvolvido	36
Figura 13 – Fluxograma referente à análise dos dados	37
Figura 14 – Caminhão utilizado para realizar o ensaio	38

Figura 15 – Nó coletor instalado na cabine ligado à saída 12v	38
Figura 16 – Nó sensor instalado em caixa com melões.....	39
Figura 17 - Nó sensor instalado em caixa com melões	39
Figura 18 – Gráfico referente ao PSD de um dos nós sensores.....	41
Figura 19 – Gráfico referente ao número de incidências por frequência de um dos nós sensores.....	41
Figura 20 – Ensaio para aferição do sistema em questão.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações dos protocolos de comunicação mais utilizados	22
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

BPS – *Bits per Second*

CEASA – Centrais Estaduais de abastecimento

DTFS – *Discrete Time Fourier Series*

DTFT – *Discrete Time Fourier Transform*

FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FIFO – *Fist In First Out*

FFT – *Fast Fourier Transform*

FS – *Fourier Series*

FT – *Fourier Transform*

GMAP – Grupo de Mecânica Aplicada

IDE – *Integrated development Enviroment*

I2C – *Inter Integrated Circuit Protocol*

LASCAR – Laboratório de Controle, Automação e Robótica

MBPS – *Mega Bits per Second*

MEMS – *Micro Electro Mechanical System*

MISO – *Master In, Slave Out*

MOSI – *Master Out, Slave In*

RAM – *Random Access Memory*

ROM – *Read Only Memory*

RSSF – *Rede de sensores sem fio*

PSD – *Power Spectral Density*

SD – *Secure Digital*

SMA – *SubMiniature version A*

SMAC – *Simple Media Access Control*

SPI – *Serial Peripheral Interface*

SS – *Slave Select*

UART – *Universal Assynchronous Receiver/Transmitter*

UFRGS – *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

USB – *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

F Força[N]

m Massa[Kg]

a Aceleração[$\frac{m}{s^2}$]

k Constante Elástica[$\frac{N}{m}$]

x Distância[m]

N Número de Amostras

ω Freqüência[$\frac{rad}{s}$]

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	<i>Objetivos</i>	18
2	Revisão Bibliográfica.....	19
2.2	<i>Redes de sensores sem fio</i>	19
2.3	<i>Acelerometria</i>	20
2.4	<i>Comunicação Serial</i>	21
2.5	<i>Análise de Fourier</i>	23
2.6	<i>Algoritmos eficientes para avaliar a DTFS.....</i>	24
2.7	<i>Relacionando a DTFS com a DTFT.....</i>	24
2.8	<i>Densidade espectral de potência</i>	25
2.9	<i>Estado da arte.....</i>	25
3	Materiais e Métodos.....	28
3.1	<i>Hardware.....</i>	28
3.2	<i>Firmware</i>	30
4	Resultados.....	32
4.1	<i>Estrutura Mecânica</i>	32
4.1.1	<i>Modelo e protótipo 3D</i>	32
4.2	<i>Desenvolvimento do Firmware</i>	35
4.3	<i>Software de leitura dos dados na memória sd.....</i>	36
4.4	<i>Teste de Campo</i>	37
4.4.1	<i>Análise dos dados obtidos no teste de campo.....</i>	40
6	Conclusões.....	43

1 INTRODUÇÃO

A cada dia que passa, novas tecnologias vem sendo desenvolvidas em diversas áreas, uma destas tecnologias é baseada em redes de sensores sem fio (RSSF). Esta tecnologia contempla a miniaturização de sensores de grande capacidade de armazenamento, alta autonomia e baixo consumo de energia, para medições de fenômenos físicos, como forças e acelerações.

Um dos maiores problemas mundiais, se não o maior, é a falta de alimento. Este vem acompanhado do desperdício de alimentos. Segundo Rosanelli (2015), a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura(FAO), estima que, dos 6,7 bilhões de habitantes do planeta, quase 1 bilhão sofre de fome crônica. Uma das principais causas deste problema está diretamente relacionado com o transporte dos alimentos. Com a finalidade de diminuir este desperdício, diversos estudos vem sendo conduzidos para reduzir este fenômeno.

Segundo Martins e Farias (2002), as injúrias mecânicas (batidas, quedas, cortes, esmagamentos, abrasões e rachaduras), têm sido identificadas como as principais perdas na qualidade pós-colheita. O fator econômico também é importante no estudo deste desperdício, foi estimado que por ano, somente o Brasil, perde mais de US\$ 1 bilhão em frutas e hortaliças.

Nesse trabalho foram desenvolvidos nós sensores para serem utilizados na medição da vibração causada pelos meios e seus impactos nos produtos transportados. O sistema de medição consiste de 4 nós sensores dispostos na lateral de caixas dentro de um caminhão usualmente utilizado no transporte. Juntamente com estes há um nó coletor, o qual possui um cartão SD em seu *Hardware*, com a função de armazenamento dos dados recebidos. Os dados são adquiridos através de uma conexão sem fio, utilizando o protocolo SMAC(Simple Media Access Control).

Os dados são processados diretamente no nó coletor e é feito o cálculo do PSD (Power Spectral Density) para caracterizar as principais componentes de vibração resultantes do impacto dos produtos. Em um ensaio vislumbra-se uma viagem, na qual os dados são registrados e gravados em um cartão de memória para análise posterior.

Este trabalho está sendo desenvolvido no LASCAR – Laboratório de Controle, Automação e Robótica em parceria com a Faculdade de Agronomia da UFRGS, do departamento de Horticultura e Silvicultura. Esta parceria já dura alguns anos e este trabalho de conclusão de curso é uma continuação de um trabalho iniciado em 2016. Todo o *Hardware* e a parte do *Firmware* que envolve os cálculos necessários e a comunicação entre os periféricos foram desenvolvidos por pessoas envolvidas no projeto.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos principais:

- projeto de um invólucro robusto para armazenar um sistema de medição e armazenamento de dados sem fio.
- desenvolver um *Firmware* para coleta de dados provenientes de um acelerômetro, contido no um *Hardware* já existente, através do armazenamento destes em um cartão SD e posterior visualização em um *Software* que tenha a capacidade de ilustrar os dados coletados em forma de gráficos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é apresentada uma breve revisão dos principais tópicos envolvidos nesse Trabalho de Conclusão de Curso.

2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO

Atualmente as RSSF (Redes de sensores sem fio) se popularizaram bastante com o avanço na eletrônica, através da miniaturização e baixo consumo de circuitos integrados, assim como na comunicação sem fio.

Um sistema de RSSF é constituído basicamente de nós sensores e nós controladores. Estes por sua vez são compostos de microcontroladores, baterias e circuitos integrados que medem diversas grandezas, assim como aceleração, temperatura, umidade, entre outras.

Este tópico é importante na aplicação, uma vez que o uso destas redes permite efetuar medições de grandezas em locais de difícil acesso para um sistema de sensoriamento com fio tradicional, como na instrumentação no transporte de frutas e legumes. Seria muito trabalhoso e complexo instalar um sistema com fio nesta aplicação, onde a necessidade da conexão dos sensores à uma central de processamento e armazenamento de dados seria imprescindível. Outra vantagem do sensoriamento sem fio é relacionado com o número de sensores que podem ser instalados, já que a instalação torna-se extremamente mais simples com estes.

