



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CECAU**



GUILHERME FERREIRA HORTA

**ACELERÔMETROS E SUA APLICAÇÃO NO TRANSPORTE DE
COMPONENTES PARA UMA USINA EÓLICA**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2020

GUILHERME FERREIRA HORTA

**ACELERÔMETROS E SUA APLICAÇÃO NO TRANSPORTE DE
COMPONENTES PARA UMA USINA EÓLICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo José Da Rocha Reis, Dr.

Coorientador: Prof. Vinícius Marinho Silva, Me.

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2020**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H821a Horta, Guilherme Ferreira .
Acelerômetros e sua aplicação no transporte de componentes para
uma usina eólica. [manuscrito] / Guilherme Ferreira Horta. - 2020.
58 f.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo Reis.

Coorientador: Me. Vinícius Silva.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Circuitos integrados - Acelerômetros. 2. Dispositivos
eletromecânicos - Pás Eólicas. 3. Fourier, Transformadas de . I. Reis,
Agnaldo. II. Silva, Vinícius. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.
Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Guilherme Ferreira Horta

Acelerômetros e sua Aplicação no Transporte de Componentes para uma Usina Eólica

Membros da banca

Aginaldo José da Rocha Reis - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Vinicius Marinho Silva - Mestre - World Courier
Alan Kardek Rêgo Segundo - Doutor - Universidade Federal de Ouro Preto
Mark Damon Carvalho Mendes - Engenheiro - Solo Company

Versão final

Aprovada em 26 de Outubro de 2020

De acordo,

Aginaldo José da Rocha Reis.



Documento assinado eletronicamente por **Aginaldo Jose da Rocha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/10/2020, às 14:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0096029** e o código CRC **2A9FEC94**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.008114/2020-47

SEI nº 0096029

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Dedico este trabalho à Deus, por sempre guiar meu caminho e aos meus pais por sempre serem base na minha vida e tornarem meu sonho realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, por proporcionar um ensino público, gratuito e de qualidade. Aos Professores Agnaldo José Da Rocha Reis e Vinícius Marinho Silva, pela orientação, por todo tempo dedicado e pelo compromisso em extrair o melhor de seus alunos. Aos demais professores do curso de Engenharia de Controle e Automação pelos ensinamentos e conselhos passados. À Adriana, pela amizade e auxílio para minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus Pais, pelo amor, incentivo aos estudos e valores passados ao longo da vida. Por não medirem esforços para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos. Ao meu irmão, Henrique, pelo companherismo e amizade. Agradeço em especial a Gabriela, por todo apoio, amor e por compartilhar comigo os melhores momentos de minha vida. Pela paciência e por auxiliar a tornar realidade o sonho de me tornar engenheiro.

Agradeço a República Maracangalha, moradores que dividiram comigo os melhores anos da minha vida, ex-alunos e amigos que tornaram minha passagem por Ouro Preto marcante e se tornaram essenciais em minha vida, se tornando minha segunda família. Foi um dos meus grandes aprendizados durante morada em Ouro Preto.

Agradeço minha família, avós, tios, primos e à turma da Tuca, por torcerem por mim e se fazerem sempre presentes. Por fim, agradeço aos meus amigos de Ouro Preto, Ubá e BH que me fortaleceram e apoiaram durante todos os anos de graduação, obrigado.

“A evolução do Homem passa, necessariamente, pela busca do conhecimento.” (Sun Tzu)

RESUMO

O transporte de cargas especiais no Brasil requer um planejamento prévio e bastante estudo sobre a logística que será adotada por depender de rodovias movimentadas e muitas vezes em condições precárias. Durante o transporte de cargas especiais para uma usina eólica, devido às más condições do trajeto percorrido pelos caminhões e aos erros de planejamento de rota, impactos podem gerar danos nas peças que compõem a estrutura dos aerogeradores, principalmente nas pás eólicas. A fim de se mensurar os problemas que estes impactos podem causar a essas peças, o presente trabalho demonstrou, com o uso de acelerômetros, as oscilações de aceleração que estes componentes sofrem durante o seu deslocamento e avaliou, com o uso da transformada de Fourier, as condições de uso da peça. Esta aplicação pode acelerar a análise de danos sofridos pela peça e pode culminar com o desenvolvimento de um modelo a ser seguido no transporte de cargas especiais destinados à energia eólica.

Palavras-chaves: Acelerômetros. Transformada de Fourier. Pás eólicas. Transporte de Cargas Especiais.

ABSTRACT

The transportation of special cargo in Brazil requires prior planning and a lot of study on the logistics that will be adopted because it depends on busy highways and often in precarious conditions. During the transport of special loads to the wind farm, due to the poor conditions of the route traveled by the trucks and errors in route planning, impacts can generate damage to the parts that make up the structure of the wind turbines, especially in the wind blades. In order to measure the problems that these impacts can cause to these parts, the present work demonstrated, with the use of accelerometers, the acceleration oscillations that these components undergo during their displacement and evaluated, with the use of the Fourier transform, conditions of use of the part. This application can speed up the analysis of damages suffered by the part and can culminate in the development of a model to be followed in the transport of special loads destined for wind energy.

