

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL  
UNIDADE UNIVERSITÁRIA EM PORTO ALEGRE  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

**ÉVERTON DE LIMA MÜLLER**

**DETECCÃO DE FALHAS EM ELEVADORES  
ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER**

Porto alegre

2021

**ÉVERTON DE LIMA MÜLLER**

**DETECÇÃO DE FALHAS EM ELEVADORES  
ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Dr. Luiz Fernando Gonçalves

PORTO ALEGRE

2021

**DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)**

M958d MÜLLER, Éverton de Lima.

Detecção de falhas em elevadores através da Transformada de Fourier / Éverton de Lima Müller. – Porto Alegre, 2021.  
55f.

II.

Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial) -  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso Superior de Tecnologia em  
Automação Industrial, Unidade em Porto Alegre, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Gonçalves.

1. Elevador - Manutenção. 2. Acelerômetro. 3. Transformada de Fourier. 4. Matlab.  
I. Gonçalves, Luiz Fernando. II. Título.

CDU 681.5

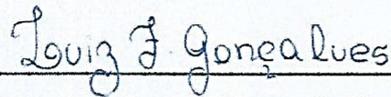
ÉVERTON DE LIMA MÜLLER

DETECÇÃO DE FALHAS EM ELEVADORES  
ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE FOURIER

Monografia apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Tecnólogo em Automação  
Industrial na Universidade Estadual do Rio Grande do  
Sul.

Orientador: Dr. Luiz Fernando Gonçalves  
Aprovada em: 23/02/2021

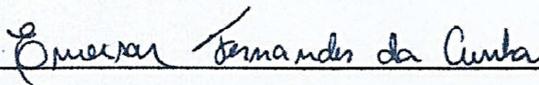
**BANCA EXAMINADORA**



Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Gonçalves  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS



Prof. Dr. André Borin Soares  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS



Prof. MSc. Emerson Fernandes da Cunha  
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS

PORTO ALEGRE

2021

Dedico aos meus pais, que tanto me apoiaram em meus estudos. Dedico também à minha esposa, que tem sido minha base e minha inspiração.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida. Aos meus familiares, especialmente ao meu pai, a minha mãe, ao meu irmão. Além da minha esposa, ao qual, conheci no período de início da minha graduação. Tem sido minha inspiração e me dado força para enfrentar todos os desafios.

Agradeço também às empresas Elevadores Atlas Schindler e à Thyssenkrupp Elevadores, por terem me dado oportunidade profissional e, conseqüentemente, forte conhecimento na área. E aos colegas da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul que ao longo do curso tornaram-se grandes amigos, pela amizade, apoio e ajuda nos momentos de dificuldade.

Não poderia deixar de agradecer ao professor orientador Dr. Luiz Fernando pela ajuda e orientação na elaboração deste trabalho de conclusão e aos demais professores que dedicaram seu tempo, repassando seu conhecimento e contribuindo significativamente na minha formação acadêmica e profissional.

Enfim, gostaria de agradecer a todos que cruzaram pelo meu caminho em determinado momento de minha vida, mesmo que por um instante e que graças a estas pessoas, hoje cheguei a este momento, de uma pequena, mas valorizada conquista.

“Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança.” Stephen Hawking

## RESUMO

Os recentes avanços das áreas da eletrônica, processamento de sinais e inteligência artificial, em especial, tem permitido o desenvolvimento de sistemas de detecção de falhas cada vez mais sofisticados e eficientes. Estes sistemas vêm sendo aplicados em diferentes tipos de equipamentos, como atuadores elétricos, motores e em elevadores em especial.

Nas grandes cidades, com prédios cada vez mais altos, os elevadores tornaram-se um dos principais meio de transporte presentes em nossa sociedade. Esta importância torna fundamental a previsão de falhas, pois com o passar do tempo esses equipamentos podem sofrer diversos tipos de desgastes físicos e químicos. Assim, o elevador pode vir a apresentar trepidações, desbalanceamentos ou solavancos, por exemplo.

Os elevadores são equipamentos que proporcionam o transporte vertical nos mais variados tipos de edificações com inúmeras aplicações. Atividades de manutenção realizadas com frequência e qualidade são o que garante que garante o status de meio de transporte mais seguro do mundo. Em sistemas de manutenção mais modernos inclusive é possível realizar a detecção de falhas nos elevadores devido ao monitoramento dos sinais elétricos, mecânicos ou de vibração durante as viagens de subida ou descida.

Outro equipamento que sofreu uma enorme evolução nos tempos atuais foram os aparelhos de telefonia móvel. Os *Smartphones*, que são a mais recente evolução dos telefones celulares, possuem um bom processamento, alguns até melhor que alguns computadores. Estes aparelhos permitem o uso dos mais diversos *softwares* com inúmeras aplicações. Dentre eles, a captura de sinais dos acelerômetros embarcados, abre margem para análise de vibração, podendo ser forte aliada na manutenção dos elevadores.

Ao longo deste trabalho de conclusão de curso será apresentado uma estratégia para realizar a detecção de falhas em elevadores usando os sinais de vibração coletados com os acelerômetros de um celular durante as viagens de um elevador. Estes sinais, com e sem falhas, formatados serão repassados e analisados através da transformada de Fourier. Os algoritmos da transformada de Fourier são aplicados através da ferramenta computacional Matlab®.

Serão apresentados os resultados dos sinais coletados com o acelerômetro do celular (coordenadas x, y e z) de elevadores sem falhas (considerando um comportamento normal) e com falhas (considerando defeitos) e os gráficos de densidade espectral de potência destes sinais obtidos através da Transformada de Fourier.

**Palavras-chave:** elevador. Manutenção. Acelerômetro. transformada de Fourier. Matlab®.

## ABSTRACT

Recent advances in the areas of electronics, signal processing and artificial intelligence, in particular, have allowed the development of increasingly accurate and efficient fault detection systems. These systems have been applied to different types of equipment, such as electric actuators, motors and elevators in particular.

In large cities, with increasingly tall buildings, elevators have become one of the main means of transport present in our society. This relevance makes the detection of failures fundamental, preventing failures and accidents, as over time these equipments can suffer different types of physical and chemical wear. Thus, the elevator may have fluctuations, unbalances or bumps, as an example.

Elevators are equipment that provide vertical transport in the most varied types of buildings with numerous applications. Maintenance activities carried out with frequency and quality guarantee the status of the safest means of transport in the world. In more modern maintenance systems, it is even possible to detect faults in the elevators through to the monitoring of electrical, mechanical or vibration signals during uphill or downhill trips.

Most recently, incredible evolution can also be in mobile phone devices. Smartphones, which are the latest evolution of cell phones, have good processing, some even better than computers. These devices allow the use of the most diverse software with numerous applications. Among them, the capture of signals from the built-in accelerometers opens the door for vibration analysis, and can be a strong ally in the maintenance of elevators.

Throughout this work, a strategy will be presented to perform fault detection in elevators using the vibration signals collected with the cell phone accelerometer during the travels of an elevator. These formatted and flawless signals will be passed on and analyzed using the Fourier Transform. The Fourier Transform algorithms are applied using the computational tool Matlab®.

The results of the signals collected with the cell accelerometer (x, y and z coordinates) from elevators without fail (considering normal behavior) and with failures (considering defects) will be presented and the power spectral density graphs of these signals obtained through the Fourier Transform.

**Keywords:** elevator. Maintenance. Accelerometer. Fourier transform. Matlab®.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Partes componentes do elevador.....	19
Figura 2a - Elevador com casa de máquinas.....	20
Figura 2b - Elevador sem casa de máquinas.....	20
Figura 3 - Máquina de Tração de um elevador Thyssenkrupp.....	21
Figura 4 - Vista explodida de uma máquina sem engrenagem do elevador S001 Shindler.....	21
Figura 5a - Tração simples.....	22
Figura 5b - Tração dupla.....	22
Figura 6 - Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um <i>Smartphone</i> .....	30
Figura 7a - Gráfico da soma da SF.....	31
Figura 7b - Gráfico do espectro da TF.....	31
Figura 8 - Uma quase simetria entre as transformadas direta e inversa de Fourier.....	31
Figura 9 - Gráfico e conteúdo de frequência do sinal $x(T)$ .....	35
Figura 10 – Janela de inicialização do Matlab®.....	37
Figura 11- Esquema da síntese da metodologia empregada neste trabalho.....	38
Figura 12 - Celular <i>Smartphone</i> LG X POWER.....	38
Figura 13 - Arquivo obtido pelo aplicativo no formato txt.....	39
Figura 14 - Arquivo modificado para ser manipulado pelo Matlab®.....	40
Figura 15 - Janela de Simulação .....	41
Figura 16 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo x .....	42
Figura 17 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo y.....	43
Figura 18 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo z.....	44
Figura 19 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo x.....	45
Figura 20 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo y.....	46
Figura 21 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo z.....	47

Figura 22 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo x.....	48
Figura 23 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com solavancos ao longo do eixo y.....	48
Figura 24 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com solavancos ao longo do eixo z.....	49

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

TF	transformada de Fourier
SF	série de <i>Fourier</i>
TL	transformada de La Place
DTFT	<i>discrete time Fourier transform</i>
DFT	<i>discrete Fourier transform</i>
TW	transformada <i>wavelet</i>
TWP	transformada <i>wavelet packet</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
CAN	<i>Controller Area Network</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
AT&T	<i>American Telephone and Telegraph</i> (empresa americana de telecomunicações e tecnologia)
FCC	<i>Federal Communication Commission</i>
IBM	<i>International Business Machines Corporation</i> (empresa americana de informática)
PDA	<i>Personal digital assistants</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 OBJETIVOS .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.1 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 ELEVADORES.....</b>	<b>18</b>
2.1.1 Painel De Controle .....	18
2.1.2 Máquina De Tração .....	20
2.1.3 Limitador De Velocidade .....	22
2.1.4 Aparelho De Segurança .....	22
2.1.5 Cabina.....	22
2.1.6 Contra Peso.....	22
2.1.7 Guias.....	23
2.1.8 Sinalização De Cabina E De Pavimento .....	23
2.1.9 Operador De Porta .....	23
2.1.10 Porta De Pavimento .....	23
2.1.11 Para-Choques.....	23
<b>2.2 MANUTENÇÃO.....</b>	<b>24</b>
2.2.1 Manutenção Corretiva .....	25
2.2.2 Manutenção Preventiva .....	25
2.2.3 Manutenção Preditiva .....	26
2.2.4 Manutenção Em Elevadores .....	26
<b>2.3 CELULARES.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4 ACELERÔMETROS.....</b>	<b>29</b>

<b>2.5 TRANSFORMADA DE FOURIER.....</b>	<b>30</b>
<b>2.6 ENERGIA E POTÊNCIA DE SINAIS.....</b>	<b>33</b>
<b>2.7 VANTAGENS DA TRANSFORMADA DE FOURIER.....</b>	<b>35</b>
<b>2.8 DESVANTAGENS DA TRANSFORMADA DE FOURIER .....</b>	<b>35</b>
<b>2.9 TEOREMA DE <i>NYQUIST</i>.....</b>	<b>36</b>
<b>2.10 <i>MATLAB</i>®.....</b>	<b>36</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1 COLETA DE DADOS.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2 FORMATAÇÃO DE DADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 JANELA DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 ELEVADOR SEM FALHAS.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2 ELEVADOR COM TREPIDAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3 ELEVADOR COM SOLAVANCOS.....</b>	<b>47</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O elevador é um dos equipamentos mais antigos construídos pela humanidade; já eram utilizados pelos egípcios em 1500 a.C. de modo rudimentar, com o intuito de elevar as águas do rio Nilo através de tração animal ou humana.

De acordo com (LIMA, M.; LIMA, P; 2007), os primeiros escritos, registros referentes, aos elevadores são do Arquiteto Romano Vitruvius (século I a.C.) e de Héron de Alexandria (século I d.C.). O mais simples desses elevadores era formado por uma única estaca fincada no chão, que era erguida e sustentada por um par de cabos amarrados em sua extremidade superior. Em seu topo, prendia-se a roldana por onde corria a corda utilizada para suspender os materiais. Essa corda era operada por um molinete fixo num dos lados da estaca, junto à base.

Muitos séculos depois, em 1852, Elisha Graves Otis projetou um sistema de segurança para os elevadores, de acordo com registros históricos. Otis criou um trilho para a passagem do cabo de tração, resolvendo o problema de oscilação da cabine. Implantou também um sistema de “garras” que servia para travar o elevador na eventualidade de o cabo se partir.

Elevadores são considerados o meio de transporte mais seguro do mundo, são projetados para não funcionarem ao menor sinal de falha de seus sistemas, por esta razão superam inclusive as estatísticas de segurança aeronáutica (IUNQ, 2017). O propósito de um elevador é auxiliar no deslocamento de pessoas e produtos, tornando possível a movimentação de pessoas e cargas com segurança e rapidez.

No ramo de elevadores, as empresas estão cada vez mais empenhadas no desenvolvimento de novos produtos, garantindo uma maior qualidade e conforto aos passageiros, além de melhorar as atividades de manutenção e aumentar a segurança.

Contudo, os elevadores à medida que são utilizados, podem sofrer desgastes físicos e químicos, tais como corrosões, rachaduras, acúmulo de sujeiras, infiltrações, entre outros. Como consequência o elevador pode começar a apresentar ao longo do tempo trepidações, desbalanceamentos ou solavancos, por exemplo.

Algumas medidas de manutenção podem ser tomadas com o objetivo de restabelecer a funcionalidade desses equipamentos e evitar possíveis falhas.

A manutenção pode ser entendida como uma série de medidas, técnicas ou ações, para manter os equipamentos ou processos em funcionamento, restabelecendo os sistemas danificados, corrigindo os danos e estendendo o ciclo de vida (GONÇALVES, 2011).

Nas atividades de manutenção preventiva, por exemplo, as ações de manutenção são planejadas e realizadas periodicamente, com o intuito de diminuir ou evitar paradas no sistema produtivo provocadas por falhas inesperadas (SHIKARI; SADIWALA; DWIVEDI, 2004; DJURDJANOVIC et al., 2003).

Novos enfoques de manutenção também podem ser destacados, como a manutenção proativa por exemplo. A manutenção proativa pode ser vista como um avanço em relação as estratégias clássicas; pois essa, além de monitorar o equipamento, realiza diagnósticos, quantifica a perda de desempenho e atua sobre o sistema em tempo real.

No caso de detecção de uma falha, ao se utilizar um esquema de manutenção proativa, um sistema de controle ou mesmo um sistema embarcado, pode-se automaticamente atuar no equipamento de modo que ele continue operando, mesmo com certo nível de degradação, até a realização da manutenção.

A degradação do desempenho de equipamentos, nos elevadores em especial, é vista como resultado do uso, exposição ao ambiente, passagem do tempo e desgaste de peças. Estes fatores diminuem a confiabilidade das máquinas e aumentam a probabilidade de falhas.