No presente trabalho, a topologia utilizada é do tipo estrela, consistindo de 4 nós sensores se comunicando com o nó coletor. A Figura 1 ilustra esta e outras topologias de comunicação entre dispositivos.

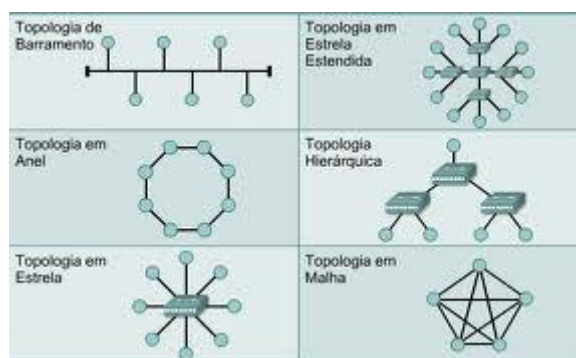


Figura 1 – Principais topologias utilizadas na comunicação entre dispositivos

2.3 ACELEROMETRIA

Quando a grandeza física a ser mensurada é a vibração, os instrumentos de medição utilizados fazem parte da classe de acelerometria, que é composta basicamente por acelerômetros.

Um acelerômetro é basicamente um sensor para detecção de movimento de um sistema massa mola. Uma representação conceitual do sistema é ilustrado na Figura 2.

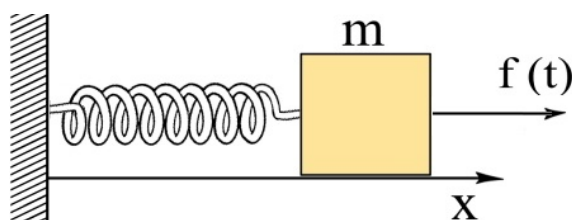


Figura 2 – Sistema massa mola.

Por meio das leis de *Newton* e *Hooke*, ilustradas pela Equação 1 e Equação 2, pode-se obter a aceleração de um corpo sabendo-se somente o deslocamento que este sofreu, sendo K (constante da mola) e a massa m , parâmetros construtivos previamente conhecidos.

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

$$F = k \cdot x \quad (2)$$

Existem diversos tipos de acelerômetros e os mais usuais são os piezoelétricos, piezoresistivos e capacitivos, cada um abrangendo uma área mais dedicada da acelerometria. Abaixo tem-se uma breve descrição destes e os casos onde são utilizados:

- Piezoelétricos - Uma massa sob aceleração causa compressão ou cisalhamento de um cristal piezoelétrico. A diferença de potencial gerada pelo cristal piezoelétrico

é proporcional à aceleração. Utilizado em medições de alta frequência e alta magnitude, como motores e sistemas rotativos em geral (MAGALHÃES, 2017).

- Piezoresistivos - Nestes, uma massa sob aceleração causa tensão na estrutura interna do sensor, a qual tem extensômetros montados. A mudança de resistência elétrica do extensômetro é proporcional à tensão mecânica aplicada, que por sua vez é proporcional à aceleração. É utilizado em medições de baixa frequência, choques mecânicos, transientes de longa duração e possui alta sensibilidade (MAGALHÃES, 2017).
- Capacitivos - A estrutura interna do acelerômetro possui um micro sensor com placas paralelas formando um dispositivo capacitivo. A aceleração causa o movimento das placas, alterando-se assim a folga entre elas, e conseqüentemente a capacitância do sistema. É utilizado em medições de baixa frequência e em acelerações de baixa magnitude (MAGALHÃES, 2017).

A partir do uso destes conceitos e com o auxílio da microeletrônica, foi introduzido no fim dos anos 80 o conceito de Sistema Microeletromecânico, ou MEMS (*Micro Electro Mechanical System*). Neste conceito foram desenvolvidos acelerômetros com esta tecnologia. Esta idéia é melhor ilustrada na Figura 3.

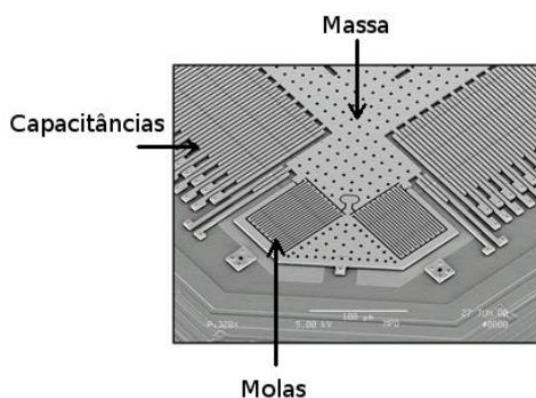


Figura 3 - Fotografia microscópica de um acelerômetro MEMS (ACAR e SHKEL., 2003).

Esse tópico, que versa sobre acelerometria, é importante na aplicação final porque espera-se medir, através desta metodologia o impacto entre frutas durante seu transporte.

2.4 COMUNICAÇÃO SERIAL

Todos os dispositivos eletrônicos atuais presentes na vida do ser humano são compostos basicamente por circuitos integrados. Estes por sua vez necessitam de comunicação entre si

para que troquem informações. Existem diversos tipos de protocolos que efetuam esta comunicação, segundo Rennó(2017), os mais comuns utilizados atualmente são a UART(RS232), o SPI(*Serial Peripheral Interface*) e o I2C(*Inter-Integrated Circuit Protocol*). Estes por sua vez tem suas características ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações dos protocolos de comunicação mais utilizados

Tecnologia	Barramento	Velocidade	Modo
UART(RS232)	2 fios + terra	Máx: 115.200bps	Assíncrono full duplex
SPI	3 ou 4 fios + terra	Maior que 10Mbps	Síncrono full duplex
I2C	2 fios + terra	Máx: 3,4Mbps	Síncrono Half duplex

Neste trabalho será dada ênfase no protocolo SPI, pois é este que será utilizado para troca de informações entre o microcontrolador e um acelerômetro. Este é um protocolo síncrono de alta velocidade, como pode ser verificado na Tabela 1. Por ser um protocolo síncrono, necessita de uma linha de *clock* para sincronismo dos dados. Além do sinal de *clock*, são utilizados também outros três sinais na comunicação, sendo dois deles para comunicação, o MISO(*Master In, Slave Out*), o MOSI(*Master Out, Slave In*) e por fim um sinal chamado SS(*Slave Select*), que escolhe com qual escravo o microcontrolador se comunicará. As ligações físicas deste protocolo são ilustradas melhor na Figura 4.

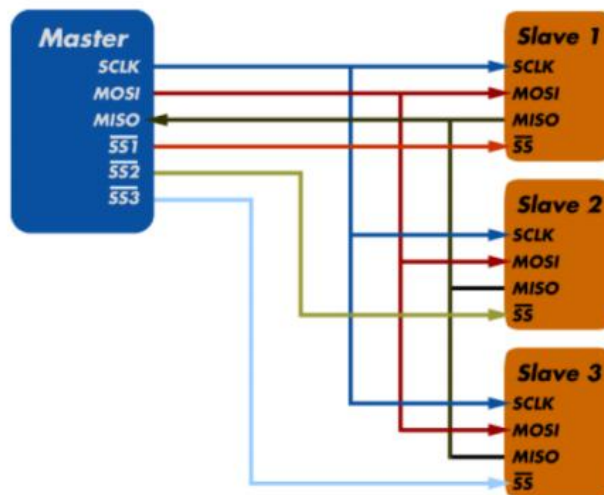


Figura 4 - Esquema de ligação entre dispositivos mestre e escravo para o protocolo SPI (PINHEIRO, 2017).