Key-words: Accelerometers. Fourier transforms. Wind blades. Special Cargo Transport.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Moinho de Vento Tradicional Holandês. Fonte: (CRESESB, 2017)	18
Figura 2 – Potencial Eólico do Brasil. Fonte: (BADGER J. DAVIS, 2020)	22
Figura 3 – Mapa Rodoviário do Brasil. (Fonte: Ministério dos Transportes, 2019)	24
Figura 4 – Transporte de Pá Eólica em 2014 na Alemanha. Fonte: (TECMUNDO, 2014)	25
Figura 5 – Acerômetro AX-3D da BeanAir. Fonte: Arquivo pessoal	27
Figura 6 – Configuração Interna de um Acelerômetro (PEREIRA, 2018)	29
Figura 7 – Filtragem do Sinal do Acelerômetro (BEANAIR, 2019)	31
Figura 8 – Configuração Interna do Acelerômetro da BeanAir (BEANAIR, 2019)	31
Figura 9 – Gráfico Vibrações x Tempo (BRÜEL.KJÆR, 1982)	35
Figura 10 – Conversão dos Sinais de Aceleração, Fonte: (LIU J. WANG, 2017)	37
Figura 11 – Gráfico Aceleração x Frequência.	38
Figura 12 – Diagrama dos Sinais de Aceleração. Fonte:(LIU J. WANG, 2017)	40
Figura 13 – Comparação entre Pulsos de Choque . Fonte:(SENSEBIG, 2017)	42
Figura 14 – Conjunto transportador semelhante ao utilizado no teste rodoviário. Fonte: Arquivo Pessoal.	44
Figura 15 – Acelerômetro B / Raiz da Pá: Arquivo Pessoal.	45
Figura 16 – Acelerômetro D /Spar Cap. Fonte: Arquivo Pessoal.	45
Figura 17 – Acelerômetro A, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.	47
Figura 18 – Acelerômetro B, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.	48
Figura 19 – Acelerômetro C, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.	48
Figura 20 – Acelerômetro D, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.	48
Figura 21 – Eixo vertical A, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.	49
Figura 22 – Eixo vertical B, Aceleração x Tempo Fonte: Arquivo Pessoal.	49
Figura 23 – Eixo vertical C, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.	49
Figura 24 – Eixo vertical D, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.	50
Figura 25 – Eixo vertical A, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.	50
Figura 26 – Eixo vertical B, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.	51
Figura 27 – Eixo vertical C, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.	52
Figura 28 – Eixo vertical D, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peso x Aceleração x Variação de Velocidade. Fonte:(SENSEBIG, 2017) . . .	43
Tabela 2 – Distribuição dos Acelerômetros.	44
Tabela 3 – Configuração dos Acelerômetros.	45
Tabela 4 – Localização dos Acelerômetros por Eixo.	46
Tabela 5 – Valores e Especificações do Teste.	47
Tabela 6 – Valores Obtidos no Acelerômetro A	51
Tabela 7 – Valores Obtidos no Acelerômetro B	51
Tabela 8 – Valores Obtidos no Acelerômetro C	52
Tabela 9 – Valores Obtidos no Acelerômetro D	53
Tabela 10 – Comparativo entre os valores obtidos entre os 4 acelerômetros.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFT	Discret Fourier Transform - Transformada Discreta de Fourier
FFT	Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier
FFTW	Fastest Fourier Transform in the West
PPV	Peak Particle Velocity - Variabilidade da pressão de pulso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Revisão Bibliográfica	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	15
1.3	Justificativa do trabalho	15
1.4	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Energia Eólica	17
2.2	Transporte	23
2.3	Acelerômetros	27
2.4	Caracterização da Área de Estudo - Vibrações Mecânicas	32
2.5	Metodologia - Transformada de Fourier	35
3	DESENVOLVIMENTO	40
3.1	Dados	40
3.2	Método ou procedimento de análise	44
4	RESULTADOS	47
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão Bibliográfica

Energia eólica é a transformação da energia do vento em energia útil e possui funcionalidade em aerogeradores para produzir eletricidade, moinhos de vento para produzir energia mecânica ou velas para impulsionar veleiros. A energia eólica provém, indiretamente, da radiação solar e, em comparação com os combustíveis fósseis, é renovável, está permanentemente disponível, possui grande abundância em várias partes do mundo e emite poucos poluentes durante a produção, sendo a maior parte visual.

No Brasil, a exploração da energia eólica para produção de energia elétrica teve início na década de 1990 e tem crescido bastante, possuindo foco no nordeste (48,9%) e no Sul do país. O emprego da energia eólica como fonte de energia elétrica nos estados brasileiros ainda é pequena quando pensada em produção em larga escala e comparada com o potencial eólico disponível (MORELLI, 2012).