A quantificação do nível de degradação pode ser usada para prever um desempenho inaceitável nos elevadores e sinalizar a ocorrência de falhas, por exemplo. A quantificação da degradação permite sinalizar o momento adequado para se realizar as atividades de manutenção e a aumentar a reutilização de peças ou componentes.

Assim, a detecção de falhas em elevadores seria útil para avaliar os efeitos provocados pela degradação, sustentar o correto funcionamento dos equipamentos e diminuir a ocorrência de defeitos e falhas.

Um defeito permite que o elevador esteja disponível para uso, por exemplo, um elevador que apresenta trepidação na cabine. Uma falha, ao contrário, já o impede de desempenhar a sua função, por exemplo, um fusível de alimentação do quadro de força queimado. Assim, prevenir falhas e danos nos elevadores, enquanto estes ainda estão apresentando um defeito, de forma que as paradas no processo produtivo e o tempo de manutenção de uma máquina possam ser reduzidos ao mínimo, pode trazer inúmeros

benefícios, tais como um aumento da confiabilidade e da disponibilidade, redução de custos e uma maior proteção dos usuários.

Dentre as ferramentas matemáticas atualmente utilizadas para o desenvolvimento de sistemas de manutenção (que possam identificar as possíveis falhas, além de gerenciar suas consequências), cita-se as da área de processamento de sinais.

O processamento de sinais compreende a análise de sinais de modo a capturar informações destes e deixá-los mais adequados à alguma aplicação (GONÇALVES, 2011). Dentre as principais técnicas de processamento de sinais, cita-se a transformada de Fourier (TF), a transformada *wavelet* (TW) e a transformada *wavelet packet* (TWP), por exemplo, (LATHI, 1998; SARKAR; SU, 1998).

As técnicas de processamento de sinais podem ser empregadas, por exemplo, na decomposição do sinal de sensores, instalados em máquinas, no domínio tempo e frequência, localizando o espectro de frequência destes sinais; podem também ser usadas para o reconhecimento de padrões; ou na detecção de falhas. (DJURDJANOVIC; LEE; NI, 2003; PARRAGA, 2002; QUISPE, 2005).

As ferramentas de processamento de sinais são muito usadas na extração de características, no reconhecimento de padrões e na detecção e predição de falhas, por exemplo, geralmente em conjunto com técnicas estatísticas e de inteligência artificial (GONÇALVES, 2011). Muitas destas ferramentas encontram-se inclusive embarcadas em *hardware* em diferentes tipos de equipamentos, tais como motores, por exemplo, ou encontram-se disponíveis em aplicativos para celulares.

Deste modo, a existência de um equipamento que permita detectar falhas, além da análise do conforto durante as viagens do elevador, utilizando por exemplo um simples aplicativo de celular, acarretaria um maior impulsionamento na qualidade da manutenção realizada e na segurança dos passageiros.

Assim, este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas em elevadores através da transformada de Fourier, usando dados de vibração coletados por um celular. Espera-se com esse trabalho auxiliar na programação e realização das operações de manutenção em elevadores.

No capítulo 2, serão apresentados os objetivos deste trabalho. A revisão bibliográfica será vista no capítulo 3. No capítulo 4, a metodologia adota na realização deste TCC será

aborda. Os resultados de detecção de falhas obtidos com a transformada de Fourier serão vistos no capítulo 5. Por fim, no capítulo 6, as conclusões serão apresentadas.

## **1.1 OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é realizar a detecção de falhas em elevadores usando a Transformada de *Fourier*. Para isso, foi utilizado um celular para captar os sinais de vibração durante a viagem de elevadores, e utilizado algoritmos matemáticos programados no *Matlab*® para realizar as análises destes sinais.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) coleta de sinais da viagem da cabine do elevador;
- b) estudo de elevadores;
- c) estudo da Transformada de *Fourier*;
- d) análise de falhas utilizando a Transformada de *Fourier*.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Uma análise mais detalhada do elevador e suas principais falhas, dos sensores de posição, bem como da transformada de Fourier, faz-se necessário neste trabalho de conclusão de curso.

### **2.1 ELEVADORES**

O elevador surgiu em 1500 a.C com a finalidade de elevar as águas do rio Nilo através da tração animal e humana, em seguida outras formas de tração foram sendo substituídas pela energia do vapor e logo após, pela eletricidade. Com o passar dos anos, o elevador além de sua função de transporte de carga, passou a ser usado nas grandes construções. Antigamente um elevador levava em torno de dois minutos para subir ou descer um edifício de oito pavimentos, atualmente são cerca de até 45 vezes mais rápidos do que seus antecessores (DECKMANN; et al., 2019).

Na Fig. 1 pode-se verificar as principais partes que compõem um elevador. Pode-se observar a cabina, o painel de controle, o sistema de contrapeso e máquina elétrica usada como tração.

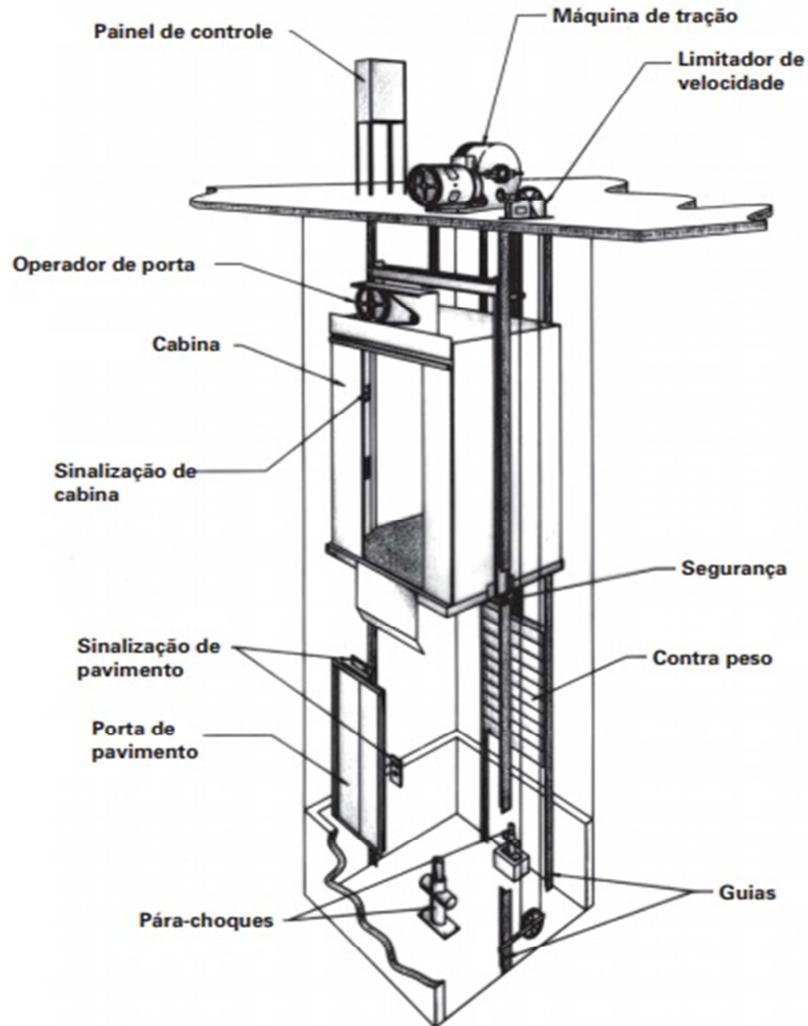
#### **2.1.1 Painel de Controle**

Diferentes sistemas microprocessados permitem que seja feito monitoramento de falhas estão presentes em elevadores hoje em dia. Isso devido a algoritmos que detectam estas falhas. Cita-se que grande parte das falhas em elevadores ocorre nos sistemas elétrico, eletrônico e de processamento de dados.

Casa de Máquinas é nome dado ao local onde normalmente são instalados os equipamentos de tração e o quadro de força que aciona o elevador (LIMA, M.; LIMA, P; 2007). Desde a sua origem, estes dispositivos necessitavam de uma casa de máquinas, como visto na figura 2a, local que abriga o quadro de comando, máquina de tração, limitador de velocidade e todos os elementos de controle do elevador.

Porém, as empresas fabricantes de elevadores têm desenvolvido equipamentos sem casa de máquinas, no intuito de reduzir espaços para a instalação e funcionamento dos elevadores, como visto na figura 2b.

Figura 1 - Partes componentes do elevador.



Fonte: Adaptação de Atlas Schindler, editado pelo autor (2020).

Porém, as empresas fabricantes de elevadores têm desenvolvido equipamentos sem casa de máquinas, no intuito de reduzir espaços para a instalação e funcionamento dos elevadores, como visto na figura 2b.

Neste caso, a máquina de tração não engrenada, é fixada acima das guias. Já o quadro de comando é acomodado no último pavimento, sendo os mais modernos no marco de porta de pavimento do elevador.

Figura 2a - Elevador com casa de máquinas



Figura 2b - Elevador sem casa de máquinas



Fonte: Sandro Rosa (2018).

### 2.1.2 Máquina de tração

No elevador com sistema de caixa de redução, o qual possui um eixo com rosca sem fim no eixo do motor, é movimentada uma grande engrenagem acoplada à polia que traciona os cabos. Entre o acoplamento do motor e o sem fim, existe um flange e um sistema de “sapatas” acionadas por um êmbolo eletromagnético, formando o sistema de freio, como visto na Fig. 3.

Figura 3 - Máquina de Tração de um elevador Thyssenkrupp



Fonte: Autor (2019).

Máquinas não engrenadas possuem polias e freios diretamente acoplados no eixo do motor, como é mostrado na fig.4.

Figura 4 - Vista explodida de uma máquina sem engrenagem do elevador S001 Shindler

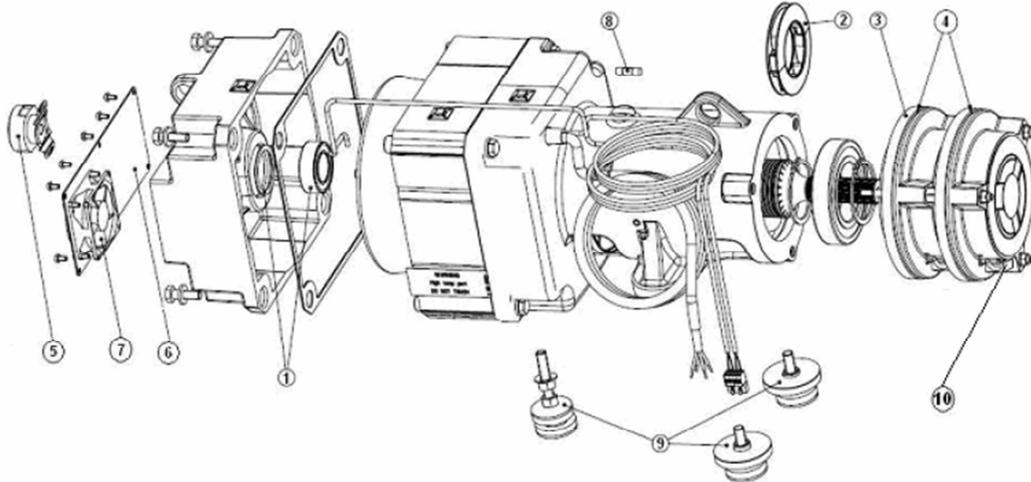
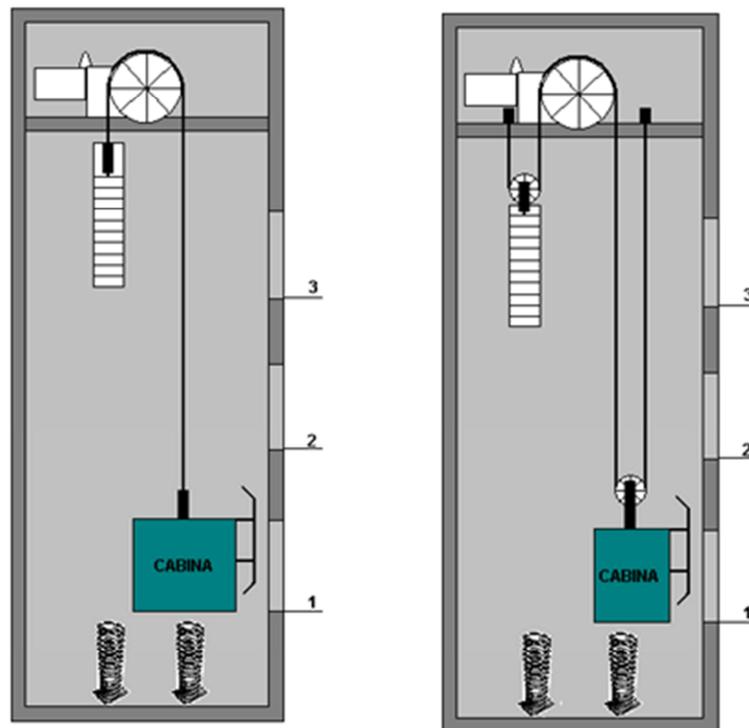


Figura 5a - Tração simples

Figura 5b - Tração dupla



Fonte: Atlas Schindler – Manual de Treinamento (2001).

Fonte: Atlas Schindler - Square Parts Catalog (2010).

Os cabos que tracionam a cabine e o contrapeso podem ter tração simples ou dupla. Na tração simples os cabos são fixados diretamente na cabine e no contrapeso, e na tração dupla os cabos são fixados na laje da caixa de corrida. Neste último, na cabine e no contrapeso tem

polias, fazendo a suspensão do conjunto cabine e contrapeso, exigindo menos esforço da máquina de tração. Elevadores sem casa de máquinas tem tração dupla, pois como sua máquina não é engrenada é necessário que faça menos esforço. Elevadores que possuem casa de máquinas podem apresentar qualquer uma das duas situações de tração descritas anteriormente e apresentadas na fig. 5a e fig. 5b.

### **2.1.3 Limitador de Velocidade**

O limitador de velocidade consiste numa polia ao qual passa por ela um cabo de aço que é fixado suas pontas na cabine. Ao movimentar a cabine, o limitador de velocidade gira sua polia por causa do cabo de aço e quando excede a velocidade nominal do elevador atua um sistema centrífugo que tranca o cabo, fazendo atuar o aparelho de segurança.

### **2.1.4 Aparelho de Segurança**

Os elevadores possuem um dispositivo de segurança que atua em caso de falhas, se a cabine do elevador entrar em queda livre. Ele funciona juntamente com o Limitador de Velocidade, que ao trancar o cabo de aço aciona um sistema de cunha. Assim ele freia a cabine nas guias, impedindo sua queda até o fundo do poço.

Este aparelho de segurança atua, progressivamente ou instantaneamente. Em situações em que abaixo do poço do elevador possa ter mais um nível de pavimento, ao qual haja circulação de pessoas, também necessita de limitador de velocidade e aparelho de segurança no contrapeso (NM 207, 1999).

### **2.1.5 Cabina**

Cabina é o nome dado ao compartimento onde é transportada a carga (LIMA, M.; LIMA, P; 2007). O principal elemento do elevador é a cabine. Ela é suspensa por cabos de tração, realizando movimentos verticais através de guias, sendo tracionada por uma máquina de tração, ao qual movimenta a cabine sempre em sentido contrário ao contrapeso. Ela é montada sobre uma plataforma em uma armação composta por duas longarinas fixadas em cabeçotes.