2.5 ANÁLISE DE FOURIER

Os métodos de Fourier têm aplicação difundida indo além dos sinais e sistemas; eles são usados em todos os ramos da engenharia e da ciência (HAYKIN e VAN VEEN, 2003).

A análise de Fourier é composta por quatro operações matemáticas, são elas:

- FT – *Fourier Transform*
- FS – *Fourier Series*
- DTFT – *Discrete Time Fourier Transform*
- DTFS – *Discrete Time Fourier Series*

O par DTFS pode ser avaliado usando-se as equações descritas na Equação 3 e na Equação 4:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jk\Omega_0 n} \quad (3)$$

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{jk\Omega_0 n} \quad (4)$$

A representação pelos coeficientes da DTFS também é conhecida como representação de domínio de frequência, porque cada coeficiente da DTFS é associado com uma senóide complexa de frequência diferente (HAYKIN e VAN VEEN,2003).

2.6 ALGORITMOS EFICIENTES PARA AVALIAR A DTFS

O papel da DTFS como ferramenta computacional é grandemente ampliado pela disponibilidade de algoritmos eficientes para avaliar a DTFS direta e inversa. Esses algoritmos são chamados coletivamente como transformadas rápidas de Fourier ou algoritmos FFT (*Fast Fourier Transform*). Estes algoritmos rápidos operam de acordo com o princípio "dividir para conquistar", dividindo a DTFS numa série de DTFS de ordem menor e explorando as propriedades de simetria e periodicidade da senóide complexa descrita na Equação 5. Menos computação é necessária para avaliar a DTFS original.

$$e^{jk2\pi n} \quad (5)$$

O cálculo direto da Equação 4 para um único valor de n , requer N multiplicações complexas e $N-1$ adições complexas. Dessa forma a computação de $x[n]$, $0 \leq n \leq N-1$ requer N^2 multiplicações complexas e N^2-N adições complexas. O algoritmo da FFT divide o cálculo de uma série de N pontos em duas 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 do tamanho 2^x , $\forall x \in \mathbb{N}^*$.

Os algoritmos FFT para N que seja a potência de dois requerem multiplicações complexas na ordem de $N \log_2(N)$. Isto pode representar uma economia de computação extremamente grande em relação a N^2 quando N é muito grande. Por exemplo, se $N=2^{13}=8192$, a abordagem direta exige aproximadamente 630 vezes mais operações aritméticas do que o algoritmo FFT.

2.7 RELACIONANDO A DTFS COM A DTFT

Os coeficientes da DTFS de um sinal de duração finita correspondem às amostras da DTFT divididas pelo número de coeficientes da DTFS, N . Como a FFT calcula N vezes os coeficientes da DTFS, esta conseqüentemente avalia diretamente as amostras da DTFT de um

sinal de duração finita. Portanto os algoritmos FFT mostram excelência para calcular coeficientes de amplitudes de acelerações em diferentes frequências a partir de um sinal único.

2.8 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A densidade espectral de potência, ou PSD (*Power Spectral Density*) define a densidade de potência por unidade de banda em função da frequência (potência média por unidade de banda) de um sinal. Esta, é formalmente a Transformada de Fourier da função de autocorrelação (FILHO, 2002). Segundo Lages(2004), o PSD pode ser descrito segundo a Equação 6.

$$S(\omega) = \frac{1}{T} |H(\omega)|^2 \quad (6)$$

Porém a análise em questão no presente trabalho de conclusão de curso é feita de forma discreta, portanto o PSD é descrito conforme a Equação 7. Onde N é o número de amostras do sinal no tempo obtido e H(k), sua respectiva Transformada de Fourier.

$$S(k) = \frac{1}{N} |H(k)|^2 \quad (6)$$

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 (BALLESTRIN, 2016).

Nesse trabalho, a potência de espectro de algumas raias foi utilizada para quantizar o impacto entre os produtos transportados. Essa estratégia foi adotada pela necessidade de utilização mínima de recursos de sistema para a economia de energia e conseqüente otimização de uso da bateria. Assim, são registrados apenas as duas componentes de frequência com maior potência e descartadas as demais. O *Firmware* relativo ao calçudo da densidade espectral de potência foi desenvolvido pelo aluno Rogério Ballestrin, em seu Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, no ano de 2016.

2.9 ESTADO DA ARTE

Nesta seção serão abordados estudos já feitos sobre coleta de dados sem fio no transporte de frutas e legumes. Estes tem como principal tema agricultura de precisão, redes de sensores sem fio, acelerometria e dispositivos portáteis.

Conforme o artigo exibido no XXXV Simpósio Brasileiro de telecomunicações e processamento de sinais, apresentado por Marinho et al(2017), O desenvolvimento das comunicações sem fio e da eletrônica, trouxeram a visão de Redes Sensores Sem Fio (RSSF) a uma realidade na qual tem-se aumentado, cada vez mais, a busca pelo baixo custo e baixo consumo de energia. Fenômenos naturais tais como temperatura, luz, som e pressão são capturados no mundo real e convertidos em sinais por dispositivos denominados sensores e, em seguida, transmitidos para serem mensurados e analisados. Assim, uma RSSF é formada por um número variado de nós, sendo cada um desses nós constituído, basicamente, de um microcontrolador, de uma fonte de alimentação, transceptor e dispositivo sensor.

Já no artigo escrito por Alcantud e Rosa(2017), a aplicação das redes de sensores sem fio no acompanhamento de culturas agrícolas pode contribuir nas tomadas de decisões, no aumento da produtividade e no uso racional da água. As principais vantagens na utilização das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são a ausência de cabeamento e a flexibilidade, podendo ser utilizada principalmente em áreas de difícil acesso, com maior agilidade na instalação – na modificação, quando for o caso -, menor custo operacional, podendo, inclusive, conciliar diferentes topologias.

Em sua dissertação de mestrado, Muller(2008) escreveu que as perdas de frutas, hortaliças e flores após a colheita são atribuídas a muitos fatores: ocorrência de podridões, senescência acelerada ou perda de qualidade visual ou gustativa. Em muitos dos casos de descarte de produtos hortícolas, a causa primária pode ser atribuída a danos mecânicos. Impactos e compressões, às vezes não visíveis, resultam em oportunidades para o estabelecimento de fungos ou bactérias sendo então estes últimos considerados como causas primárias. Com o intuito de contribuir para a diminuição de perdas de frutas, desenvolveu-se este trabalho no qual são propostas quatro esferas instrumentadas para quantificar os impactos e compressões sofridas por frutas durante o processo de colheita, seleção e transporte das mesmas.