Para realizar a criação de parques eólicos, é necessário um estudo prévio para identificar o potencial eólico do local e, no Brasil, é necessário grande cuidado com a parte logística e de transporte, pois é essencial o uso de rodovias, predominantes em toda extensão do território brasileiro e, que muitas vezes estão em condições precárias. Também é fundamental analisar o horário de menor pico de caminhões e outros veículos de menor porte, pois as cargas destinadas à construção de aerogeradores necessitam de transporte especial devido as suas características dimensionais e peso, como exemplo para as pás eólicas, já existem modelos sendo transportados no Brasil com comprimento em torno de 75m e pesando mais de 20 toneladas.

Para realização de testes rodoviários como o que será abordado neste trabalho, após a definição da melhor rota e horário para a execução do ensaio, são acoplados ao conjunto transportador acelerômetros, que quando instalados nos pontos mais frágeis do sistema, são calibrados e parametrizados para armazenamento de leituras de acelerações no decorrer do tempo. São os acelerômetros que irão mensurar os níveis de impacto e acelerações suportadas pela carga podendo ser realizada uma análise para definir se tais níveis de impacto podem provocar danos na estrutura e se estes danos requerem manutenção.

No Brasil, nos últimos anos, empresas estão se especializando e desenvolvendo a prestação de serviços relacionados a esta área, efetuando análises de tendência e relatando as condições dos equipamentos durante o deslocamento de onde foram fabricados até onde serão instalados. Para a captação de vibrações, são utilizados sensores a que se dá o nome de transdutores de vibração mecânica.

A análise de vibrações mecânicas a partir de acelerômetros é um método muito eficiente

na detecção prematura de danos, através da observação da evolução do nível global de vibrações e de uma análise das respectivas frequências, na análise espectral. As vibrações fazem com que os equipamentos comecem a modificar a distribuição de energia vibratória e essa modificação faz com que a peça se danifique (SEQUEIRA.C.D., 2013).

Após obter a aceleração medida pelo acelerômetro nos 3 eixos (x, y e z), eles são implementados pela transformada de Fourier para obtenção dos espectros de frequência, convertendo os valores de aceleração no domínio do tempo para o da frequência, sendo estes espectros que serão analisados e servirão como parâmetros para dizer a condição do objeto medido.

O dados armazenados no acelerômetro são lidos pelo SCILAB e, a partir de um código, a função FFT (Fast Fourier Transform) e a função PPV (PEAK Particle Velocity) são iniciadas. É a partir dessas duas funções que é obtido um gráfico conclusivo para o experimento.

O gráfico gerado com o eixo x sendo a frequência e o eixo y a aceleração naquele momento permite fazer uma análise do estado da peça. Esse resultado é comparado ao resultado padrão adotado para o experimento, e se espera obter que tanto a aceleração medida no tempo e a variação de velocidade no momento da análise não superem o limite superior crítico estabelecido por experimentos anteriores.

1.2 Objetivos

Este trabalho busca informar aos responsáveis pela fabricação, condução e instalação da peça no sítio eólico se houve danos durante o deslocamento, sem a necessidade de passar por inspeções mais rigorosas. Este trabalho também tem como objetivo desenvolver instrumentação específica baseada em acelerômetros para o transporte de componentes de uma usina eólica.

1.2.1 Objetivos Específicos

Analisar as dificuldades de se realizar o transporte de cargas especiais no Brasil.

Buscar aumentar a eficiência em realizar a detecção nos danos que o transporte feito por rodovias pode causar às peças que compõem o aerogerador, principalmente às pás eólicas.

1.3 Justificativa do trabalho

Devido aos altos custos para produção e instalação de componentes para gerar energia eólica, surgiram métodos que conseguem encurtar o tempo entre a fabricação e o pleno funcionamento dos aerogeradores. Já testado e aprovado seu uso em transformadores, os acelerômetros são mais uma solução que pode ajudar a encontrar falhas na etapa de transporte e consequentemente promover a redução do prazo de montagem dos componentes eólicos.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos. No Capítulo 1, encontra-se a apresentação do problema e suas possíveis soluções, além de apresentar os objetivos propostos. O Capítulo 2 consiste na explicação sobre as áreas que abrangem o projeto e que podem influenciar na solução dos objetivos propostos. No Capítulo 3 é apresentado o desenvolvimento e a parte teórica que será utilizada como base para o experimento. Explica-se como serão realizados os procedimentos e como será a análise. No Capítulo 4 são apresentados os resultados do estudo de caso. No Capítulo 5 as considerações finais do trabalho e sugestões para futuros trabalhos são apresentadas em complemento ao resultado do estudo de caso.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Energia Eólica

Denomina-se energia eólica a energia cinética resultante do movimento de massas de ar (vento). A partir da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, há a geração de eletricidade. Também se usa a energia eólica a partir de cata-ventos e moinhos, para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL, 2002).

A energia eólica tem como origem a radiação solar, uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos, entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo. A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região (CRESESB, 2017).

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, principalmente uso na agricultura e na geração de energia mecânica. Para a geração de eletricidade, houve interesse a partir do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo na década de 1970, é que se obtiveram investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial (ANEEL, 2002).