### **2.1.6 Contra Peso**

Contrapeso é uma parte para o funcionamento do elevador e permite que a carga na cabina seja transportada parcialmente balanceada utilizando menos energia na operação (LIMA, M.; LIMA, P; 2007). O contrapeso constitui-se em uma estrutura metálica onde são fixados pesos para que o conjunto totalize o peso de 40 a 50% do peso total da cabine. É

muito importante que o contrapeso esteja balanceado com a cabine, pois garantirá o menor esforço da máquina de tração.

### **2.1.7 Guias**

As guias, em formato de T, são fixadas em suportes metálicos denominados “braquetes”, que são presos à alvenaria ou às estruturas metálicas da caixa de corrida. É através das guias em que a cabine e o contrapeso realizam seus movimentos verticais.

Ambos são acoplados através de um sistema de corrediças de nylon, ao qual tem o coeficiente de desgaste menor que o da guia, ou através de um sistema de rolos para reduzir o atrito na movimentação da cabine e do contrapeso.

### **2.1.8 Sinalização de Cabina e de Pavimento**

Dentro da cabine encontramos dispositivos como botoeiras e displays, para informar ao comando os andares em que deseja deslocar a cabine e informar ao usuário a localização de qual andar ela está. Assim como dentro da cabine, no pavimento também dispõe de botoeiras e displays.

### **2.1.9 Operador de Porta**

Nos elevadores mais modernos, as portas da cabine são automáticas. O operador de porta é um conjunto de sistemas mecânicos e elétricos que garantem a abertura e fechamento das portas de cabine.

### **2.1.10 Porta de Pavimento**

As portas de pavimento são as fixadas em cada pavimento do edifício, dão acesso à cabine do elevador. Encontram-se, em alguns prédios com elevadores mais antigos, as portas do tipo “eixo vertical”, ao qual tem que ser abertas puxando-as com a mão. Em elevadores mais modernos, a porta de pavimento abre junto com a porta de cabine, ao qual possui um mecanismo que acopla na porta de pavimento possibilitando a abertura de ambas. Com este mecanismo as portas de pavimento não abrem automaticamente se a cabine não estiver naquele andar.

### **2.1.11 Para-choques**

No poço do elevador encontram-se os para-choques que podem ser hidráulicos, molas ou batentes de borracha. Sua função é acondicionar a cabine ou o contrapeso caso passem o

limite. Também é encontrada no poço a polia esticadora do cabo do limitador de velocidade, ao qual só mantêm o cabo de aço esticado para garantir o seu funcionamento.

Os comandos de elevadores com sistemas microprocessados são capazes de detectar falhas durante seu funcionamento, tornando-se uma ótima ferramenta de diagnóstico. No entanto, a comunicação destes sistemas dá-se através de protocolos *Controller Area Network* (CAN) e SERIAL, por exemplo, e monitoramento de sinais elétricos. Sendo assim, falhas mecânicas não são detectadas pelo comando do elevador. Um sistema capaz de detectar falhas mecânicas através do conforto de viagem do elevador pode ser um ótimo aliado para um diagnóstico mais rápido e preciso.

## **2.2 MANUTENÇÃO**

A manutenção consiste de uma série de medidas de prevenção (para manter os sistemas em funcionamento), correção (com o intuito de restabelecer os sistemas danificados), e predição (visando monitorar o estado de funcionamento do sistema, detectar alguma falha incipiente e fornecer subsídios para o planejamento de ações de intervenção, sejam estas preventivas ou corretivas) praticadas com a intenção de corrigir os danos provocados pela degradação e manter os sistemas funcionando (GONÇALVES, 2011).

Segundo Marçal e Susin (MARÇAL; SUSIN, 2005) o processo de manutenção inclui todas as atividades técnicas e organizacionais que garantam que as máquinas e equipamentos em geral operem dentro da confiabilidade esperada.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua norma TB-116 de 1975, estabelece que a manutenção é o conjunto de todas as ações necessárias para que um item ou equipamento seja conservado ou restaurado de modo a permanecer de acordo com uma condição especificada (GONÇALVES, 2011).

Já a NBR 5462, de 1994, afirma que manutenção é a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (GONÇALVES, 2011).

A Associação Francesa de Normatização apresenta a manutenção como o conjunto de ações que permite conservar ou restabelecer um bem, dentro de um estado específico ou na medida para assegurar um determinado serviço (NUNES, 2001).

A manutenção consiste em medidas de prevenção, correção e predição, que são praticadas com o intuito de corrigir os danos provocados pela degradação e manter os

sistemas em pleno funcionamento. Um dos propósitos da manutenção é fazer com que o equipamento funcione o máximo de tempo possível (DECKMANN, 2019). Dentre os tipos de manutenção podemos destacar a corretiva, a preventiva e a preditiva.

### **2.2.1 Manutenção Corretiva**

Pode ser entendida como o trabalho de manutenção realizado após a falha do sistema, visando restabelecê-lo a sua função requerida, eliminando o estado de falha (NUNES, 2001).

No momento em que ocorrem falhas no equipamento, é necessária uma imediata intervenção para o seu pleno funcionamento. Este tipo de manutenção configura-se como corretiva e existem dois tipos:

- Paliativa: compreende as intervenções corretivas executadas provisoriamente a fim de colocar o equipamento em funcionamento para, a seguir, efetuar o reparo definitivo.
- Curativa: compreende as ações típicas de reparo em caráter definitivo, a fim de restabelecer os itens à função requerida.

Quando o equipamento ou processo em questão não forem essenciais, ou mesmo quando o dano no equipamento é de fácil reparo, a manutenção corretiva é a mais indicada, devido ao seu baixo custo operacional (YAM et al., 2001).

Este tipo de manutenção não exige a realização de acompanhamentos ou inspeções nas máquinas. No entanto, apresenta custos elevados, conduz a parada no sistema produtivo e há a necessidade de um estoque de peças para reparos, não sendo possível realizar um planejamento de custos ao se adotar essa política de manutenção, uma vez que as falhas dos equipamentos e suas consequências não são previstas (DECKMANN, 2019). Além disso, danos em outros equipamentos e paradas inaceitáveis no processo produtivo também poderão ocorrer (GONÇALVES, 2011).

### **2.2.2 Manutenção Preventiva**

Em situações em que as falhas no sistema ainda não se apresentaram, a manutenção preventiva é aquela praticada com a intenção de reduzir a probabilidade de ocorrência de falhas ou danos. Nesse tipo de manutenção, as ações são planejadas, através de inspeções realizadas periodicamente se minimiza as paradas e a taxa de degradação, restaurando o sistema a sua função original (SHIKARI; et al., 2004).

A estratégia da manutenção preventiva consiste em ações previstas, preparadas ou programadas antes do provável aparecimento da falha, realizando sua intervenção antes de

ocorrer falhas. No entanto, é necessário certo nível de conhecimento do equipamento para realizar as ações preventivas necessárias. Dentre elas, geralmente são lubrificação, limpeza, ajustes, e troca de peças ou itens que visam evitar as falhas.

### **2.2.3 Manutenção Preditiva**

Na literatura, encontra-se tanto a denominação de técnicas preditivas, e não de manutenção preditiva, por se entender que essa forma de atuação estaria englobada pela manutenção preventiva; bem como a denominação de manutenção preditiva, sendo considerada com outro tipo de manutenção (GONÇALVES, 2011).

A manutenção preditiva ocorre ao aplicar uma supervisão contínua dos parâmetros de controle e desempenho. Essa manutenção tem o objetivo de estabelecer parâmetros para análise probabilística do comportamento dos sistemas e das leis de degradação, aumentando a confiabilidade e a disponibilidade dos sistemas para reduzir o número de falhas, além de evitar e prevenir paradas súbitas. Isto é particularmente interessante, já que uma parada inesperada eleva o custo de produção (DECKMANN, 2019).

Este método é aplicado com a finalidade de indicar condições reais de funcionamento das máquinas e equipamentos com base em dados que informam o seu desgaste ou processo de degradação. Realizar monitoramento regular das condições dos componentes dos equipamentos e instalações é a proposta desta estratégia. Também monitorar o rendimento operacional e instalações quanto a seus processos.

### **2.2.4 Manutenção em Elevadores**

A manutenção em elevadores é de extrema importância para suprir a necessidade constante de locomoção em prédios verticais. Atualmente, segundo uma pesquisa da revista americana *Condé Nast Traveler*, o elevador é considerado o meio de transporte mais seguro do mundo. Porém, para garantir esta segurança deve ser realizada manutenção preventiva mensal no elevador. Conforme a lei municipal de Porto Alegre, art. 6º da lei nº 12.002, de 21 de Janeiro de 2016, “A *autorização para utilização dos equipamentos de transporte terá vigência enquanto houver manutenção preventiva e vistoria mensal realizada por empresa de manutenção registrada no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) e enquanto forem cumpridos os dispositivos desta Lei*”(Porto Alegre (RS), 2016). Sendo assim, Os responsáveis pelo edifício em que tenham elevadores, deve manter contrato com uma empresa registrada no CREA em que realize a manutenção preventiva e corretiva.

Os elevadores tem como base a manutenção preventiva. Uma boa análise do equipamento, assim como sua lubrificação, ajustes e substituição de peças com desgaste garantem uma baixa incidência de manutenção corretiva. Eles podem apresentar diversas falhas, no entanto por serem equipamentos complexos podem não ser facilmente detectadas. Em meio à tecnologia atual dos elevadores, não há um dispositivo que possa detectar falhas mecânicas com precisão, analisando a viagem do elevador.

As principais falhas mecânicas em que se pode ser diagnosticada são as seguintes:

- Elevador com trepidação constante durante a viagem; algumas situações podem causar esta falha, como o desgaste nas correias de cabine, problemas no acoplamento do motor com a caixa de redução, desgaste nas polias ou cabos de tração, balanceamento entre cabine e contrapeso fora do padrão, por exemplo.

- Cabine balança no percurso; esta falha pode ser causada principalmente por desgaste ou ajuste nas correias de cabine.

- Pequenos solavancos na partida e na parada da viagem do elevador; esta falha pode ser ocasionada pela falta ou desajuste no pesador de carga da cabine (em elevadores que usam esta informação para controle de torque em que o inversor controla o motor), também pode estar relacionado com os parâmetros da unidade inversora que controla o motor.

- Solavancos na viagem; é denominado solavanco o movimento brusco apresentado pela cabine do elevador durante a viagem, podendo apresentar em conjunto balanços e trepidações. Esta falha ocorre principalmente pelo estado de conservação ou ajuste de correias de cabine e o sistema de tração (cabos, polias e máquina de tração), mas também pode ocorrer por ajuste de parâmetros da unidade inversora que controla o motor.

Para que seja possível analisar as falhas mecânicas através da viagem do elevador, é necessário gravar esta viagem através de sinais. O aparelho celular é um grande aliado para essa função.

### **2.3 CELULARES**

A descoberta do rádio e formas de propagação de ondas no século XX abriu portas para a indústria de telecomunicações. Em 1947, nos Estados Unidos a empresa *Bell Company*, desenvolveu um sistema baseado nos conceitos de células e ou área de cobertura, com o intuito de criar uma telefonia móvel.

Para o desdobramento desse sistema dentro de um perímetro, a *Bell* e a *AT&T* solicitaram para o órgão regulador de telecomunicação americana *Federal Communication*

*Commission* (FCC) alocações de frequências de rádios para a comunicação, com o número de frequências disponibilizadas pelo FCC apenas 23 pessoas conseguiam se conectar simultaneamente na mesma área de cobertura, com isto o acesso à tecnologia era escasso e caro.

Apenas 20 anos depois a FCC aumentou o número de frequências e possibilitou novos usuários. O uso de torres para propagar as ondas e aumentar a cobertura iniciou em 1968, este processo foi definido pelas empresas *Bell* e *AT&T*.

Em 1973, a *Bell* desenvolveu uma tecnologia capaz de instalar em carros policiais uma frequência de comunicação, porém a empresa Motorola deu um passo à frente com ao implantar esse sistema de comunicação ao dispositivo móvel permitindo o uso dessa tecnologia fora dos carros e por usuários. Em 1979 na cidade de Chicago foi realizado testes para comprovar o funcionamento do dispositivo com 200 pessoas.

Apesar dos testes, em 1983 a FCC aprovou o primeiro o aparelho *DynaTAC 8000X*, da Motorola em parceria com empresa *Ameritech*, dando início a venda e popularização de celular pelo mundo.

Foi em 1992 que surgiu o primeiro celular *Smartphone* do mundo. O *Simon* da IBM deixou de ser apenas um aparelho para fazer ligações e envio de mensagens, contendo os recursos como PDA, fax, tela sensível ao toque e outras funções computacionais.

Em 2002 os aparelhos de tela colorida e a tecnologia GSM chegam ao mercado brasileiro, abrindo espaço para investimento de grandes empresas de telefonia para novas tecnologias no país. Foi em 2008 que o sistema operacional *Android* foi introduzido no mercado. Os aparelhos oferecem características de *hardware* e *software* capazes de executar tarefas, que até então, podia-se executar somente em computadores. Com sua capacidade de conexão com rede de dados para acesso à internet, abre espaço para maior mobilidade computacional.

Em 2008 popularizou o uso de aplicativos em celulares *smartphones*, esses aplicativos são comercializados na loja online e, em sua maioria, por empresas terceirizadas. Daí inúmeros desenvolvedores criam *softwares* executáveis em celulares *smartphones* que executam as mais diversas funções, dentre eles utilizando os acelerômetros.

## 2.4 ACELERÔMETROS

Os acelerômetros não medem somente aceleração, mas também inclinação, vibração, colisão e gravidade (FIGUEIREDO, 2007). São classificados de acordo com a sensibilidade definida pela aceleração máxima e mínima que o acelerômetro pode perceber e a quantidade de eixos existentes no sensor, que pode variar de um a três eixos, com isso o acelerômetro pode perceber a aceleração em todas as direções do espaço (FERNANDES, 2008). Os acelerômetros são sensores que medem aceleração de um objeto. A aceleração é uma medida de quão rapidamente a velocidade varia, em  $m/s^2$ , e pode ser obtida segundo uma, duas ou três direções, utilizando acelerômetros *uni*, *bi* e *tri* axiais, respectivamente (FIGUEIREDO, 2007).

A orientação é descrita na forma dos eixos x, y e z, podendo apresentar valores inteiros no intervalo de -128 a 127. O que vai determinar os valores para os eixos é a posição do aparelho celular em relação a ele mesmo, tais como: com a tela voltada para frente e apontando para direita ou esquerda, para cima ou para baixo e com a tela voltada para cima ou para baixo (SILVA, 2010).

A fig. 6 ilustra a orientação dos três eixos apresentados pelos acelerômetros de um celular:

Figura 6 - Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um *Smartphone*



Fonte: Figueira & Aguiar (2013).