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 triaxial, 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.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 HARDWARE

O Hardware utilizado neste presente trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido pelo LASCAR. Este possui sensores de temperatura, luminosidade e aceleração, conforme ilustra a Figura 5. Além destes sensores, o Hardware em questão possui também um conector Mini USB, este é utilizado para carregar uma bateria de íons de lítio que fornece 800mAh para alimentação do *Hardware*, além desta função, este também pode servir como via de comunicação, já que os dados recebidos pelo nó coletor podem ser transmitidos via Serial para um computador através de um cabo USB. O mesmo possui também dois conectores SMA que são utilizados para enviar dados no caso de um nó sensor e receber dados no caso de um nó coletor. Um *slot* para cartões SD também está presente no *Hardware*, este possui um papel importante no desenvolvimento deste trabalho, já que será este o responsável pelo armazenamento dos dados obtidos através dos nós sensores.

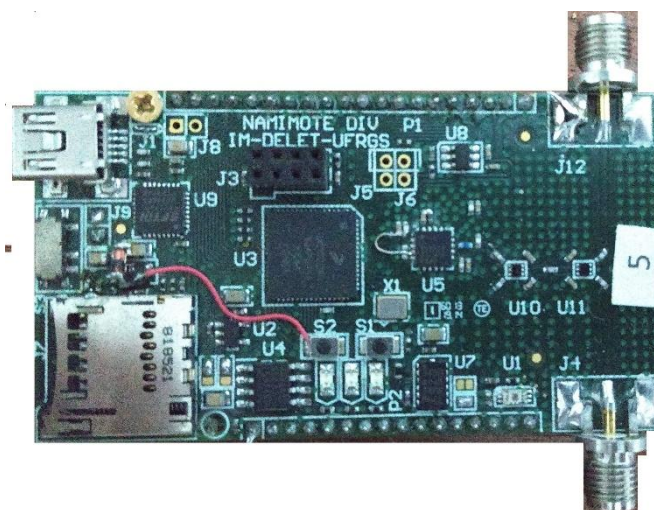


Figura 5 – Hardware utilizado

O microcontrolador utilizado é um MC13224, com processador de 32 bits ARM7, que possui uma combinação de memórias ROM, RAM e *Flash*, do fabricante NXP. Este microcontrolador possui um radio *frequency transceiver* de 2.4GHz com baixo consumo de energia e rádio IEEE.802.15.4 (NXP, 2010). O diagrama de blocos simplificado do mesmo é ilustrado na Figura 6.

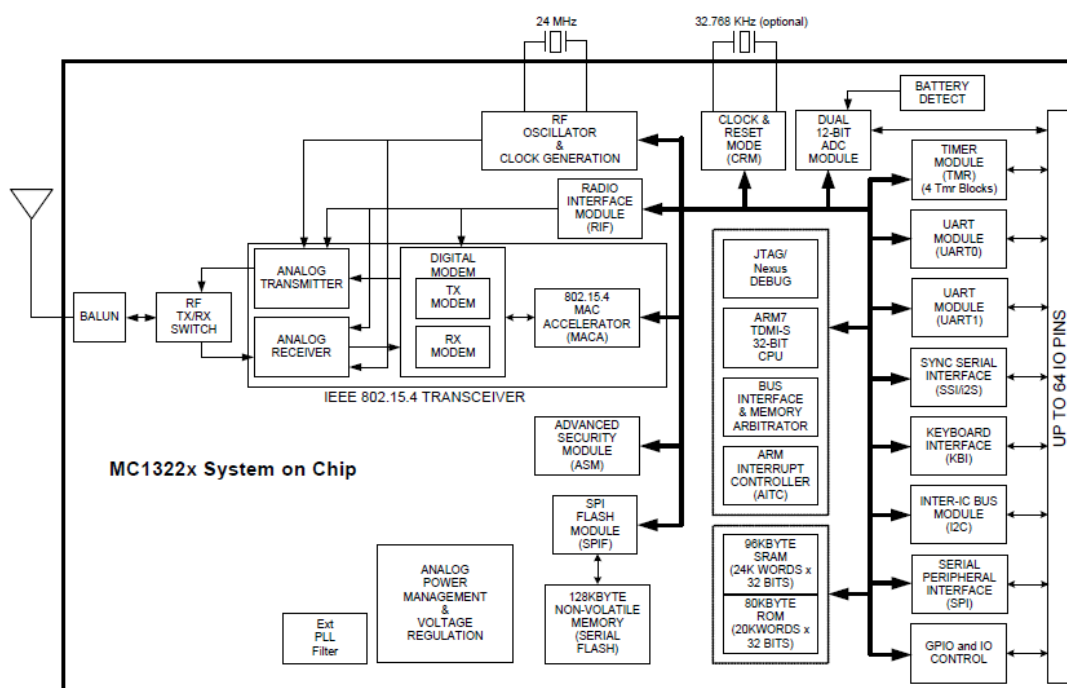


Figura 6 – Diagrama de blocos simplificado do microcontrolador (NXP, 2010).

O acelerômetro utilizado no *Hardware* em questão é um ADXL345, do fabricante *Analog Devices*. Ele é pequeno, fino e de baixo consumo, com medições de até 16g em três eixos. Os dados de saída são digitais formatados em 16 bits em complemento de dois e podem ser acessados através dos protocolos SPI ou I2C. Este é ideal para aplicações em dispositivos móveis. Este pode medir aceleração estática da gravidade, assim como acelerações provenientes de movimento ou choques. Há duas entradas de interrupção no mesmo, feitas para identificação de movimento. Existe também um buffer FIFO, com 32 posições, que no caso pode ser utilizado para armazenamento de dados, para minimizar o uso do processador. O diagrama de blocos do ADXL345 é ilustrado na Figura 7. (ANALOG DEVICES, 2009)

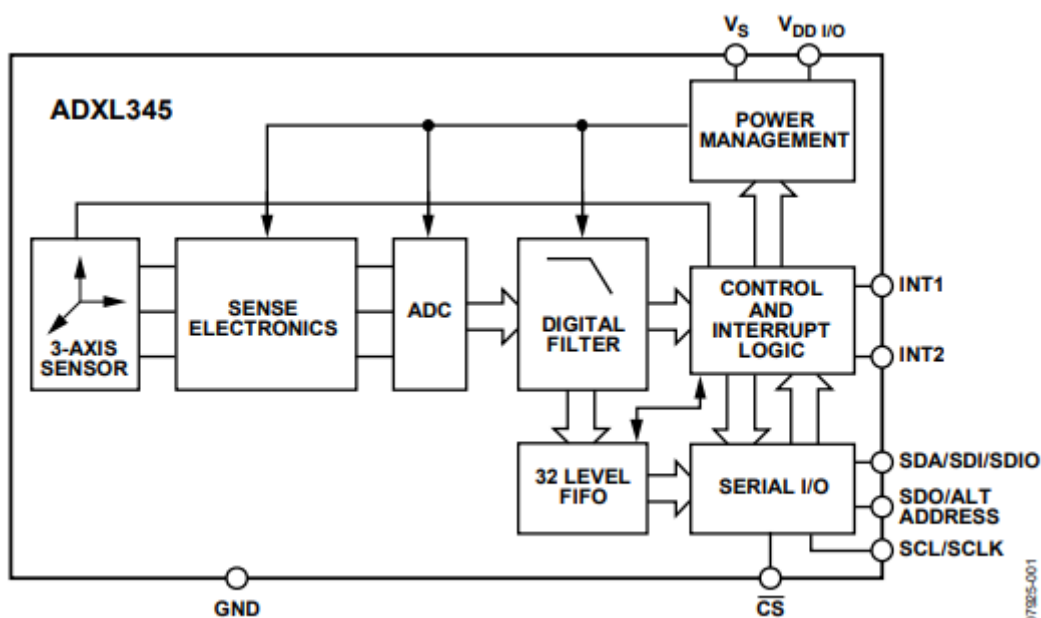


Figura 7 – Diagrama de blocos do acelerômetro (ANALOG DEVICES, 2009).