Os sistemas eólicos surgiram a partir do avanço da agricultura, em que o homem necessitava cada vez mais ferramentas que auxiliassem nas etapas do trabalho. Tarefas como a moagem dos grãos e o bombeamento de água exigiam cada vez mais esforço braçal do homem e de animais. Antes realizada em gaiolas cilíndricas que necessitavam de força braçal contínua para gerar força motriz, esse sistema foi aperfeiçoado para utilizar os cursos d'água e, assim, surgiram às rodas d'água. Porém, como não havia de rios em todos os lugares para o aproveitamento em rodas d'água, a utilização do vento como fonte natural de energia possibilitou o surgimento de moinhos de ventos, que substituiu a força motriz humana ou animal nas atividades agrícolas.

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e uso agrícola por meio de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 a.C (SHEPHERD, 1994).

O uso dos moinhos cresceu e veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, os chineses e o Império Babilônico também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987).

Mesmo com pouca produtividade devido a suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para o desenvolvimento das necessidades básicas de bombeamento d'água ou moagem de grãos. Pouco se sabe sobre o desenvolvimento e uso dos cata-ventos primitivos da China e Oriente Médio como também dos cata-ventos surgidos no Mediterrâneo, porém foram base para o desenvolvimento dos primeiros modelos a utilizarem velas de sustentação em eixo horizontal encontrados nas ilhas gregas do Mediterrâneo (CRESESB, 2017).

Há 900 anos, após as cruzadas, a Europa conheceu e implantou os cata-ventos, que foram muito utilizados e onde se obteve os primeiros registros de suas funcionalidades. Já no século XII começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda.



Figura 1 – Moinho de Vento Tradicional Holandês. Fonte: (CRESESB, 2017)

O uso de moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês” (Figura 1) foi rapidamente crescendo em vários países da Europa. Estes moinhos tiveram uma forte e decisiva influência na economia agrícola por vários séculos, além do desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle e de eixos. O uso dos moinhos de vento propiciou a otimização de várias atividades utilizando-se a força motriz do vento (CRESESB, 2017).

As aplicabilidades dos moinhos de vento foram bastante difundidas na Holanda. O primeiro moinho de vento foi utilizado para produção de óleos vegetais e foi construído em 1582.

Com o surgimento da imprensa e o crescimento da demanda por papel, em 1586 foi construído um moinho de vento para fabricação de papel. Ao fim do século XVI surgiram moinhos de vento para acionar serrarias para o processamento de madeiras provenientes do Mar Báltico. Já no século XIX, aproximadamente 9000 moinhos existiam em pleno funcionamento na Holanda (CRESESB, 2017)

Neste período, o número de moinhos de vento na Europa mostra a importância do seu uso nos países baixos, Inglaterra e França, que somavam mais de 20.000 moinhos. Estes cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água foram utilizados, principalmente, em suas áreas rurais. Na segunda metade do século XIX mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para bombeamento em sedes de fazendas isoladas para realizar o abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP, 1987).

Os cata-ventos de múltiplas pás foram utilizados também em outras regiões como a Austrália, Rússia, África e América Latina. O sistema se adaptou muito bem às condições rurais já que possui características de fácil manuseio, operação e manutenção. Toda a estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito por meio de bombas e pistões, favorecidos pelo alto torque fornecido pela grande número de pás. Até hoje esse sistema é amplamente usado em várias partes do mundo para bombeamento d'água (CRESESB, 2017) .

Com o início do século XX houve um grande avanço na rede elétrica e, com isso, várias pesquisas para relacionar a energia eólica para geração de grandes blocos de energia. Os Estados Unidos estavam ampliando e aprimorando o uso em fazendas e propriedades rurais isoladas, difundindo o uso de aerogeradores de pequeno porte. Já a Rússia buscava conectar os aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede elétrica.

A adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica, que teve início no final do século XIX, foi fundamental para a evolução de várias cidades norte-americanas. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica. Tratava-se de um cata-vento que fornecia 12kW em corrente contínua para carregamento de baterias, as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SCIENTIFIC.AMERICA, 1890) .

O invento de Brush apresentou importantes avanços para a utilização da energia eólica gerando energia elétrica. A altura de seu invento estava dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para beneficiamento de grãos e bombeamento d'água. Houve a melhoria do mecanismo de rotação das pás, na escala de 50:1 e que operava em dois estágios, possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500rpm. Esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica (SCIENTIFIC.AMERICA, 1890).

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte, já que os países em geral buscavam diversas maneiras de economizar combustíveis fósseis. Após o fim da Segunda Guerra, os combustíveis fósseis reobtiveram o foco em todo o cenário mundial e, com isso, os aerogeradores feitos antes desse período não eram mais competitivos, sendo assim, o projeto foi abandonado. Este modelo foi o pioneiro e que gerou uma parceria entre a indústria e a universidade, criando pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias que aperfeiçoaram a geração de energia através dos ventos. Essa parceria possibilitou que o projeto possuísse o maior número de inovações tecnológicas até então posto em funcionamento. De uma forma geral, após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo e grandes usinas hidrelétricas se tornaram extremamente competitivos economicamente, e os aerogeradores foram construídos apenas para fins de pesquisa, utilizando e aprimorando técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento de pás, além de aperfeiçoamentos no sistema de geração.