Os acelerômetros são importantes para a nossa detecção de falhas, pois é este sensor que faz a leitura das vibrações apresentadas na cabine do elevador. Com um gráfico de vibração da viagem completa do elevador, podemos fazer a análise através da Transformada de Fourier.

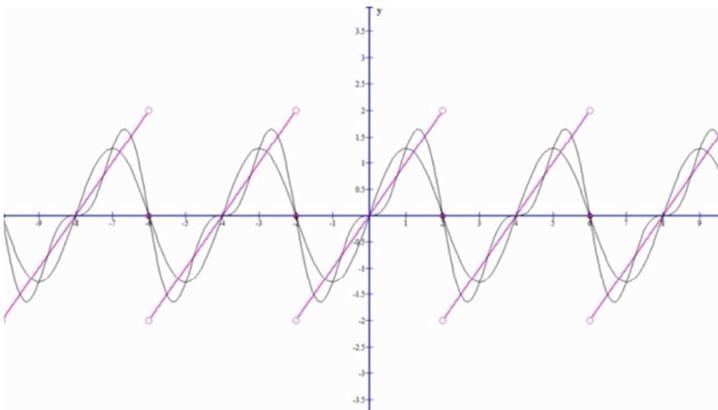
## 2.5 TRANSFORMADA DE *FOURIER*

Em 1807, O Barão Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), afirmou que qualquer forma de onda pode ser representada como uma soma infinita de ondas senoidais de diferentes frequências. Na época existiam sérias dúvidas sobre a exatidão dos argumentos de *Fourier* por isso seu trabalho só foi publicado 15 anos depois. Hoje, a análise de *Fourier* está presente em muitas áreas de pesquisa e em muitas disciplinas científicas: Física, Teoria das Probabilidades, Estatística, Criptografia, acústica, Óptica, Geometria e outras (GONÇALVES, 2011).

A série de *Fourier* (SF) permite representar uma função periódica como a soma de senóides, obtendo o espectro de frequência da série. A transformada de *Fourier* (TF) nos permite estender o conceito de espectro de frequência a funções não periódicas. A transformada considera que uma função não periódica é uma função periódica com período infinito (SADIKU, 2008).

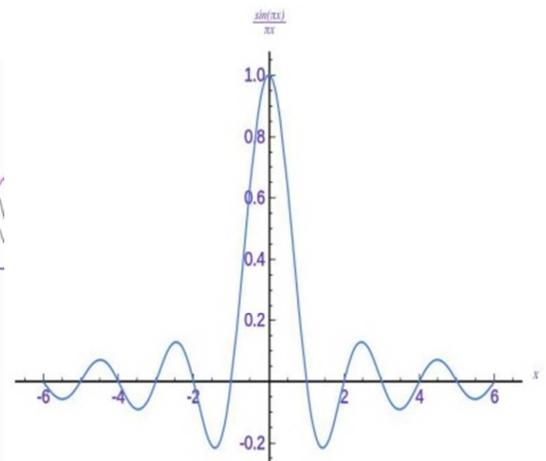
Uma das características que diferencia a SF da TF, é que a primeira, apresenta um espectro discreto, pois trata o sinal como periódico, resultando num gráfico equivalente, ilustrado na fig. 7a. Já a segunda é o espectro contínuo, pois trata o sinal como aperiódico, representado na fig. 7b.

Figura 7a - Gráfico da soma da SF



Fonte: Elias Tayar Galante (2013).

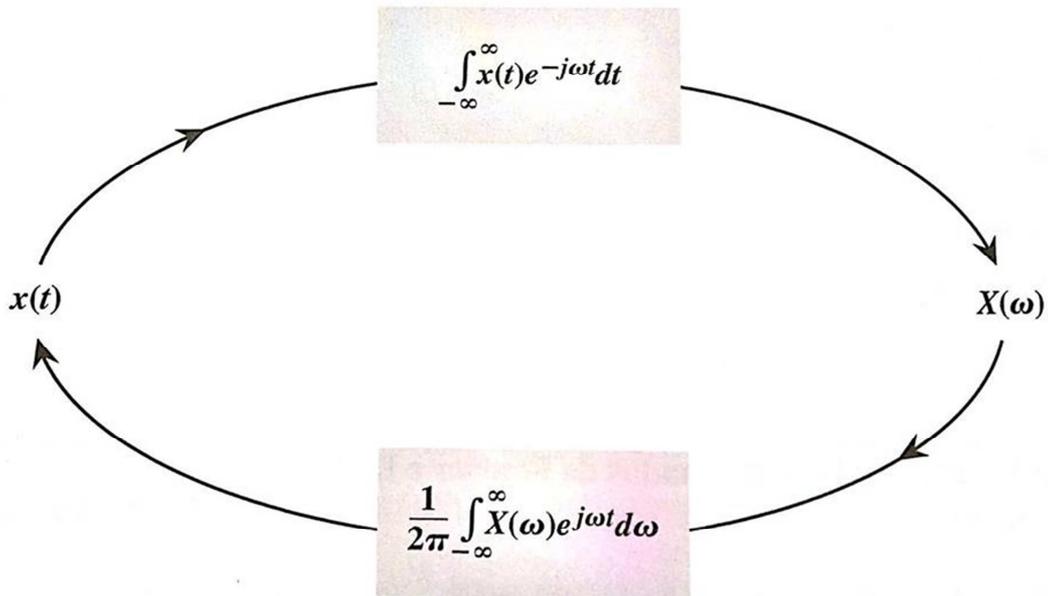
Figura 7b - Gráfico do espectro da TF



Fonte: Oswaldo de Oliveira (2015).

Através da TF pode-se representar qualquer função integrável  $x(t)$  como a soma de exponenciais complexas com frequência angular  $\omega$  e amplitude complexa  $X(\omega)$ . Um aspecto importante da transformada de Fourier é a dualidade tempo-frequência, podendo ser observada na Fig.8.

Figura 8 - Uma quase simetria entre as transformadas direta e inversa de Fourier.



Fonte: Lathi,B; SINAIS E SISTEMAS LINEARES (2007).

Matematicamente, a transformada direta de Fourier ( $\mathcal{F}$ ) e a transformada inversa de Fourier, ( $\mathcal{F}^{-1}$ ) são expressas como (LATHI, 1998; BRIGHAM; MORROW, 1967):

$$X(\omega) = \{x(t)\} \text{ e } x(t) = \mathcal{F}^{-1}\{X(\omega)\} \quad 1)$$

Ou:

$$x(t) \leftrightarrow X(\omega) \quad 2)$$

Onde  $X(\omega)$  é obtido através da seguinte integral:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad 3)$$

Ainda,  $x(t)$  pode ser determinado a partir de  $X(\omega)$ :

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad 4)$$

A TF pode ser definida como a decomposição de um sinal  $x(t)$  num somatório de funções periódicas que se estendem por todo o domínio temporal, revelando assim o seu espectro de frequências que compõe o sinal. A série de *Fourier* é usada na análise de sinais periódicos enquanto a transformada de *Fourier* é tipicamente usada para sinais não

periódicos.

A transformada aplicada em funções contínuas pode ser representada por qualquer função integrável  $x(t)$ , como a soma de exponenciais complexas com frequência angular  $\omega$  e amplitude complexa  $X(\omega)$ .

A transformada de *Fourier* de tempo discreto (em inglês *discrete time Fourier transform*, DTFT) é uma transformada integral estreitamente relacionada com a transformada de Fourier e com a transformada Z.

A DTFT difere da transformada de *Fourier* ao aplicar-se a funções cuja variável independente é discreta (descontínua) e não contínua, como é o caso da transformada de *Fourier*.

A DTFT não deve ser confundida com a transformada discreta de *Fourier* (em inglês *Discrete Fourier Transform*, DFT), que pode ser considerada como um caso especial da DTFT, que aparece numa situação muito comum: quando a função original é periódica. As técnicas de processamento digital de sinais trabalham com sinais amostrados, ou discretos no tempo.

Considere um sinal  $x(t)$  discretizado ao longo do tempo, onde “n” é o índice da amostragem.

$$x(t) \rightarrow x[n] \tag{5}$$

A relação matemática entre o sinal  $x[n]$  e a sua TF de tempo discreto ( $\tau$ ), dada por  $X[\omega]$ , é expressa como:

$$x[n] \leftrightarrow \tau\{X[\omega]\} \tag{6}$$

Amostrado o sinal  $x(t)$  em intervalos uniformes, obtém-se a versão da transformada de Fourier de tempo discreto:

$$\tau\{x[n]\} = X[\omega] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega t} \tag{7}$$

e a sua inversa ( $\tau^{-1}$ ):

$$\tau^{-1}\{X[\omega]\} = x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-2\pi}^{2\pi} X[\omega]e^{j\omega t} d\omega \tag{8}$$

Com:  $n \in \mathbb{Z}$  (para assegurar de que as amostras dos dados ocorram somente em intervalos discretos) e  $-\infty \leq n \leq \infty$ .

Em geral, sinais provenientes de acelerômetros são não periódicos. Mesmo sinais que apresentam certas periodicidades, como a corrente de um sensor no estator de um motor, por exemplo, também apresentam certa variação ao longo dos períodos. Portanto, a série discreta de *Fourier* não se aplica, e a transformada de *Fourier* apropriada para esses sinais digitalizados é a DTFT (LATHI, 1998).

Na área de processamento de sinais, a TF é usada para isolar as componentes de frequência de sinais. Para sistemas de monitoramento a TF é uma ferramenta útil para realizar a extração das características de um sinal e a remoção de ruídos, como exemplo (GONÇALVES, 2011).

Toda vez que uma peça ou mecanismo tem suas características mecânicas alteradas seja por desgaste ou trincas, por exemplo, seu espectro de frequências de vibração é modificado.

Folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas elétricas rotativas refletem-se na alteração de frequências ou no surgimento de novas frequências como destacou (MASCARENHAS, 2006). Deste modo, por meio da TF, é possível observar uma alteração mecânica, um defeito, que poderá possivelmente acarretar uma falha.

## 2.6 ENERGIA E POTÊNCIA DE SINAIS

A representação no domínio da frequência de uma função (ou sinal), Eq. (9), é conhecido como seu espectro. A integral do produto entre o espectro e o seu conjugado é conhecido como energia espectral de um sinal, ou simplesmente energia. Geralmente é chamada apenas por espectro do sinal.

A energia espectral de um sinal  $x(t)$  contínuo, definida como  $\mathcal{E}$ , é obtida a partir da seguinte expressão (BRIGHAM, 1974; ROBERTS, 2001):

$$\mathcal{E}\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t)^* dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)X(\omega)^* d\omega \quad 9)$$

A energia de um sinal também é conhecida como a assinatura característica deste sinal, pois revela o conteúdo de frequência do sinal; ou seja, suas características fundamentais.

Já a densidade espectral de potência,  $\phi$ , dada em W/Hz, pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$\phi\{x(t)\} = \frac{X(\omega)X(\omega)^*}{2\pi} \quad 10)$$

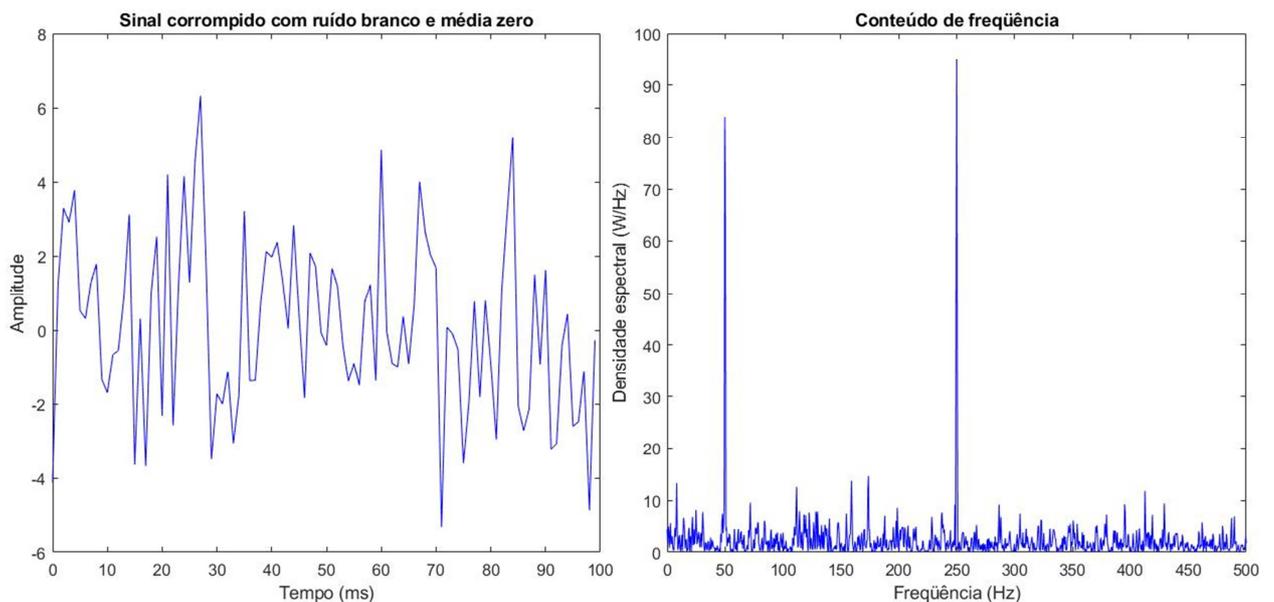
Onde:  $X(\omega)^*$  corresponde ao complexo conjugado de  $X(\omega)$ . O gráfico da densidade espectral auxilia na visualização da frequência fundamental e harmônicas de um sinal.

Na Fig. 80 vê-se, como exemplo do uso da TF, o gráfico obtido a partir do *MatLab* de um sinal  $x(t)$  e da sua estimativa da densidade espectral de potência do sinal obtido através da TF, onde o sinal  $x(t)$  é dado por:

$$x(t) = \text{sen}(2\pi 50t) + \text{sen}(2\pi 250t) + 2.\text{randn}(\text{size}(t)) \quad 11)$$

onde:  $\text{randn}(\cdot)$  e  $\text{size}(\cdot)$  são funções do *Matlab* onde se obtém o ruído branco e a dimensão do vetor de instantes de tempo  $t$ , respectivamente.

Figura 9 - Gráfico e conteúdo de frequência do sinal  $x(t)$ .



Fonte: GONÇALVES (2011).

Cabe destacar aqui que: ambas as frequências que aparecem na Fig. 80 possuem o mesmo conteúdo espectral de potência e energia. Contudo, na segunda frequência, o conteúdo está mais concentrado, em uma pequena faixa, do que na primeira frequência que aparece mais disperso. Isto ocorre devido aos distintos períodos das duas senóides presentes no sinal.

## 2.7 VANTAGENS DA TRANSFORMADA DE FOURIER

Na área de processamento de sinais, a TF é usada para isolar as componentes de frequência de um sinal. Para sistemas de monitoramento, a TF é uma ferramenta útil na extração das características de um sinal e na remoção de ruídos, por exemplo.