Este acelerômetro possui vários modos de funcionamento. Para a aplicação em questão foi utilizado o modo *trigger*. Neste modo, é configurada uma magnitude mínima de aceleração que ativa o acelerômetro e em seguida preenche os 32 níveis do *buffer*. Sendo assim, cada amostra de acelerações no domínio tempo possui 32 valores. Após o preenchimento do *buffer*, os dados são processados pelo nó sensor e enviados ao nó coletor.

Como escrito anteriormente, um dos objetivos do trabalho era desenvolver o firmware para o armazenamento dos dados. Uma vez que existia um *slot* para cartão SD no *Hardware*, porém este não era utilizado.

3.2 FIRMWARE

O *Firmware* utilizado para desenvolver a aplicação foi feito na IDE IAR *Embedded-Workbench*, um compilador com suporte às linguagens C/C++ e *Assembler*.

A base do *Firmware* foi fornecido pelo mesmo laboratório que construiu o *Hardware*, porém este continha um código de armazenamento de dados no cartão SD que não se encaixava com o propósito deste trabalho e então teve que ser reescrito. Neste trecho de código foi reescrito um outro que armazenasse os dados dos nós coletores em um arquivo de texto(.txt),

com as informações sobre identificação do sensor, um contador de incidência, bateria, temperatura, umidade e PSD.

O *Firmware* deve possuir duas versões, uma delas para o nó controlador e outra para o nó sensor. O nó sensor deve coletar dados de temperatura, umidade e aceleração do ambiente no qual está instalado. Quanto aos dados de aceleração, o próprio nó sensor é responsável pelo tratamento dos dados. Ele coleta os dados das acelerações em X, Y e Z, em seguida faz o cálculo da magnitude do vetor resultante, então realiza o cálculo da FFT com relação à magnitude deste vetor e por fim, efetua o cálculo do PSD deste sinal. Ao final destes cálculos, o nó sensor envia os dados para o nó coletor. O nó coletor por sua vez deve receber estes dados de vários sensores e armazena estes em um buffer, quando este atinge seu tamanho máximo, de 512 bytes, faz a escrita no cartão SD.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo descrever os resultados obtidos no projeto e desenvolvimento do invólucro para o *Hardware* e na escrita do *Firmware* para armazenamento de dados em memória não volátil.

4.1 ESTRUTURA MECÂNICA

O *Hardware* descrito na seção 3.1 consiste de uma placa de circuito impresso, e consequentemente muito frágil para a aplicação vislumbrada. Dessa forma, um dos objetivos do trabalho foi desenvolver um invólucro robusto o suficiente para suportar as vibrações de uma viagem através de uma estrada convencional, a qual pode apresentar uma série de adversidades, como buracos e desníveis repentinos.

4.1.1 Modelo e protótipo 3D

Para a fabricação do invólucro foi feito um protótipo no *Software Solidworks*. Com o auxílio de um paquímetro foram tiradas as medidas do *Hardware* e então desenvolvido o invólucro ilustrado na Figura 8.

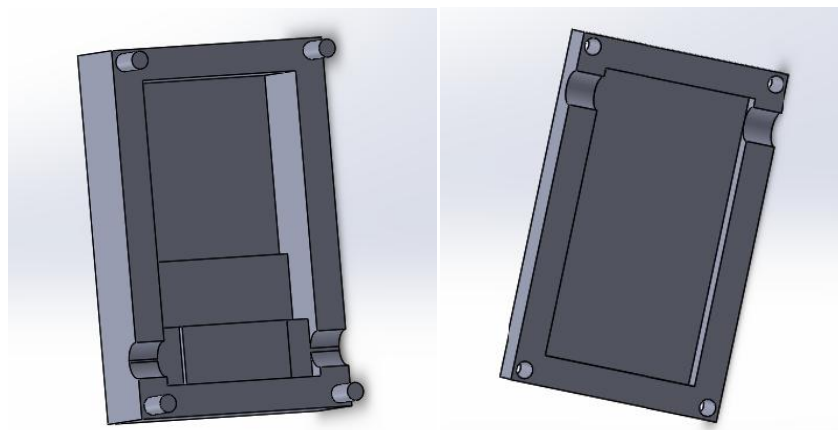


Figura 8 – Desenho das partes inferior e superior do invólucro em 3D

Ao fabricar estes invólucros em ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), através de uma impressora 3D, e tentar encaixá-los no *Hardware*, foi verificado que os mesmos não eram compatíveis, devido à tolerância da máquina, a qual não foi considerada inicialmente. Outro problema detectado nesta configuração foi o modo no qual as duas peças se encaixavam, feita através de um sistema macho-fêmea com cilindros maciços. No primeiro encaixe estes já se quebraram, impossibilitando o uso dos mesmos, caso fossem compatíveis.

A fim de corrigir os erros, foi feita uma nova versão do invólucro, com um mecanismo de fixação melhorado e levada em conta a tolerância da impressora 3D, que no caso é de 1mm. Com as devidas correções o invólucro teve uma configuração conforme ilustra a Figura 9.

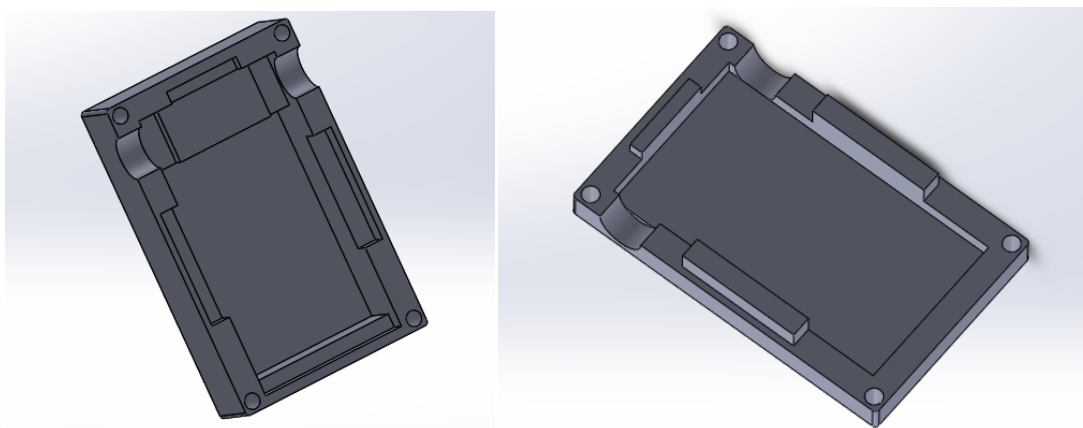


Figura 9 – Desenho da parte inferior do invólucro em 3D com correções

Além das correções citadas anteriormente foram feitos furos nos cantos do invólucro para que este fosse fixado com parafusos M4.