Na década de 1970 houve a crise internacional do petróleo e, com isso, interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial, feitos em parceria entre universidades e indústria, principalmente em países com recursos naturais escassos. A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca, país que hoje possui 12% de sua energia total obtida através da energia eólica, e, atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. No norte da Alemanha a contribuição eólica supera 16% e a União Europeia tem como meta atingir 10% de toda sua eletricidade obtida através dos ventos até 2030 (ANEEL, 2002). Em 1991, a Associação Europeia de Energia Eólica estabeleceu como objetivo a instalação de 4.000 MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 11.500 MW até o ano 2005. Essas e outras metas foram cumpridas muito antes do que se esperava (4.000 MW em 1996, 11.500 MW em 2001).

O custo dos equipamentos, que era uma das principais dificuldades ao aproveitamento comercial da energia eólica, caiu muito entre os anos 1980 e 1990. Segundo estimativas, o custo de uma turbina eólica moderna está em torno de US\$ 1.000,00 por kW instalado e os custos de operação e manutenção variam de US\$ 0,006 a US\$ 0,01 por kWh de energia gerada, nos dez primeiros anos, e de US\$ 0,015 a US\$ 0,02 por kWh, após dez anos de operação (MADSEN, 2000). Recentes desenvolvimentos tecnológicos em sistemas avançados de transmissão melhora na aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos.

As pesquisas desenvolvidas entre os anos de 1980 e 1990 geraram diferentes formas para aproveitar e melhorar o acúmulo de energia vinda dos ventos. No início da utilização da energia eólica surgiram turbinas de vários tipos, possuindo eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono. Ao aprimorar os estudos e com maior investimento, o projeto de turbinas eólicas com eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução, estrutura não flexível foi o melhor aceito (CBEE, 2002).

Atualmente um sistema eólico pode ser utilizado como sistema isolado, híbrido ou como um sistema interligado à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento. Os sistemas isolados utilizam alguma forma de armazenamento de energia, feito através de baterias, por exemplo, que tem como foco o uso em aparelhos elétricos, ou há o acúmulo como energia gravitacional, tendo como finalidade armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida. Quando há o uso de equipamentos de corrente alternada, é necessária a utilização de um inversor de frequência. Este dispositivo geralmente incorpora um seguidor do ponto de máxima potência necessário para controle da potência produzida e é usado quando se deseja utilizar eletrodomésticos convencionais. Os sistemas híbridos têm como características, quando desconectados da rede convencional, possuem fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema faz com que cada fonte de energia necessite estudos para que tenha o aproveitamento máximo e gere menor custo possível. Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso. Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede somam aproximadamente 120 GW ([WWEA, 2009](#)).

A avaliação do potencial eólico de uma região requer trabalhos sistemáticos de coleta e análise de dados sobre velocidade e regime de ventos. Geralmente, uma avaliação precisa requer levantamentos específicos, mas dados coletados em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica. Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja superior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 metros, o que necessita de uma velocidade mínima do vento entre 7 e 8 metros por segundo ([ANEEL, 2002](#)). Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 metros por segundo, a uma altura de 50 metros. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental.

No Brasil os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha (PE), no início dos anos 1990 ([ANEEL, 2002](#)). Os resultados dessas medições possibilitaram a determinação do potencial eólico local e a instalação das primeiras turbinas eólicas do Brasil. Segundo esses resultados,

os melhores potenciais estão no litoral das regiões Norte e Nordeste, onde a velocidade média do vento, a 50 m do solo, é superior a 8 m/s. Entre outras regiões com grande potencial eólico, destacam-se o Vale São Francisco, o Sudoeste do Paraná e o Litoral Sul do Rio Grande do Sul, conforme podemos ver no mapa abaixo. O Nordeste possui 48,9 do potencial eólico do país e o foco tem sido os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte. Entretanto, outros pontos de grande potencial eólico foram identificados, como por exemplo, em Minas Gerais, afastado mais de 1000 km da costa e que possui desde 1994 uma estação eólica (CBEE, 2002).

O emprego da energia eólica como fonte de energia elétrica nos estados brasileiros ainda é pequena quando pensada em produção em larga escala e comparada com o potencial eólico disponível. Os altos valores iniciais, em conjunto com a fase inicial do seu desenvolvimento tecnológico em relação às formas comercialmente tradicionais de geração de energia, nos mostra que a energia eólica ainda é de baixa competitividade no mercado nacional (MORELLI, 2012).