Toda vez que uma peça ou mecanismo tem suas características físicas alteradas seu espectro de frequências de vibração é alterado. Folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas rotativas por exemplo refletem-se na alteração de frequências ou no surgimento de novas frequências (MASCARENHAS, 2006).

Deste modo, através da TF é possível observar uma alteração mecânica, um defeito, que poderá possivelmente provocar uma falha.

## 2.8 DESVANTAGENS DA TRANSFORMADA DE FOURIER

Após um sinal ter sido transformado pela TF, a informação no domínio tempo é agora representada no domínio frequência (espectro). Isto torna possível identificar as componentes de frequência.

Entretanto, a transformada de Fourier não preserva a informação temporal. Uma análise de frequências por Fourier, mesmo fornecendo uma informação sobre a composição espectral do sinal, não mostra os instantes de tempo em que estas frequências ocorrem.

Logo, a TF é uma ferramenta ideal para uma análise de sinais cujo espectro não varie no tempo ou sinais estacionários como as ondas sonoras e luminosas; porém, não é eficaz para o estudo de fenômenos transitórios como os sinais biológicos, pois os mesmos, muitas vezes, possuem características não estacionárias (SCHUCK, 1998; SILVA, 2005).

Para revelar a ocorrência de um evento num determinado instante de tempo e as mudanças nas componentes das frequências ao longo do tempo é necessário realizar uma análise temporal e espectral em conjunto.

Uma análise temporal e espectral é um modo de se obter ao mesmo tempo informações sobre o conteúdo espectral e temporal de um sinal. As ferramentas usadas para se realizar uma análise temporal e espectral mais conhecidas são a transformada de Fourier com Janelamento, a transformada *Wavelet* e a transformada *Wavelet Packet* (GONÇALVES, 2011).

## 2.9 TEOREMA DE NYQUIST

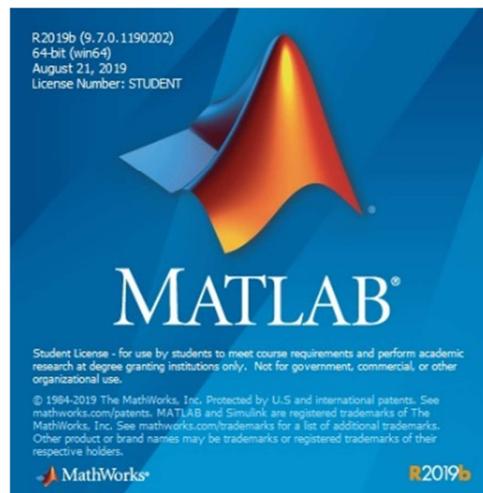
O Teorema de *Nyquist* diz que um sinal deve ser amostrado com uma frequência de pelo menos o dobro da maior frequência presente no sinal ( $F_s$ ). O seu intervalo de tempo dividido em partes iguais obtêm-se intervalos em que cada subdivisão deste sinal compreenda um intervalo com período de  $T$  segundos, sendo  $T = 1/f$ , em que  $F_s < f/2$ .

Com a ajuda deste teorema e com o tempo de amostragem, será possível obter o valor aproximado para a frequência. O valor da frequência e o tamanho da janela serão delimitados no *Matlab*®, a janela é o dobro do que irá aparecer no espectro de frequência.

## 2.10 MATLAB®

O *Matlab*® é uma linguagem sofisticada que serve como uma ferramenta para um melhor entendimento de uma miríade de tópicos, incluindo a teoria de controle, projeto de filtros e obviamente, sistemas lineares e sinais (LATHI, 1998).

Figura 10 – Janela de inicialização do *Matlab*®



Fonte: Autor (2020).

A estrutura de programação flexível do *Matlab*® promove um rápido desenvolvimento e análise. A capacidade de visualização possibilita uma apreciação única do comportamento do sistema e caracterização do sinal.

O *Matlab*® é um software interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. O *Matlab*® integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação

tradicional. O *Matlab*® é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento.

Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem *Fortran*, *Basic* ou *C*. Além disso, as soluções dos problemas são expressas no *Matlab*® quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

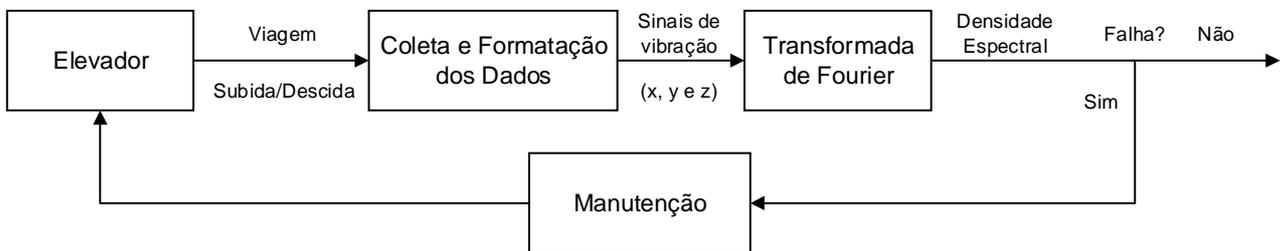
O *Matlab*® é também capaz de executar sequências de comandos armazenadas em arquivos. Os arquivos que contêm as declarações do *Matlab*® são chamadas arquivos “.m”, e consistem de uma sequência de comandos normais do *Matlab*®, possibilitando incluir outros arquivos “.m” escritos no formato texto (*ASCII*). Para editar um arquivo texto na Janela de Comando do *Matlab*®. Os arquivos podem ser editados fora do *Matlab*® utilizando qualquer editor de texto.

### 3 METODOLOGIA

Para realizar a detecção de falhas em elevadores através da transformada de Fourier é necessária, inicialmente, a coleta de sinais, dados de vibração por exemplo durante a viagem do elevador a ser analisado.

Neste trabalho foi utilizado o acelerômetro de um celular. Após, foi realizada a formatação dos dados coletados para aplicar a transformada de Fourier programada por algoritmos no *Matlab*®, obtendo o espectro dos sinais de vibração no domínio frequência, assim, comparando os resultados. Ilustrado no diagrama de blocos da Fig. 11.

Figura 11 - Esquema da síntese da metodologia empregada neste trabalho.



Fonte: Autor (2020).

#### 3.1 COLETA DE DADOS

Inicialmente foi preciso coletar os dados da viagem de um elevador. Para isso foi utilizado um aparelho celular *Smartphone* da marca LG X POWER, com sistema operacional *Android*, ilustrado na fig. 12. Neste aparelho foi instalado um aplicativo chamado *Accelerometer Meter*. Este foi escolhido porque grava os dados em um arquivo txt, para serem utilizados pelo *Matlab*®.

Figura 12 - Celular *Smartphone* LG X POWER



Fonte: Autor (2020).

Para a coleta dos dados da viagem de um elevador foi seguido os seguintes passos:

1. O elevador foi levado para seu extremo inferior para gravar os dados de uma viagem de subida da cabine do elevador;
2. Dentro da cabine do elevador foi colocado o celular deitado no chão, no meio da cabine e com a parte superior do celular apontado para a porta do elevador e a tela para cima. Todos os dados foram coletados em elevadores com uma porta de acesso para cabine, não havendo portas opostas;
3. Com o celular posicionado e com o aplicativo aberto, foi acionado último andar na botoeira da cabine, foi acionado *start* no aplicativo para iniciar a gravação dos dados e após aguardar o elevador terminar a viagem, foi acionado *stop* no aplicativo para encerrar a gravação dos dados;
4. Foi repetido os passos do item anterior para gravar os dados para uma viagem de descida da cabine do elevador.

Com este método, temos como dados o eixo X (detecta vibrações nas laterais do elevador), o eixo Y (detecta vibrações entre o fundo e a porta do elevador) e o eixo Z (detecta vibrações entre o piso e o teto da cabine). Após realizar este passo a passo, este arquivo txt foi transferido para o computador, ficando como ilustrado na fig. 13.

Figura 13 - Arquivo obtido pelo aplicativo no formato txt

```

Keuwl Accelerometer Data File
2019-11-26 13-20-39

Time (s), X (m/s2), Y (m/s2), Z (m/s2), R (m/s2), Theta (deg), Phi (deg)
0.000000,0.759000,0.158000,9.884000,9.914358,4.484934,11.759246
0.0049199,0.713000,0.182000,9.601000,9.629159,4.382891,14.319509
0.0098398,0.807000,0.107000,9.850000,9.883582,4.724473,7.552785
0.0147596,0.814000,0.071000,9.730000,9.764248,4.800283,4.984927
0.0196795,0.787000,0.021000,9.793000,9.824595,4.596274,1.528495
0.0245996,0.682000,0.110000,9.623000,9.647764,4.106084,9.162348
0.0295194,0.651000,0.112000,9.872000,9.894075,3.828122,9.761775
0.0344391,0.773000,0.215000,9.489000,9.522861,4.833186,15.543223
0.0393590,0.771000,0.098000,9.608000,9.639383,4.624698,7.243887
0.0442789,0.708000,0.153000,9.764000,9.790831,4.242702,12.194200
0.0491985,0.620000,0.124000,9.850000,9.870273,3.672798,11.309932
0.0541185,0.694000,0.088000,9.625000,9.650389,4.156693,7.226604
0.0590380,0.644000,0.040000,9.644000,9.665561,3.827662,3.554178
0.0639577,0.828000,0.026000,9.556000,9.591840,4.954561,1.798552
0.0688773,0.783000,-0.002000,9.625000,9.656796,4.650842,359.853638
0.0737969,0.878000,0.098000,9.649000,9.689360,5.231357,6.368839
0.0787165,0.773000,0.126000,9.680000,9.711633,4.625672,9.257868
0.0836359,0.649000,0.055000,9.692000,9.713861,3.844609,4.844000
0.0885549,0.807000,0.045000,9.982000,10.014669,4.629185,3.191627
0.0934738,0.708000,0.095000,9.788000,9.814033,4.174153,7.642345
0.0983928,0.730000,0.184000,9.654000,9.683310,4.459004,14.146995
0.1033121,0.780000,0.033000,9.764000,9.795161,4.571447,2.422607
0.1082314,0.684000,0.119000,9.611000,9.636044,4.131711,9.869343
0.1131507,0.634000,0.064000,9.817000,9.837660,3.713886,5.764275
0.1180697,0.670000,0.102000,9.798000,9.821411,3.956809,8.656176
0.1229890,0.673000,0.062000,9.730000,9.753444,3.973403,5.263506
0.1279080,0.704000,0.009000,9.661000,9.686621,4.168143,0.732435
0.1328269,0.756000,0.026000,9.814000,9.843110,4.407578,1.969714
0.1377459,0.696000,0.081000,9.661000,9.686377,4.148268,6.638182
0.1426650,0.775000,0.091000,9.570000,9.601760,4.661486,6.696968
0.1475841,0.747000,0.040000,9.687000,9.715842,4.415880,3.065120
0.1525036,0.706000,0.052000,9.685000,9.710837,4.180482,4.212480

```

Este arquivo apresenta os dados em que o aplicativo coleta do acelerômetro. Cada coluna representa uma variável e cada linha representa o valor da variável coletada a cada amostra de tempo. A primeira coluna é o tempo de amostra, a segunda coluna é o eixo X, a terceira linha é o eixo Y e a quarta linha é o eixo Z. A quinta, a sexta e a sétima coluna não serão utilizadas neste trabalho.

### 3.2 FORMATAÇÃO DOS DADOS

A rotina elaborada pelo *Matlab*® utiliza apenas os dados, foi excluído do arquivo o cabeçalho “*Keuwl Accelerometer Data File*”, a data da coleta e a identificação das colunas “*Time (s), X (m/s<sup>2</sup>), Y (m/s<sup>2</sup>), Z (m/s<sup>2</sup>), R (m/s<sup>2</sup>), Theta (deg), Phi (deg)*”. Para a rotina do *Matlab*® manipular os dados, também foi necessário trocar as vírgulas “,” que separam as colunas em cada linha por espaço “ ”. Ficando como ilustrado na fig. 14.

Figura 14 - Arquivo modificado para ser manipulado pelo *Matlab*®

```

0.0000000 0.759000 0.158000 9.884000 9.914358 4.484934 11.759246
0.0049199 0.713000 0.182000 9.601000 9.629159 4.382891 14.319509
0.0098398 0.807000 0.107000 9.850000 9.883582 4.724473 7.552785
0.0147596 0.814000 0.071000 9.730000 9.764248 4.800283 4.984927
0.0196795 0.787000 0.021000 9.793000 9.824595 4.596274 1.528495
0.0245996 0.682000 0.110000 9.623000 9.647764 4.106084 9.162348
0.0295194 0.651000 0.112000 9.872000 9.894075 3.828122 9.761775
0.0344391 0.773000 0.215000 9.489000 9.522861 4.833186 15.543223
0.0393590 0.771000 0.098000 9.608000 9.639383 4.624698 7.243887
0.0442789 0.708000 0.153000 9.764000 9.790831 4.242702 12.194200
0.0491985 0.620000 0.124000 9.850000 9.870273 3.672798 11.309932
0.0541185 0.694000 0.088000 9.625000 9.650389 4.156993 7.226604
0.0590380 0.644000 0.040000 9.644000 9.665561 3.827662 3.554178
0.0639577 0.828000 0.026000 9.556000 9.591840 4.954561 1.798552
0.0688773 0.783000 -0.002000 9.625000 9.656796 4.650842 359.853638
0.0737969 0.878000 0.098000 9.649000 9.689360 5.231357 6.368839
0.0787165 0.773000 0.126000 9.680000 9.711633 4.625672 9.257868
0.0836359 0.649000 0.055000 9.692000 9.713861 3.844609 4.844000
0.0885549 0.807000 0.045000 9.982000 10.014669 4.629185 3.191627
0.0934738 0.708000 0.095000 9.788000 9.814033 4.174153 7.642345
0.0983928 0.730000 0.184000 9.654000 9.683310 4.459004 14.146995
0.1033121 0.780000 0.033000 9.764000 9.795161 4.571447 2.422607
0.1082314 0.684000 0.119000 9.611000 9.636044 4.131711 9.869343
0.1131507 0.634000 0.064000 9.817000 9.837660 3.713886 5.764275
0.1180697 0.670000 0.102000 9.798000 9.821411 3.956809 8.656176
0.1229890 0.673000 0.062000 9.730000 9.753444 3.973403 5.263506
0.1279080 0.704000 0.009000 9.661000 9.686621 4.168143 0.732435
0.1328269 0.756000 0.026000 9.814000 9.843110 4.407578 1.969714
0.1377459 0.696000 0.081000 9.661000 9.686377 4.148268 6.638182
0.1426650 0.775000 0.091000 9.570000 9.601760 4.661486 6.696968
0.1475841 0.747000 0.040000 9.687000 9.715842 4.415880 3.065120
0.1525036 0.706000 0.052000 9.685000 9.710837 4.180482 4.212480
0.1574226 0.682000 0.100000 9.726000 9.750395 4.053861 8.341699
0.1623417 0.766000 0.055000 9.654000 9.684498 4.548250 4.106879
0.1672611 0.790000 0.081000 9.766000 9.798235 4.648862 5.854173
0.1721800 0.653000 0.110000 9.745000 9.767473 3.887460 9.561893
0.1770993 0.696000 0.026000 9.678000 9.703030 4.116230 2.139365
0.1820188 0.720000 0.007000 9.635000 9.661867 4.273839 0.557025
0.1869380 0.708000 0.100000 9.639000 9.665483 4.242425 8.039445
0.1918573 0.773000 0.093000 9.584000 9.615572 4.644310 6.860309
0.1967765 0.759000 0.014000 9.675000 9.704737 4.486418 1.056719
0.2016960 0.720000 0.071000 9.802000 9.828665 4.221414 5.631793
0.2066156 0.752000 0.143000 9.699000 9.729160 4.512624 10.766792
0.2115350 0.694000 0.064000 9.570000 9.595344 4.165229 5.268858
0.2164541 0.706000 0.112000 9.608000 9.634555 4.254963 9.014297

```

Fonte: Autor (2020).