Após a fabricação dos mesmos foi verificado que o *Hardware* ainda não encaixou-se perfeitamente. O invólucro ainda teve que ser lixado para que um encaixe perfeito fosse obtido. Após este ajuste, foi obtido o resultado ilustrado na Figura 10 e na Figura 11.



Figura 10 – *Hardware* inserido no invólucro inferior



Figura 11 – *Hardware* inserido no invólucro completo

Ao final, pode-se averiguar que o invólucro demonstrou bastante robustez e deve ser capaz de proteger a placa de circuito impresso durante um ensaio de campo. É importante salientar que o invólucro foi projetado somente para proteção contra avarias de natureza mecânica.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

Conforme descrito no Capítulo 1.1, foi necessária a implementação de um *Firmware* que pudesse utilizar o *slot* para cartão SD.

O *Firmware* existente para o nó sensor já possuía a função que enviava os dados medidos por ele. Estes dados são enviados por meio de *frames*. Cada *frame* possui 14 *bytes*, sendo cada destes, um caracter em hexadecimal. O primeiro *byte* do *frame* é a ID de cada nó sensor, para que quando os dados do cartão sejam analisados seja possível identificar qual sensor captou quais dados. O segundo *byte* corresponde a um contador que foi inserido no *Firmware* de cada nó sensor, para que caso algum *frame* seja perdido, ou seja reescrito durante a comunicação, este erro seja identificado. Os próximos dois *bytes* são a informação do nível de tensão da bateria, para que um acompanhamento da duração desta seja feito durante a análise dos dados. Após estes, o *frame* é composto dos dados de medição, sendo os próximos dois *bytes* os dados da temperatura ambiente, outros dois para a umidade relativa do ar e finalmente os últimos doze *bytes* estão relacionados à análise das vibrações. Destes doze, seis são para o PSD da maior amplitude e seis para a menor amplitude, destes seis, dois deles são referentes à frequência na qual o nó sensor foi submetido e quatro deles referentes à amplitude da vibração.

O *Firmware* foi especificado com uma taxa de amostragem de 100Hz, de modo que de acordo com o teorema da amostragem de Nyquist, a aquisição de dados é feita para valores até 50Hz (HAYKIN e VAN VEEN, 2003).

Para o nó coletor foi desenvolvido um programa para armazenar estes *frames*, através de bibliotecas SD.h e SD.c. Este foi escrito de tal maneira que quando a memória do microcontrolador, de 512 *bytes* é preenchida, os 17 *frames* contidos na mesma são escritos no cartão SD.

Durante a elaboração do *Firmware*, foram conduzidos diversos testes para verificar a funcionalidade do mesmo. O teste final consistiu em ligar os nós sensores e o nó controlador, verificando o LED de comunicação, uma vez que esta foi estabelecida, foram geradas excitações impulsivas nos nós sensores. Em seguida foi removido o cartão SD do nó coletor e o arquivo gerado pelo mesmo deveria conter, nos últimos 14 *bytes*, valores diferentes de zero, o que de fato ocorreu, demonstrando a funcionalidade do mesmo. Um fluxograma mais explicativo é ilustrado na Figura 12.

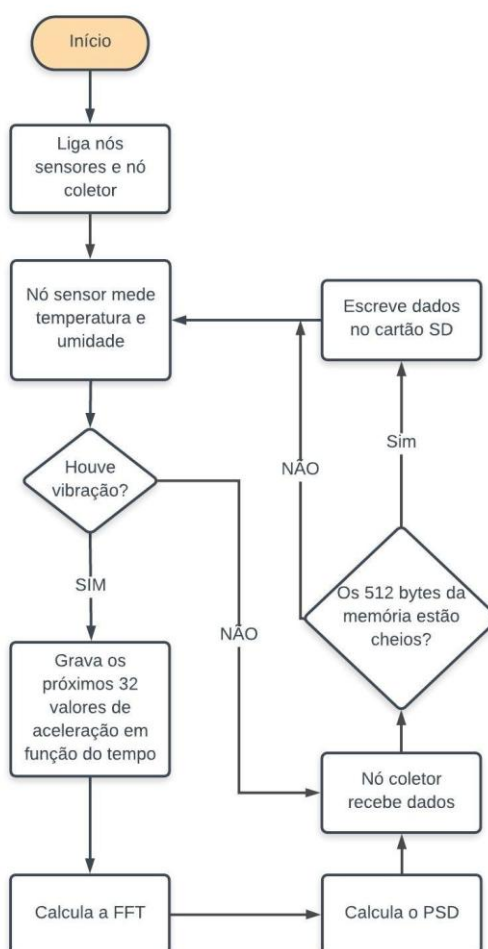


Figura 12 – Fluxograma referente ao *Firmware* desenvolvido

4.3 SOFTWARE DE LEITURA DOS DADOS NA MEMÓRIA SD

O tratamento destes dados foi efetuado primeiramente no *Software Microsoft Excel*, transformando os mesmos de hexadecimal para decimal e em seguida efetuando cálculos para conversão de unidades. Após, é utilizado um script no *Software Mathworks Matlab*. Este *script* plota os dados obtidos em gráficos de forma discreta para melhor visualização destes. Além de plotar os dados, também foi desenvolvido um código que efetua uma contagem de quantos eventos ocorreram para cada frequência.

O fluxograma das operações feitas para se obter os gráficos par análise dos dados é ilustrado na Figura 13.

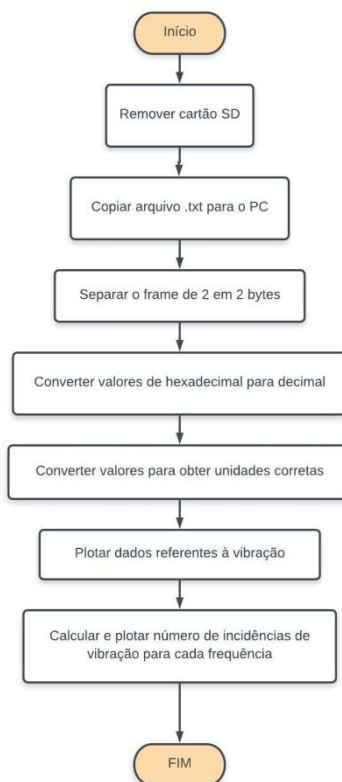


Figura 13 – Fluxograma referente à análise dos dados

4.4 TESTE DE CAMPO

Para verificar se o invólucro atendia os requisitos desejados para este presente trabalho, foi feito um contato com o professor Renar Bender, professor Dr. do departamento de Horticultura e Silvicultura da faculdade de agronomia da UFRGS, este já havia feito alguns estudos de caso com sensoriamento no transporte de frutas. Após o contato, este professor se mostrou disposto a colaborar com o presente trabalho de conclusão de curso. O mesmo então foi instruído à utilizar os sensores e colocou estes em um carregamento de melões que saiu da CEA-SA em Porto Alegre e foi até Torres no caminhão ilustrado na Figura 14. Houve uma preocupação com a duração da bateria do nó controlador, pois o professor Renar Bender realizou a instalação e ligou os sensores às 18h e o caminhão saiu somente às 6h da manhã do dia seguinte, portanto este foi instalado na cabine do mesmo conectado à uma fonte ligada a saída de 12v, conforme ilustra a Figura 15.