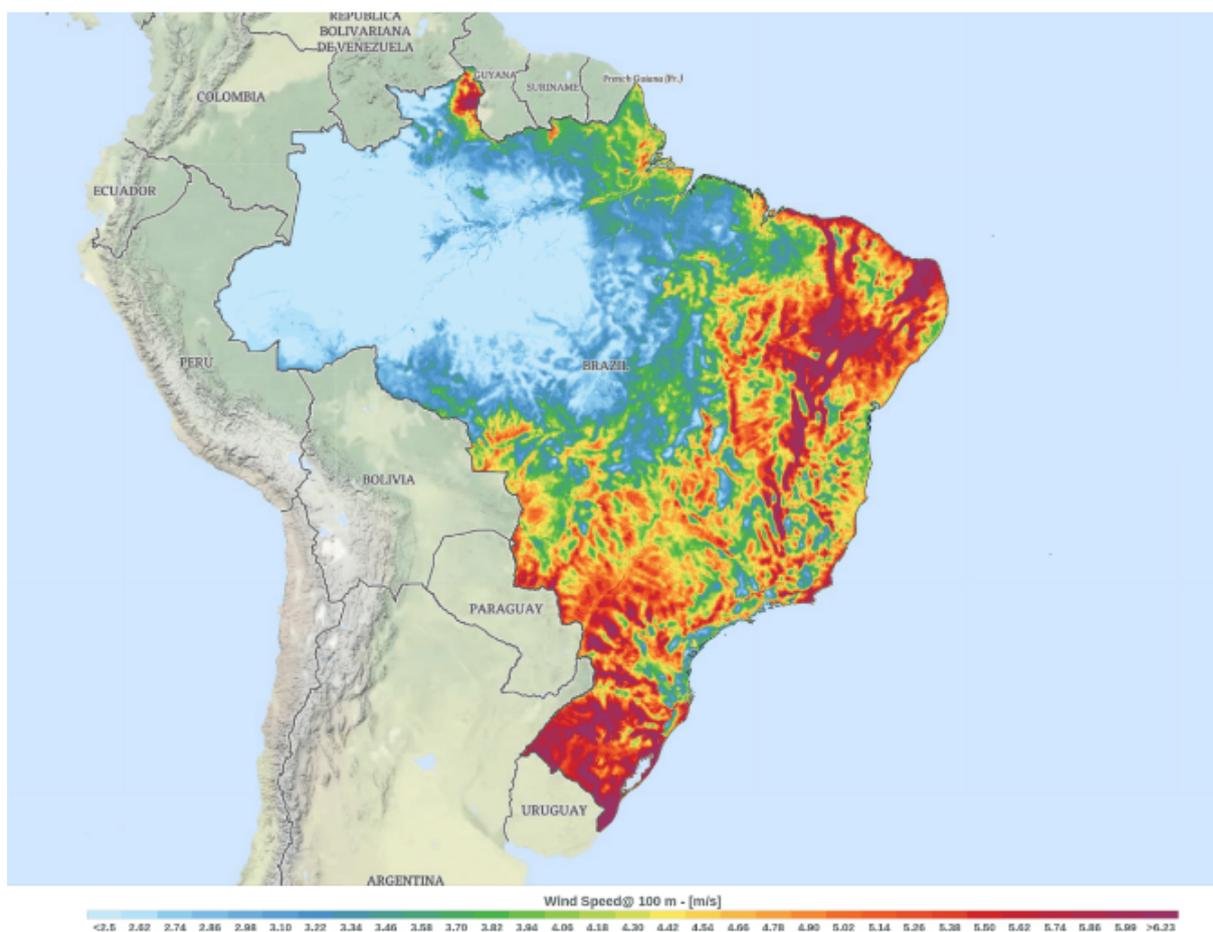


Figura 2 – Potencial Eólico do Brasil. Fonte: (BADGER J. DAVIS, 2020)

2.2 Transporte

O mercado de geração de energias sustentáveis e limpas, ao longo dos últimos anos, vem crescendo. A expansão dos parques geradores de energia eólica começa a ganhar terreno e, com isto, a produção de equipamentos, em consequência, cresce e exige da infraestrutura de transportes soluções que permitam escoamentos de seus produtos de forma eficiente e com os custos mais baixos possíveis. Tais equipamentos, por suas características de tamanho e peso, requerem do sistema de transporte muito planejamento, pois necessitam de dispositivos e condições especiais para seu efetivo deslocamento. Assim sendo, para permitir que o mercado de geração de energia sustentável e renovável com as pás eólicas cresça em um ritmo acelerado, é de vital importância que o sistema de transporte evolua e se desenvolva em conjunto com as necessidades. Desta forma, toda pesquisa desenvolvida que visa trazer este benefício é de grande valia, pois permitirá desenvolver novos procedimentos, processos e até mesmo novos equipamentos e soluções (GOTSFRIDT G.P. CUNHA, 2018).

O transporte de cargas nacional é exclusivamente dependente do modal rodoviário, isto tende a reduzir a competitividade brasileira frente a outros países, pois os custos dos produtos nacionais são mais elevados, além da constante manutenção de veículos e os investimentos constantes em conservação de rodovias que, aparentemente, nunca satisfazem a manutenção de qualidade plena no sistema (SHOJI, 2013).