### 3.3 JANELA DE SIMULAÇÃO

Para facilitar a realização das simulações foi programada no *Matlab*® uma janela, como visto na Fig.15, para se obter os gráficos de densidade espectral. A janela de simulação que executa os algoritmos da TF, permite a realização de análises mais rápidas, além da visualização de resultados.

A janela foi criada utilizando a ferramenta *Guide* do Matlab™. A janela, permite que o usuário possa escolher o nome do arquivo, a banda de frequência ou a taxa de amostragem, por exemplo, como mostra a Figura 15. Ao clicar em “calcular” a rotina é executada e os gráficos de densidade espectral são exibidos. A opção de “finalizar” irá fechar a janela de simulação.

Figura 15 - Janela de Simulação

A imagem mostra uma janela de software intitulada "Transformada de Fourier". O conteúdo principal da janela é um formulário com o título "Cálculo da Densidade Espectral". O formulário contém seis campos de entrada de texto, cada um com uma etiqueta à esquerda e um botão de seta para a direita:

- Nome do arquivo: elevador\_\_7f.txt
- Banda de frequência: 50
- Número de pontos: 2048
- X máximo: 50
- Y máximo: 0.5
- Taxa de amostragem: 0.3837

Na base do formulário, há dois botões de ação: "CALCULAR" (destacado com um contorno azul) e "FINALIZAR".

Fonte: Autor (2020).

## 4 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir correspondem aos sinais coletados com o acelerômetro do celular (coordenadas x, y e z) de um elevador sem falhas (considerando um comportamento normal) e com falhas (considerando defeitos) e o espectro destes sinais. Como elevador com falhas foi analisado um com trepidação e outro com solavanco.

Os gráficos de densidade espectral de potência foram obtidos com a Transformada de Fourier cujos algoritmos, que seguem no anexo A, foram programados no programa *Matlab*®. Dois tipos de falhas em elevadores foram analisados com a Transformada de Fourier neste trabalho, solavancos e trepidações.

Nos gráficos dos sinais do acelerômetro o eixo horizontal corresponde ao tempo dado em milissegundos (ms) e o eixo vertical corresponde aos valores de aceleração em ( $m/s^2$ ). Nos gráficos de densidade espectral de potência o eixo horizontal corresponde aos valores de frequência em Hertz (Hz) e o eixo vertical corresponde aos valores de densidade espectral de potência em (W/Hz).

O tempo de coleta dos sinais do acelerômetro depende do número de andares do edifício onde o elevador se encontra e da velocidade do elevador. Ainda, o tempo de coleta dos sinais também é função do número de paradas realizadas durante o percurso entre os andares.

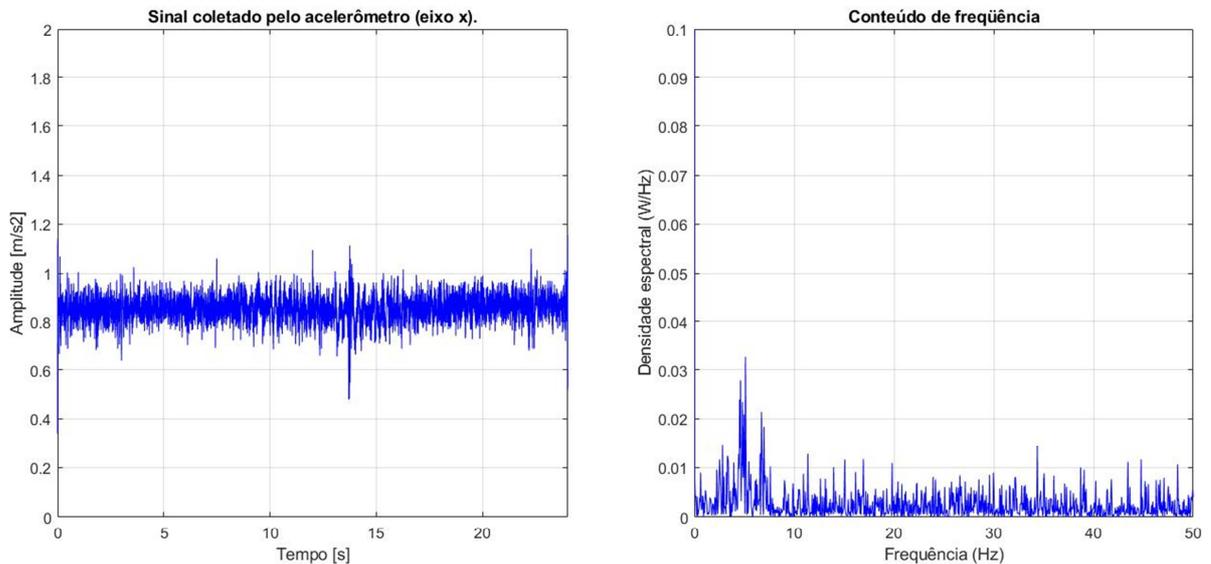
Não é interessante segmentar o sinal, pois a velocidade do elevador, quando se desloca de um andar até o próximo, é menor do que a velocidade de quando ele percorre todo o percurso de extremo a extremo. Sendo assim, a percepção para as falhas, trepidação e solavanco por exemplo, será minimizada.

### 4.1 ELEVADOR SEM FALHAS

Na Fig. 16 é possível observar o sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo x e o seu espectro do sinal obtido a partir da transformada de Fourier durante uma viagem de subida sem falhas do elevador. Neste caso, o elevador atende 4 pavimentos, tem sua velocidade nominal de 45m/min e levou em torno de 26 s para percorrer os andares.

Segundo o Teorema de *Nyquist* a frequência da amostragem deve ser igual ou maior a duas vezes a maior frequência presente no sinal.

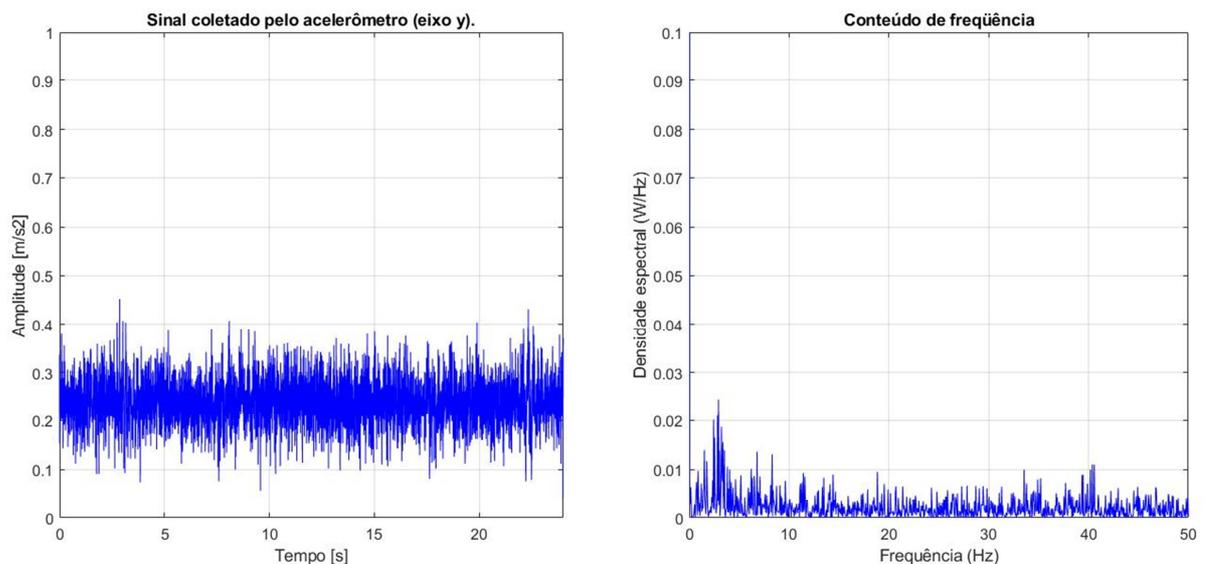
Fig. 16 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo x.



Fonte: Autor (2020).

Na Fig. 17 é possível observar o sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo y e o seu espectro durante uma viagem de subida sem falhas do elevador. Pode-se também observar na Fig.17 que o espectro do sinal não apresenta nenhuma componente adicional de frequência, somente pequenos picos em frequências menores que 5 Hz que possuem um valor de densidade espectral de potência menor que 0,03 W/Hz.

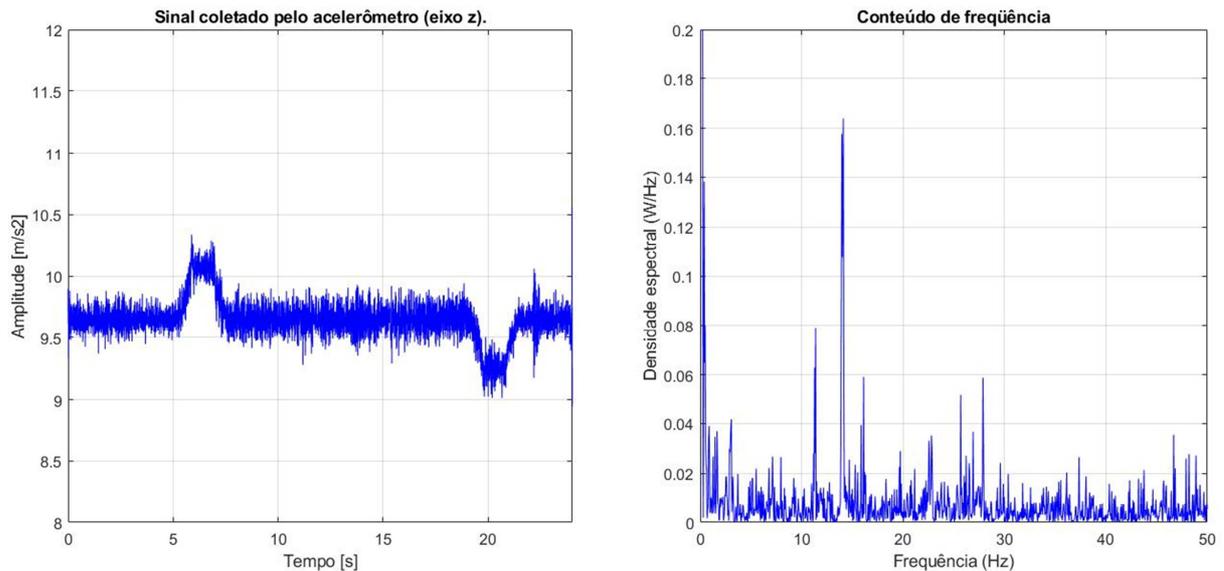
Fig. 17 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo y.



Fonte: Autor (2020).

Na Fig. 18 pode-se observar o sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo z e o seu espectro durante uma viagem de subida sem falhas do elevador. Pode-se observar na Fig. 18 que o espectro do sinal ao longo eixo z apresenta ao menos uma componente adicional de frequência em torno de 15 Hz que possui um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,16 W/Hz.

Fig. 18 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal sem falhas ao longo do eixo z.



Fonte: Autor (2020).

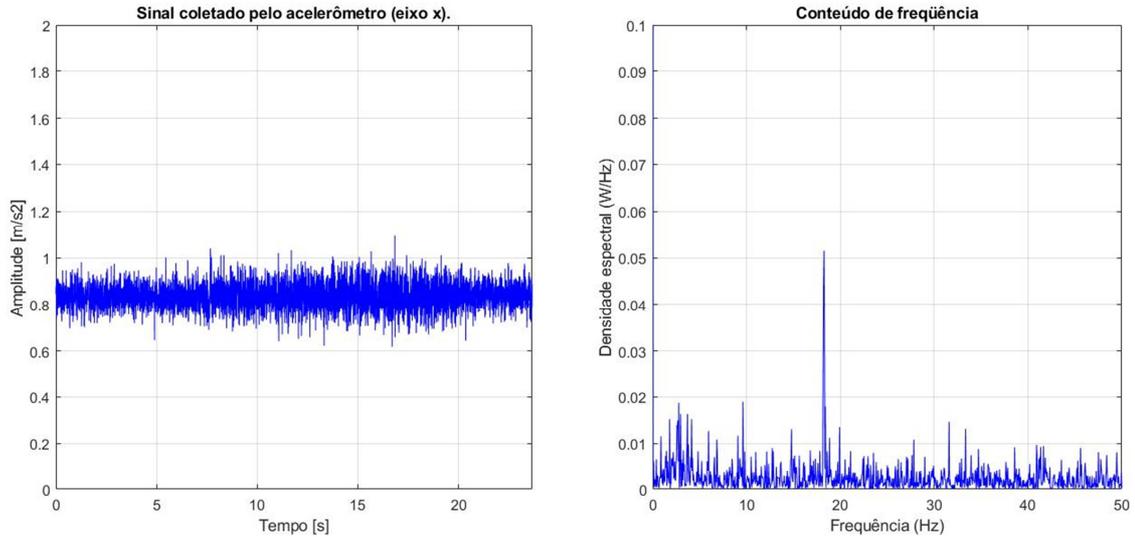
É possível observar também na Fig. 18 que o sinal sem falhas coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo z apresenta um aspecto um pouco diferente que os sinais coletados nos eixos x e y; pois este tem a orientação como vetor voltado para a tela do celular. Como descrito no item 4.1, o eixo z detecta o movimento vertical da cabine do elevador. Sendo assim, é possível observar o movimento de subida ou descida do elevador.

A amplitude dos sinais também é diferente. Ao longo do eixo x, a amplitude varia de 0,5 a 1,1m/s<sup>2</sup>. Ao longo do eixo y varia de 0,05 a 0,45m/s<sup>2</sup>. Já ao longo do eixo z, a amplitude varia de aproximadamente 8 até 11m/s<sup>2</sup>.

## 4.2 ELEVADOR COM TREPIDAÇÃO

Um elevador com trepidação foi analisado através do método proposto neste trabalho. O objetivo é comparar o espectro dos sinais do acelerômetro coletados no elevador sem falhas com os sinais de um elevador com falhas e determinar as componentes adicionais de frequência.