Figura 14 – Caminhão utilizado para realizar o ensaio



Figura 15 – Nó coletor instalado na cabine ligado à saída 12v

Após a instalação do nó coletor, foram instalados quatro nós sensores no compartimento de carga do caminhão, conforme ilustra a Figura 16 e a Figura 17.



Figura 16 – Nó sensor instalado em caixa com melões



Figura 17 - Nó sensor instalado em caixa com melões

Após a devida instalação dos nós sensores e do nó coletor, o caminhão ilustrado na Figura 14 fez então a sua viagem até o município de Torres, descarregou a carga e retornou à Porto Alegre. Quando este retornou os dispositivos foram resgatados e uma análise dos dados pode ser feita. Para surpresa do autor, quando foi lido o conteúdo do cartão SD, verificou-se que durante a viagem do caminhão não foram coletados os dados de vibração. Acredita-se que este fenômeno ocorreu devido à falha entre a comunicação entre os nós sensores e o nó controlador. Foram realizados diversos testes durante a fase de implementação do novo *Firmware*, sendo um deles o teste de distância entre os nós. Durante estes testes foi verificado que à uma distância de aproximadamente 50m, com alguns obstáculos os nós sensores efetuaram

uma comunicação perfeita com o nó coletor. Portanto este primeiro experimento foi descartado e foi feito um outro de modo similar.

Durante o primeiro experimento foi verificado que a bateria do nó coletor não sofreria um desgaste tão grande diante das circunstâncias apresentadas. Durante o próximo experimento, o nó controlador não obteve uma fonte de alimentação, e sim foi posicionado ao lado dos nós sensores. Neste, foi implementada a mesma metodologia do ensaio anterior, porém um caminho mais curto foi percorrido. Neste, o Professor Renar Bender instalou os nós sensores e o nó controlador no compartimento de carga de um caminhão com menor porte, de 2 eixos, no município de São Sebastião do Caí, situado a aproximadamente 64km de Porto Alegre às 18h. Às 21h o caminhão saiu do seu ponto de partida e chegou ao destino às 22h. Os nós foram coletados pelo mesmo Professor próximo à meia noite do mesmo dia e então desligados. O cartão SD foi então recolhido e os resultados puderam ser analisados.

4.4.1 Análise dos dados obtidos no teste de campo

Sob posse dos dados obtidos durante o segundo experimento foi possível fazer uma análise dos mesmos. Estes foram primeiramente copiados do documento de texto gerado e inseridos no *Software Microsoft Excel*. Uma tabela com 7975 linhas foi criada e os *frames* foram então separados conforme descrito na seção 4.2. Cada valor foi transformado de hexadecimal para decimal e os devidos cálculos foram efetuados para transformar os dados brutos em valores com suas respectivas unidades. Os dados com o maior valor de PSD e sua respectiva frequência foram então transferidos para o *Software Mathworks Matlab*, onde um algoritmo foi escrito para plotar os mesmos de forma discreta. Além desta tarefa, este também efetuava um cálculo de quantas incidências de vibração por frequência ocorreram. Os gráficos gerados para os dados de um dos sensores é ilustrado na Figura 18. Já o número de incidências por frequência é ilustrado na Figura 19.

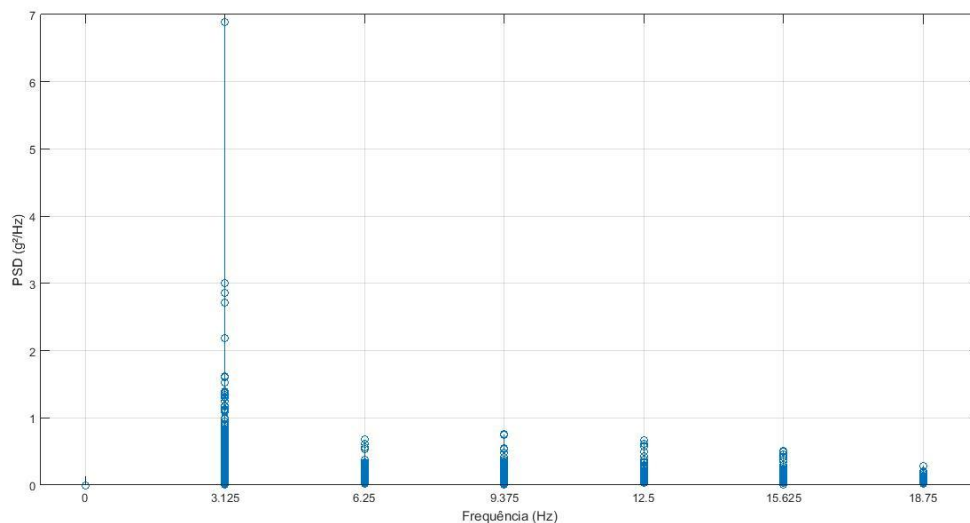


Figura 18 – Gráfico referente ao PSD de um dos nós sensores

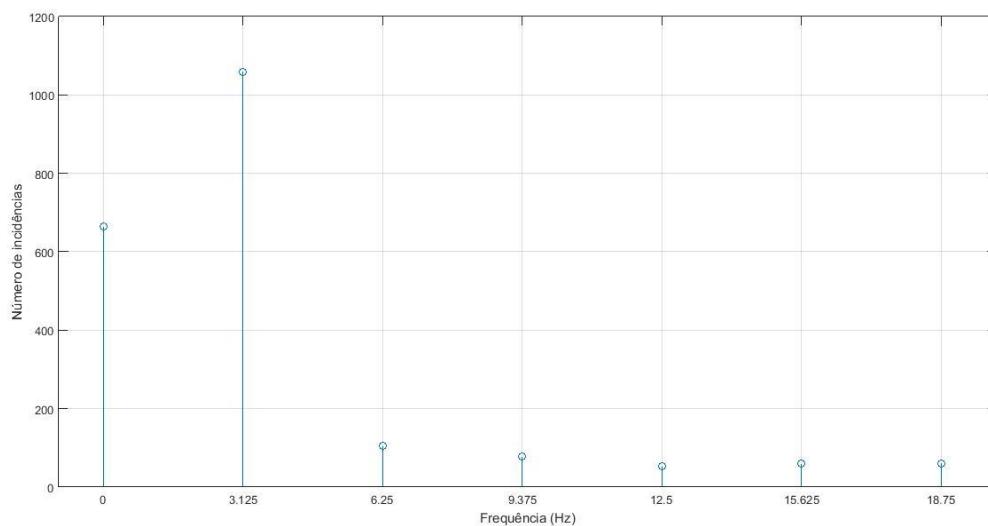


Figura 19 – Gráfico referente ao número de incidências por frequência de um dos nós sensores

Pode-se observar que a resolução do sistema é 3.125Hz, esta pode ser calculada de acordo com a Equação 7. Sendo F_S a frequência de amostragem do acelerômetro, que no caso é de 100Hz, conforme explicado na seção 3.2 e N é o número de amostras coletadas para cada interrupção gerada, que no caso é 32.

$$f = \frac{F_S}{N} \quad (7)$$

Verifica-se que os dados são coerentes, já que houve um maior número de incidências, cerca de 1100 em uma frequência baixa, caracterizando a frequência natural do sistema, sendo esta 3,125 Hz. Porém não pode-se chegar a nenhuma conclusão sobre a precisão tanto de amplitude quanto de frequência, já que o sistema não foi calibrado.