De acordo com pesquisa feita pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2012, Serviço Social do Transporte (SEST) e Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte (SENAT), 45,90% das rodovias possuem pavimento regular, ruim ou péssimo. Com isso, há um aumento do consumo de combustível dos veículos que por elas trafegam, resultando em reflexos diretos nos custos das viagens, da manutenção veicular e nas emissões de poluentes.

Nas próximas décadas, grande parte do transporte de cargas continuará sendo feita pelo modal rodoviário, com o uso intensivo de combustíveis fósseis. Prevê-se que, em 2020, a frota de caminhões será responsável por 70,2% do consumo de óleo diesel do modo rodoviário. Isso fará com que este modal seja o responsável por 88% das emissões, seguido pelo ferroviário com 8% e pelo aquaviário 4% (FIGUEIREDO K. F.; FLEURY, 2003).

Outro problema que se refere ao modal rodoviário é a idade da frota de veículos de carga. Esta frota, que é composta de cerca de 1,8 milhão de unidades com uma idade média de 18 anos e 67% possuem mais de dez anos de idade. Também, 87% das transportadoras não possuem um programa de renovação de frota, o que agrava a segurança durante deslocamentos em estradas, aumenta a emissão de poluentes e eleva a probabilidade do material ser danificado, entre outros problemas (FIGUEIREDO K. F.; FLEURY, 2003).

A partir destas informações, observa-se que há um aumento da demanda por rodovias no país, pois a frota tem crescido desenfreadamente nos últimos anos e há uma disparidade no ritmo de crescimento anual da frota de veículos e na extensão das rodovias pavimentadas. Além

disso, é evidente que o estado de conservação das rodovias impacta diretamente no desempenho econômico de uma região e, desta forma, do país.

Ainda levando em conta a quantidade de rodovias encontradas no país, é constatado que grande parte está localizada nas regiões sul e sudeste, conforme a Figura 3. Por haver esta grande concentração no centro sul do país, o desenvolvimento das outras regiões do Brasil fica comprometido, considerando que as condições da malha rodoviária tendem a piorar quanto mais longe se estiver das grandes indústrias.

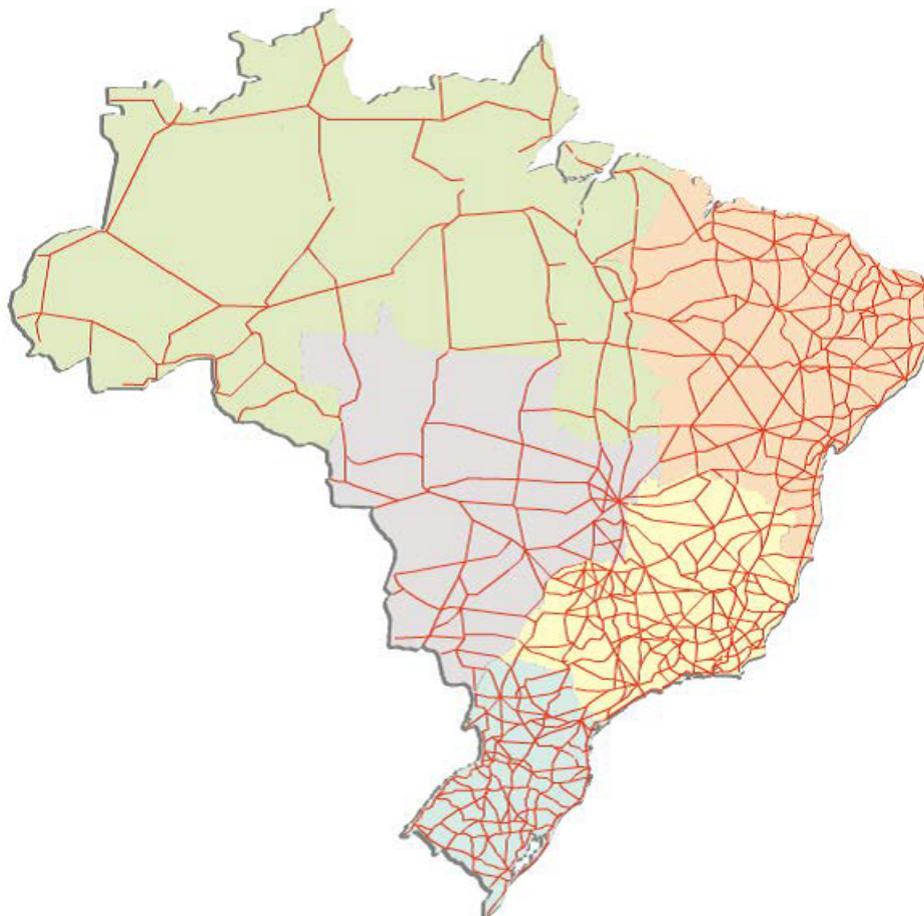


Figura 3 – Mapa Rodoviário do Brasil. (Fonte: Ministério dos Transportes, 2019)