Fig. 19 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo x.

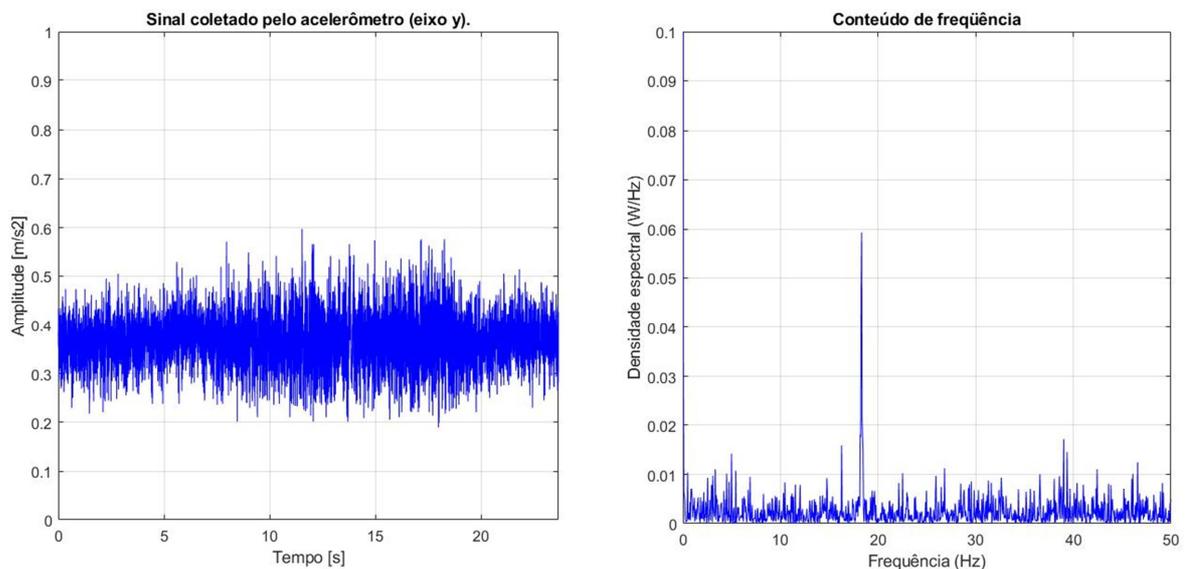


Fonte: Autor (2020).

O sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo x e o seu espectro do sinal obtido a partir da transformada de Fourier durante uma viagem de subida do elevador com falha tipo trepidação pode ser observado na Fig. 19. Neste caso, o elevador atende 9 pavimentos, tem sua velocidade nominal 90 m/min e levou em torno de 26 s para percorrer os andares.

Pode-se observar na Fig. 19 que o espectro do sinal apresenta agora uma componente adicional de frequência de 18 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,05 W/Hz.

Fig. 20 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo y.



Fonte: Autor (2020).

Na Fig. 20 é possível observar o sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo y e o seu espectro durante uma viagem de subida com falha de trepidação no elevador.

É possível observar na Fig. 20 que o espectro do sinal com falha de trepidação apresenta agora uma componente adicional de frequência entre 18 e 20 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,06 W/Hz.

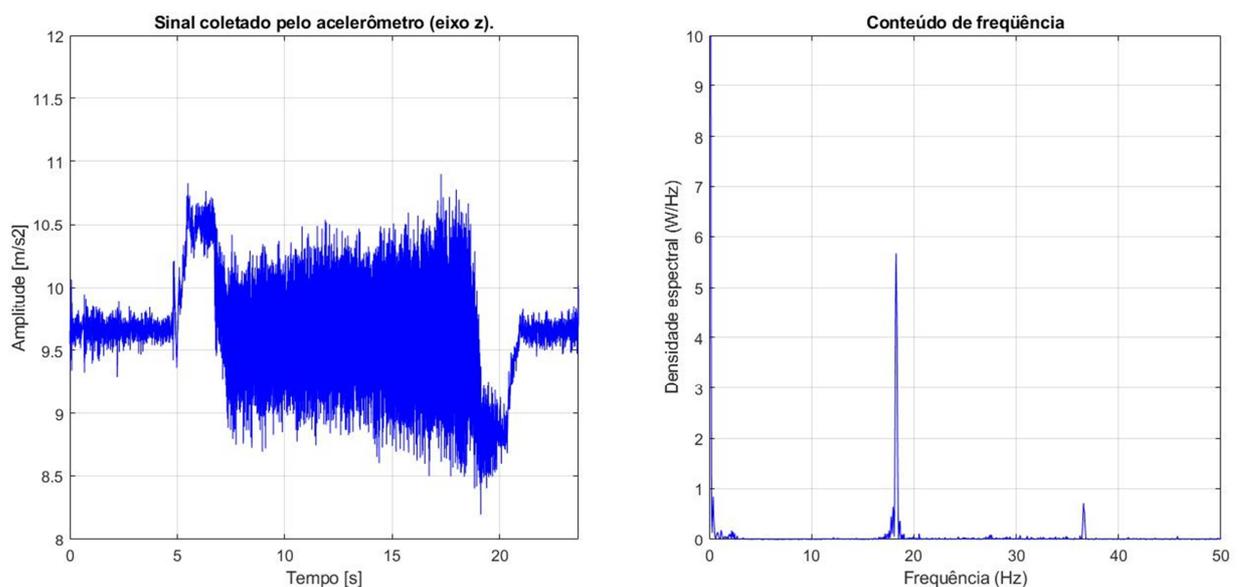
O sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo z e o seu espectro durante uma viagem de subida com falha de trepidação no elevador é mostrado na Fig. 21.

Pode-se observar na Fig. 21 que o espectro do sinal com falha de trepidação apresenta agora duas componentes adicionais de frequência, uma em torno de 18 Hz e outra em torno de 36 Hz, com valores de densidade espectral de potência em torno de 5,8 W/Hz e 0,8 W/Hz respectivamente.

No caso do elevador com trepidação, foi possível observar através da TF um aumento significativo do valor de densidade espectral nos sinais com falha e o surgimento de outras componentes adicionais de frequência em torno dos 18 Hz ao longo de todos os eixos e de 36 Hz ao longo do eixo z.

A amplitude do sinal ao longo do eixo x no caso do elevador com trepidação variou de 0,6 a 1,1m/s<sup>2</sup>; ao longo do eixo y de 0,02 a 0,6m/s<sup>2</sup> e ao longo do eixo z, variou de aproximadamente 8 até 11m/s<sup>2</sup>.

Fig. 21 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo z.



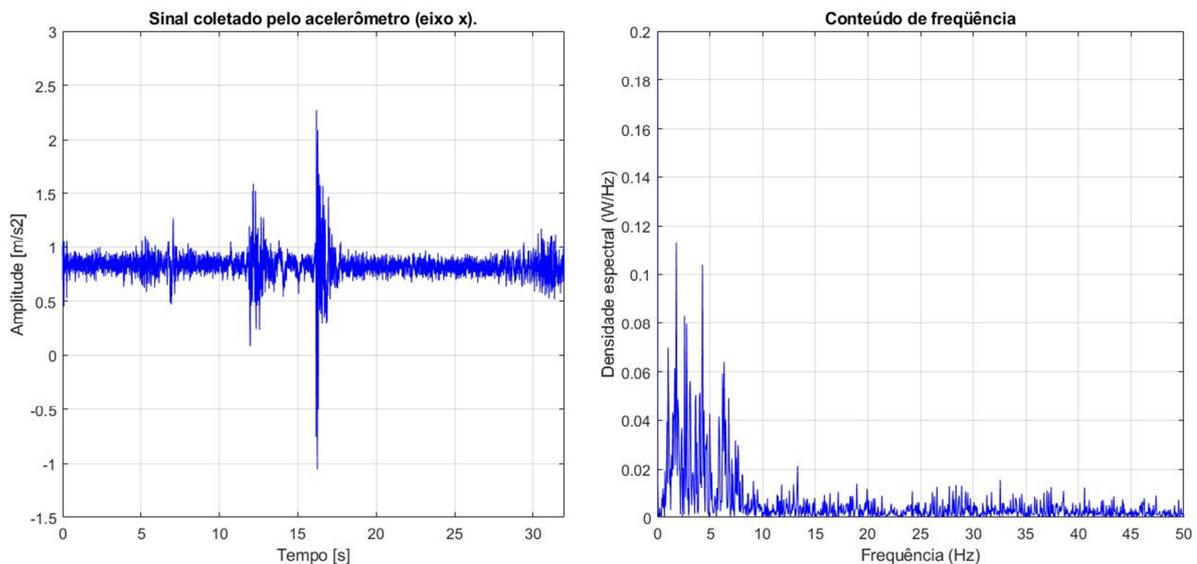
### 4.3 ELEVADOR COM SOLAVANCOS

Um elevador com falhas do tipo solavancos também foi analisado através do método proposto neste TCC. Ao se comparar o espectro dos sinais do acelerômetro coletados no elevador sem falhas com os sinais de um elevador com solavancos espera-se determinar as componentes adicionais de frequência em função desta falha.

O sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo x e o seu espectro do sinal obtido a partir da transformada de Fourier durante uma viagem de subida do elevador com falha tipo trepidação pode ser observado na Fig. 22. Neste caso, o elevador atende 5 pavimentos, tem sua velocidade nominal de 45 m/min e levou em torno de 35 s para percorrer os andares.

Pode-se observar na Fig. 22 que o espectro do sinal apresenta agora um grande conteúdo adicional de frequência 0 e 10 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,1 W/Hz.

Fig. 22 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com falha de trepidação ao longo do eixo x.



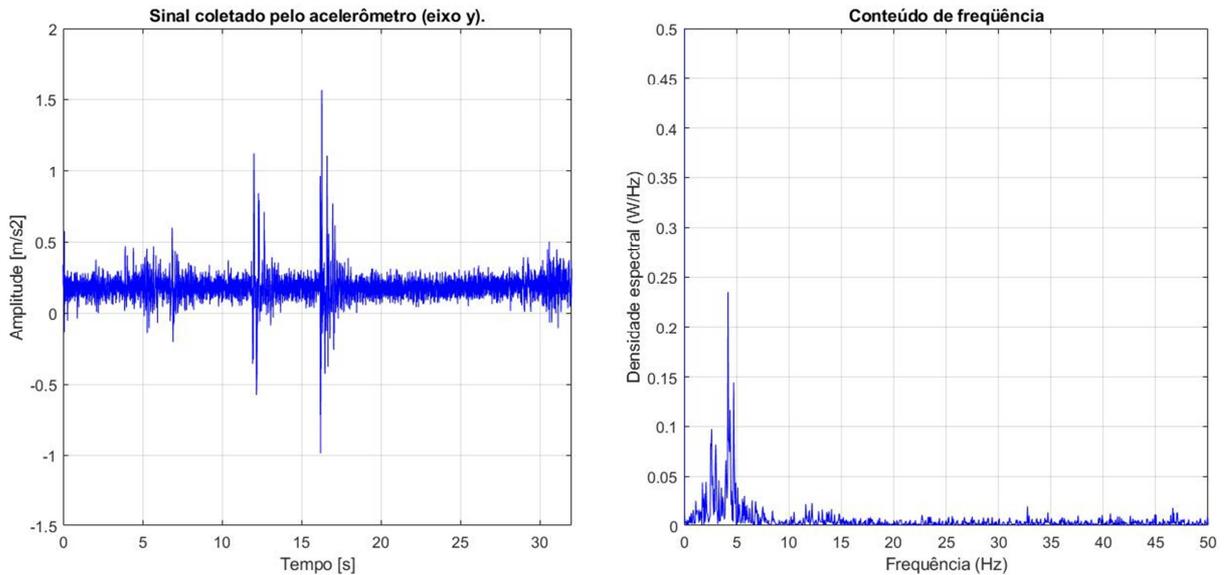
Fonte: Autor (2020).

Na Fig. 23 pode-se possível observar o sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo y e o seu espectro durante uma viagem de subida com solavancos no elevador. Pode-se observar na Fig. 23 que o espectro do sinal com solavancos apresenta agora uma componente adicional de frequência em torno de 5 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,2 W/Hz.

O sinal coletado pelo acelerômetro ao longo do eixo z e o seu espectro durante uma viagem de subida com solavancos no elevador é mostrado na Fig. 24. É possível observar que

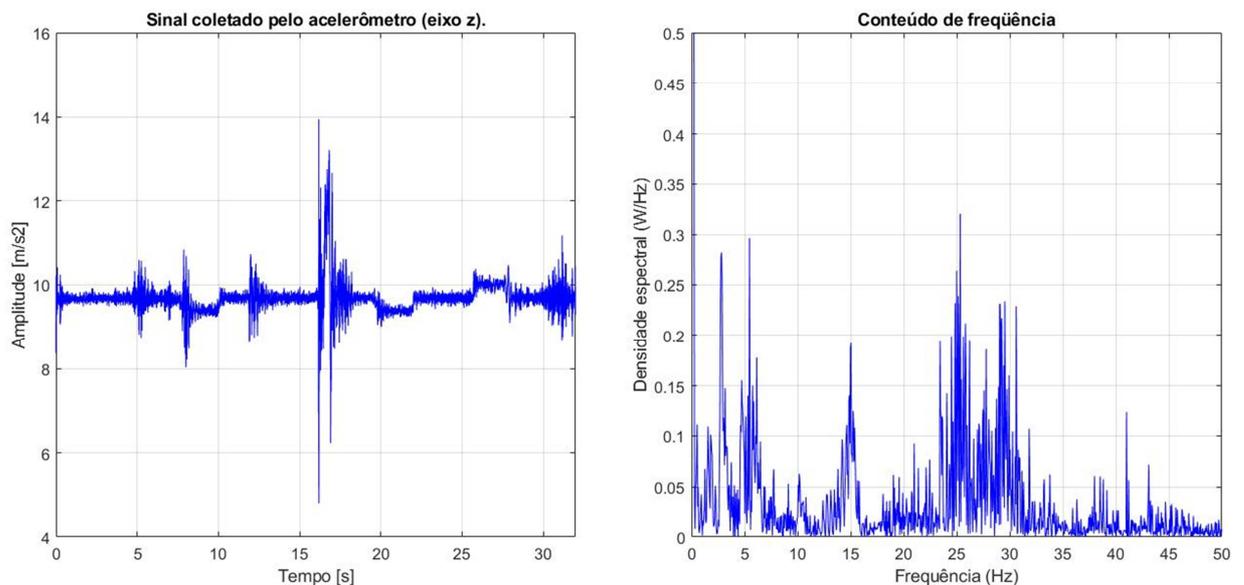
o espectro do sinal ao longo do eixo z com solavancos apresenta agora várias componentes adicionais de frequência, situadas em torno de 5, 15, 25 e 30 Hz com valores de densidade espectral de potência em torno de 0,2 W/Hz e 0,3 W/Hz. No geral, o gráfico de densidade espectral do sinal ao longo do eixo z apresenta muito mais conteúdo harmônico.