Outra inconsistência na precisão destes dados é referente ao gatilho utilizado para acordar o acelerômetro. Após os ensaios foi feita uma tentativa de averiguação da precisão das medições, utilizando como referência um acelerômetro *Bruel & kjaer* 4391. A referência e o sistema em questão foram sujeitos a vibrações periódicas em um *shaker* que se encontra no GMAP, conforme ilustra a Figura 20. Neste ensaio verificou-se que para amplitudes de aproximadamente 1g, o nó sensor não foi ativado, ou seja, o valor do gatilho estava muito alto. Sendo assim, os dados coletados no teste de campo contém somente valores referentes à acelerações muito altas.

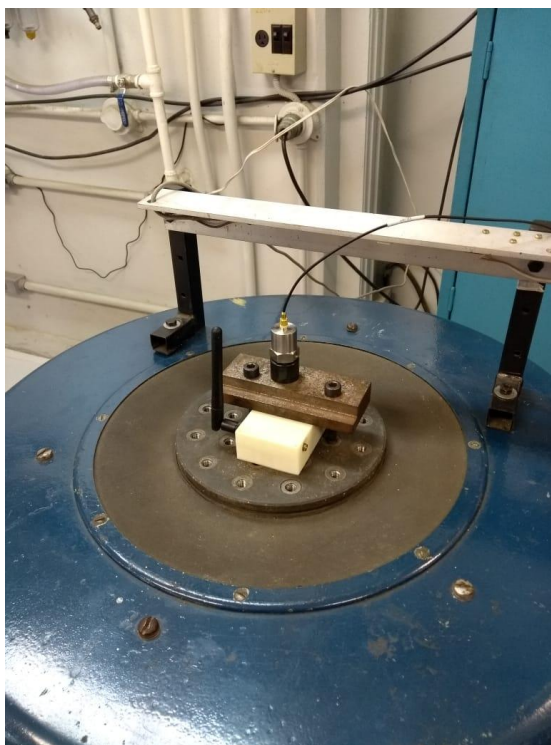


Figura 20 – Ensaio para aferição do sistema em questão.

6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho de conclusão de curso é apresentado o projeto do invólucro de um sistema para o monitoramento de vibrações mecânicas, composto por uma rede sem fios de sensores, destinado a registrar oscilações de vibração durante o transporte de frutas e legumes, as quais são correlacionadas com a deteriorização precoce desses alimentos. Também é apresentado o desenvolvimento do firmware para o armazenamento dos dados de vibração em um cartão de memória SD.

O *Hardware* dos nós sensores, bem como o protocolo de comunicação e as rotinas de cálculo de potência espectral já haviam sido desenvolvidas em outros trabalhos. Assim, a base do projeto estava disponível, o que facilitou o andamento do trabalho, que se limitou a desenvolver e testar um dispositivo mecanicamente robusto para o ambiente no qual trabalhará, além das rotinas para o armazenamento e organização dos dados processados.

Os objetivos traçados no início do projeto foram inteiramente alcançados, uma vez que atualmente os dados são adquiridos, processados e armazenados em memória não volátil. Além disso, o novo invólucro possibilitou a fixação segura dos nós sensores, junto ao produto transportado sem causar danos ao *Hardware*, conforme pôde ser observado nos ensaios de campo realizados, nos quais os nós sensores, juntamente com um receptor foram alocados em um caminhão que percorreu o trajeto de São Sebastião do Caí a Porto Alegre.

Também se conclui que o sistema ainda carece de alguns ajustes. Um dele é em relação à calibração dos nós sensores. Para um trabalho futuro, é necessário calibrar o sistema em um *shaker*, além de escrever um *Firmware* para esse fim, que não contemple estratégias de baixo consumo de energia e num modo de leitura do acelerômetro com os máximos recursos para que os dados possam ser lidos em tempo real. Assim, um procedimento poderá ser desenvolvido para efetuar uma comparação rigorosa dos dados obtidos pelos dispositivos, com a refe-

rência e possibilitar as compensações necessárias. Outra melhoria que pode ser efetuada em um trabalho futuro seria a inserção dos nós sensores em um invólucro esférico, para que este possa efetuar medições junto à carga e não acoplado às caixas nas quais os produtos são transportados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MARTINS, C. R.; FARIAS, R. M.; Produção de alimentos x desperdício: Tipos, causas e como reduzir perdas na produção agrícola. Revista da FZVA. 2002.

RENNÓ, DÉCIO; O protocolo spi. Apostila sobre Teoria de Transmissão de Dados, U-FI2017.

ROSANELI, C. F.; A fragilidade humana diante da pobreza e da fome. Revista bioética. 2015.

PINHEIRO, ALAN PETRÔNIO; Comunicação SPI. Apostila da disciplina de Microprocessadores, UFU.2017.

MAGALHÃES, DANIEL VARELA; Instrumentação e sistemas de medidas. Apostila da disciplina SEM0539 – Instrumentação e Sistemas de Medidas, USP. 2017.

ACAR, CENK; SHKEL ANDREI M.; Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. Journal of Micromechanics and Microengineering. 2003.

VAN VEEN, BARRY; HAYKIN, SAIMON; Sinais e Sistemas. Editora Artmed. 2002.

NXP; Datasheet; MC13224V. 2010.

ANALOG DEVICES; Datasheet; ADXL345. 2009

FILHO, SIDNEI; Revista Backstage vol. 8. 2002.

BALLESTRIN, ROGÉRIO; Redes de Sensores sem Fio de Baixo Custo para Caracterização de Vibração em Transporte de Cargas Críticas. Trabalho de Conclusão de Curso, DELET – UFRGS. 2016.

LAGES, WALTER; Descrição de Sinais Aleatórios. Apostila da disciplina ELE00071 – Tópicos Especiais em Automação e Controle, UFRGS. 2004.

MARINHO, CLEITON; BARBOSA, GLEIDSON; SILVA, JORGE; MENEZES, JOSÉ; Redes de Sensores Sem Fio para Aplicação em Agricultura Familiar. Artigo apresentado no XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e processamento de sinais. 2017.

ALCANTUD, MELISSA; ROSA, PAULO; Aplicação de Redes de Sensores Sem Fio na Agricultura de Precisão: Uma Reflexão Teórica. 2017. Disponível em: <http://www.unoeste.br/site/enepe/2017/suplementos/area/Exactarum/2%20-%20Ci%C3%A2ncias%20da%20Computa%C3%A7%C3%A3o/APLICA%C3%87%C3%83O%20DE%20REDES%20DE%20SENSORES%20SEM%20FIO%20NA%20AGRICULTURA%20DE%20PRECIS%C3%83O%20UMA%20REFLEX%C3%83O%20TE%C3%93RICA.pdf>. Acesso em: 29. abril. 2018

FERREIRA, HUDSON; Determinação das frequências naturais de modos de vibrar de um veículo de dois eixos através de um programa computacional em Matlab-Simulink. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, USP. 2003.

MULLER, IVAN; Sistemas instrumentados portáteis: esferas instrumentadas para sensoriamento de forças em três dimensões. Dissertação de mestrado, DELET – UFRGS. 2008.

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.