Fig. 23 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com solavancos ao longo do eixo y.



Fonte: Autor (2020).

Fig. 24 - Sinal e espectro do acelerômetro considerando o sinal com solavancos ao longo do eixo z.



Fonte: Autor (2020).

No caso do elevador com solavancos, também foi possível observar através da TF um aumento significativo do valor de densidade espectral nos sinais com falha e o surgimento de

outras componentes adicionais de frequência em torno dos 5 Hz ao longo de todos os eixos e de 15, 25 e 30 Hz ao longo do eixo z.

No caso do elevador com solavancos, a amplitude do sinal ao longo do eixo x neste caso variou de -1 a 2,5  $\text{m/s}^2$ ; ao longo do eixo y de -1 a 1,5  $\text{m/s}^2$  e ao longo do eixo z, variou de aproximadamente 5 até 14  $\text{m/s}^2$  aproximadamente.

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se dizer que o elevador é um dos equipamentos mais antigos construídos pela humanidade. Construídos inicialmente pelos egípcios, hoje são usados largamente em edifícios e inúmeras outras aplicações.

Contudo, à medida que são usados, podem sofrer diferentes desgastes físicos e químicos. Com o passar do tempo, o elevador pode vir a apresentar trepidações, desbalanceamentos ou solavancos, como exemplo.

Com o intuito de manter operação desses equipamentos e evitar possíveis falhas, algumas medidas de manutenção podem ser tomadas. Ainda, o uso de estratégias de manutenção que fazem uso de ferramentas de processamento de sinais, inteligência artificial aliadas a um constante monitoramento reduzem a ocorrência de defeitos e falhas nestes equipamentos.

Ao longo deste trabalho de conclusão de curso foi apresentado, além de uma descrição detalhada dos elevadores, uma estratégia para realizar a detecção de falhas nestes equipamentos usando os sinais de vibração coletados com os acelerômetros de um celular durante as viagens de subida ou descida de um elevador.

Estes sinais, com ou sem falhas, formatados foram repassados e analisados através da Transformada de Fourier que foi programada através de algoritmos na ferramenta *software* computacional Matlab<sup>®</sup>.

Os resultados apresentados neste trabalho de conclusão de curso foram os sinais coletados com o acelerômetro do celular (coordenadas x, y e z) de elevadores sem falhas (considerando um comportamento normal) e com falhas (considerando defeitos) e o espectro destes sinais.

Os gráficos de densidade espectral de potência foram obtidos através da Transformada de Fourier, sendo que dois tipos de falhas comumente encontradas em elevadores foram analisados, solavancos e trepidações. Os sinais de vibração destes elevadores foram comparados com sinais de elevadores que apresentavam um comportamento sem falhas.

Nos sinais coletados pelo acelerômetro durante uma viagem de subida sem falhas do elevador, foi possível observar que o espectro dos sinais não apresentava nenhuma componente adicional de frequência, somente pequenos picos em baixas frequências menores

que 5 Hz (ao longo dos eixos x e y) e 15 Hz (ao longo do eixo z) que possuem um valor de densidade espectral de potência menores 0,05 W/Hz (eixos x e y) 0,15 W/Hz (eixo z).

No caso dos sinais coletados pelo acelerômetro durante uma viagem de subida com falhas de trepidação do elevador, foi possível observar que o espectro dos sinais apresentava uma componente adicional de frequência de 18 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,05 W/Hz, ao longo dos eixos x e y e que o espectro do sinal, ao longo do eixo z, apresentava agora duas componentes adicionais de frequência, uma em torno de 18 Hz e outra em torno de 36 Hz, com valores de densidade espectral de potência em torno de 5,8 W/Hz e 0,8 W/Hz respectivamente.

Ou seja, foi possível observar um aumento significativo do valor de densidade espectral nos sinais com falha de trepidação e o surgimento de outras componentes adicionais de frequência, detectando a falha de trepidação.

No caso dos sinais coletados pelo acelerômetro durante uma viagem de subida com solavancos no elevador, foi possível observar que o espectro dos sinais apresentava uma componente adicional de frequência entre 0 e 10 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,1 W/Hz ao longo do eixo x; uma componente adicional de frequência em torno de 5 Hz com um valor de densidade espectral de potência em torno de 0,2 W/Hz ao longo do eixo y e apresenta várias componentes adicionais de frequência, situadas em torno de 5, 15, 25 e 30 Hz com valores de densidade espectral de potência em torno de 0,2 W/Hz e 0,3 W/Hz ao longo do eixo z.

Assim, também foi possível observar um aumento significativo do valor de densidade espectral nos sinais com solavancos e o surgimento de outras componentes adicionais de frequência, detectando este tipo de falha através da metodologia apresentada.

Assim, a metodologia e os resultados apresentados ao longo deste trabalho de conclusão de curso demonstram que é possível realizar uma detecção de defeitos ou falhas em elevadores através do uso de um celular e de ferramentas de processamento de sinais e com isso melhorar as tarefas de manutenção e prevenir acidentes.

Como exemplos de trabalhos futuros cita-se a necessidade de realizar a captação dos sinais dos acelerômetros com uma taxa de amostragem maior, para que seja possível observar uma banda maior de frequência.

Cita-se também a possibilidade de usar outras ferramentas de processamentos de sinais, como a transformada *Wavelet* ou *Wavelet Packet*, por exemplo, que permitam realizar uma melhor análise dos sinais.

O uso de ferramentas de inteligência artificial, como as redes neurais como exemplo, para classificar as falhas presentes em elevadores também seria uma outra possibilidade de ampliação deste trabalho no futuro.

## REFERÊNCIAS

- AUGER, F. et al. **Time-frequency toolbox for use with matlab**. Paris: CNRS/Rice University, 1996.
- BRIGHAM, E. O.; MORROW, R. E. The fast fourier transform. **IEEE Spectrum Magazine**, New York, v.4, n.12, p.63–70, Dec. 1967.
- DECKMANN, Indhirha. **Deteção De Falhas Em Atuadores Elétricos Através Da Transformada De Fourier**. 2019. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Elétrica
- DJURDJANOVIC, D. et al. Web-enabled remote spindle monitoring and prognostics. In: INTERNATIONAL CIRP CONFERENCE ON RECONFIGURABLE SYSTEMS, 2., 2003, Ann Arbor. **Proceedings**. . . Ann Arbor: IMS, 2003. v.1, p.21–22.
- DJURDJANOVIC, D.; LEE, J.; NI, J. Watchdog agent: an infotronics-based prognostic approach for product performance degradation assessment and prediction. **Advanced Engineering Informatics**, Amsterdam, v.17, n.3, p.109–125, July 2003.
- FIGUEIREDO, Ligia J.; GAFANIZ, Ana R.; LOPES, Gustavo S.; PEREIRA, Rúben. **Aplicações de Acelerômetro**. Monografia, Lisboa, Dezembro 2007.
- FERNANDES, Marcos Júnior. **Sistema de captura de movimentos baseado em acelerômetro**. Monografia, Universidade Luterana do Brasil, Julho 2008.
- GONÇALVES, Luiz Fernando et al. **Um Método de Classificação de Falhas em Atuadores Elétricos em Mapas Auto-Organizáveis**. Porto Alegre. UFRGS - PPGEE, [2007]
- GONÇALVES, Luis Fernando. **Desenvolvimento de um sistema de manutenção inteligente embarcado**. 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul- Escola de Engenharia - Departamento de engenharia elétrica. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-Graduação em engenharia elétrica.
- GONÇALVES, Luiz Fernando. **Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída**.2004. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia - Departamento de engenharia elétrica. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em engenharia elétrica.
- IUNQ, Marcos. **Análise preliminar e controle de riscos de quedas nas tividades de instalação de elevadores**.2017. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Pato Branco - PR - Departamento Acadêmico de Mecânica - Curso de Especialização em Engenharia de Produção.
- LIMA, Michael Santos; LIMA, Adams P. Santos. **O elevador de materiais e pessoas: a segurança na sua operação**. 2007. Universidade da Amazônia – UNAMA. Belém – PA. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Civil.
- LATHI, B. P. **Modern digital and analog communication systems**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Oxford University Press, 1998.
- MASCARENHAS, A. W. **Dispositivo baseado em acelerômetros capacitivos para monitoração de máquinas rotativas**. 2006. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal de Campina Grande, Capina Grande, 2006.
- MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v.1, n.21, p.87–96, jun. 2005.

- NUNES, E. L. **Manutenção centrada em confiabilidade (MCC)** : análise da implantação em uma sistemática de manutenção preventiva consolidada. 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- PARRAGA, A. **Aplicação da transformada wavelet packet na análise e classificação de sinais de vozes patológicas**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- PORTO ALEGRE, Lei Nº 12.002, De 21 De Janeiro 2016, Que "Estabelece Normas Para A Instalação, A Conservação E O Uso De Elevadores, Escadas Rolantes E Outros Equipamentos De Transporte Instalados, De Forma Permanente, Em Edificações No Município De Porto Alegre E R, **Diário Oficial** [Porto Alegre], Porto Alegre, 21 Jan 2016, p 3.
- QUISPE, G. C. S. **Reconhecimento de padrões em sensores integrados**. 2005. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ROBERTS, M. J. **Signals and Systems**. New York: McGraw-Hill, 2001.
- Charles K. Alexander e Matthew N. O. Sadiku; **Fundamentos de Circuitos Elétricos**; 3ª ed.; McGraw-Hill, 2008.
- SCHUCK, A. **Análise e processamento de sinais de voz disfônica através da transformada wavelet discreta**. 1998. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- SILVA, S. V. da. **Projeto de uma arquitetura dedicada à compressão de imagens no padrão JPEG2000**. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SELLITTO, M. A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Revista Produção**, São Paulo, v.15, n.1, p.44–59, jan. 2005.
- SARKAR, T. K.; SU, C. A Tutorial on wavelets from electrical engineering perspective: the continuous case. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, San Diego, v.40, n.6, p.36–37, Dec. 1998.
- SHIKARI, B.; SADIWALA, C. M.; DWIVEDI, R. K. **Automation in condition based maintenance using vibration analysis**. Disponível em: <[http://www.maintenanceworld.com/articles/shikarib/international\\_paper.pdf](http://www.maintenanceworld.com/articles/shikarib/international_paper.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2020.
- YAN, J.; LEE., J. Degradation assessment and fault modes classification using logistic regression. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Evanston, v.127, n.4, p.912–914, Nov. 2005.

## APÊNDICE

### A

```

% *****
clc;
clear all;
nome_arquivo = 'elevador__6f.txt';
JanF = 4*512 ;
Npontos = 100;
XMAX = 50;
YMAX = 0.5;
textoy = 'Densidade Espectral de Potência [W/m2]';

%
%
% *****
texto=strcat(nome_arquivo); % nome do arquivo %
de=textread(texto,'%s','headerlines',0);
[lde, cde]=size(de)
TEMPO = (lde*0.3837)/(60*60)
pause
% *****
% *****
lf=lde/7%;
l=0;
for k=2:7:7*lf, %3482,%3314,%3445,
    l=l+1;
    currcell=de(k);
    currstruct=cell2struct(currcell,'string',1);
    currstr=currstruct.string;
    x(l,1)=str2num(currstr);
    %pause
end
% *****
% *****
lt = length(de)%;
%size(de)5pause
lx = length(x)%;
%pause
% *****
for k=1:lx,
    y(k) = x(k,1); %sin(2*pi*300*tt(k,1));%+ 0.00002*randn(lt);+
    tt(k) = k;
end
% *****
figure;
%subplot(121);
plot(tt(1:lx)/(60*60),y(1:lx))
title('Sinal coletado pelo acelerômetro.')
ylabel('Eixo x [m/s2]')
xlabel('Tempo (s)')
% *****
Y = fft(y,JanF);
% The power spectrum, a measurement of the power at various frequencies, is
% *****
Pyy = Y.* conj(Y) / JanF;
% *****
%Graph the first 257 points (the other 255 points are redundant)
%on a meaningful frequency axis:
% *****

```

```

f = Npontos*(0:(JanF/2))/JanF; %2
% *****
figure;
%subplot(122);
plot(f,Pyy(1:(JanF/2)+1)) % 2
axis([0 XMAX 0 YMAX])
title('Conteúdo de Freqüência')
ylabel(textoy)
xlabel('Freqüência (Hz)')
% *****

% *****
%
% eixo y
%
% *****
l=0;
for k=3:7:7*lf,%3482,%3314,%3445,
    l=l+1;
    currcell=de(k);
    currstruct=cell2struct(currcell,'string',1);
    currstr=currstruct.string;
    x(1,2)=str2num(currstr);
    %pause
end
%
% *****
lt = length(de);
%size(de)5pause
lx = length(x);
% *****
for k=1:lx,
    yy(k) = x(k,2); %sin(2*pi*300*tt(k,1));% %+ 0.00002*randn(lt);+
    tt(k) = k;
end
% *****
figure;
%subplot(121);
plot(tt(1:lx),yy(1:lx))
title('Sinal corrompido com ruído branco e média zero')
ylabel('eixo y')
xlabel('Tempo (ms)')
% *****
Y = fft(yy,JanF);
% The power spectrum, a measurement of the power at various frequencies, is
% *****
Pyy = Y.* conj(Y) /JanF;
% *****
%Graph the first 257 points (the other 255 points are redundant)
%on a meaningful frequency axis:
% *****
f = Npontos*(0:(JanF/2))/JanF; %2
% *****
figure;
%subplot(122);
plot(f,Pyy(1:(JanF/2)+1)) % 2
axis([0 XMAX 0 YMAX])
title('Conteúdo de Freqüência')
xlabel('Freqüência (Hz)')
ylabel('eixo y')

```

```

% *****

% *****
%
% eixo z
%
% *****
l=0;
for k=4:7:7*lf,%3482,%3314,%3445,
    l=l+1;
    currcell=de(k);
    currstruct=cell2struct(currcell,'string',1);
    currstr=currstruct.string;
    x(1,3)=str2num(currstr);
    %pause
end
% *****
lt = length(de);
%size(de)5pause
lx = length(x);
% *****
for k=1:lx,
    yyy(k) = x(k,3); %sin(2*pi*300*tt(k,1));%+ 0.0002*randn(lt);+
    tt(k) = k;
end
% *****
figure;
%subplot(121);
plot(tt(1:lx),yyy(1:lx))
title('Sinal corrompido com ruído branco e média zero')
ylabel('eixo z')
xlabel('Tempo (ms)')
% *****
Y = fft(yyy,JanF);
% The power spectrum, a measurement of the power at various frequencies, is
% *****
Pyy = Y.* conj(Y) / JanF;
% *****
%Graph the first 257 points (the other 255 points are redundant)
%on a meaningful frequency axis:
% *****
f = Npontos*(0:(JanF/2))/JanF; %2
% *****
figure;
%subplot(122);
plot(f,Pyy(1:(JanF/2)+1)) % 2
axis([0 XMAX 0 YMAX])

title('Conteúdo de Freqüência')
ylabel('eixo z')
xlabel('Freqüência (Hz)')
% *****

```