Para o deslocamento de cargas especiais, devido à complexidade dos equipamentos transportados, obviamente, o custo é bastante elevado se comparado ao transporte normal de cargas, para todos os modais analisados. No caso do transporte rodoviário, são necessários caminhões especiais, que tenham pranchas extensivas de pelo menos três eixos direcionáveis para as pás. Como exemplo para as pás transportadas hoje no Brasil são requeridas carretas extensivas com pelo menos 3 eixos direcionáveis e com abertura total da ordem de 50 metros e que, de preferência, possuam suspensão pneumática para absorver o efeito das estradas brasileiras em más condições. Os veículos, após a amarração das pás, ficam com pelo menos 55 metros de comprimento total, fazendo com que o deslocamento fique ainda mais complexo (SHOJI, 2013).

Cargas indivisíveis excedentes ou cargas especiais são cargas na qual não se pode dividir em partes menores o equipamento, pois acaba com o valor da carga ou, que em caso de segregação, a peça não pode mais ser utilizada, tendo que ser descartada, se tornando incapaz para o uso pretendido. As cargas indivisíveis excedentes são aquelas que ultrapassam as dimensões regulamentadas e precisam de veículos especiais. Esse tipo de carga requer um planejamento específico cuja infraestrutura esteja de acordo com a legislação dos órgãos com jurisdição sobre a via e a concessionária que administra para verificar as limitações e infraestrutura da via. As condições de trânsito, horário, velocidade, sinalização de trânsito, acompanhamento de batedores além de outras medidas específicas de segurança (GOTSFRIDT G.P. CUNHA, 2018).

No meio rodoviário, por causa da escassez de caminhões com estas características e da falta de motoristas com o treinamento específico para fazer este tipo de transporte, as poucas transportadoras que possuem estes requisitos se destoam no mercado. A maior parte dos equipamentos de transporte é importada e as transportadoras só os adquirem se houver demanda para este tipo de equipamento, o que diminui ainda mais o número de veículos apropriados à disposição, elevando os custos praticados. Há também outros tipos de transporte que podem otimizar a criação de um sítio eólico, enquanto um navio pode transportar mais de 50 pás eólicas, um caminhão, uma por vez. O grande problema do Brasil é a dependência de rodovias, o que faz com que seja necessário o transporte de uma peça por vez, gerando maior custo e risco de danos aos equipamentos.



Figura 4 – Transporte de Pá Eólica em 2014 na Alemanha. Fonte: (TECMUNDO, 2014)

Um grande fator a ser levado em consideração é a possibilidade de causar danos ao material transportado. Esta informação chega a ser um pouco subjetiva, por não haver dados suficientes que comprovem a probabilidade de danos de acordo com o caminhão e rota escolhidos, porém fica evidente que o risco de danos aumenta quando as condições do modal e dos meios

de transporte são precárias. Mesmo com a dificuldade de medição da relação entre riscos e condições dos modais, é de fundamental importância a utilização deste parâmetro, pois é essencial que os componentes não tenham suas funções prejudicadas por algum acidente de percurso. A tecnologia utilizada para a fabricação de aerogeradores é bastante complexa e, por isso, o transporte deve ser estudado previamente para ser feito de forma bastante cuidadosa, pois o reparo destes componentes não é simples e barata, pois atrasa a montagem e mobiliza maior número de mão de obra específica (SHOJI, 2013).

Sobre as dificuldades enfrentadas pelos motoristas em toda a extensão do país, dentre todas as informações citadas anteriormente, deve-se destacar que apenas 12,3% das rodovias nacionais são pavimentadas, dado que, em comparação com a quantidade de vias pavimentadas com outros países, a do Brasil é muito inferior (CNT, 2016). Enquanto o Brasil apresenta 25 km de vias pavimentadas para cada 1000 km² de área, os Estados Unidos apresentam 438,1 km de pavimentação para a mesma área, e a China cerca de 360 km de pavimentação para cada 1000 km² de área. Esta afirmação torna-se mais impactante quando se considera que desta pequena parcela de vias pavimentadas, a grande maioria apresenta algum tipo de deficiência, seja em relação à própria pavimentação, a sinalização ou a condições de geometria da via (RIBEIRO M, 2018).

Além desta situação destaca-se o transporte de cargas que cresceu aproximadamente 100% no período. Como mais de 60% das cargas transportadas no Brasil passam pelas rodovias do país e, considerando o peso destes veículos superior várias vezes a outros os automóveis, é possível mensurar a capacidade de deterioração que estes veículos submetem a via. O aumento total de todos os veículos ultrapassa os 220% o que contribui em muito na deterioração das vias, que, como mostrado em outros momentos, recebe uma parcela muito pequena do PIB nacional para serem restauradas. Todas estas condições favorecem um cenário de enfraquecimento da qualidade de malha rodoviária e este cenário por sua vez contribui em muito com o aumento do número de acidentes ou mesmo com o agravamento de acidentes advindos de outras causas, como já citado, buracos na pista podem gerar mortes, ondulações podem causar ou agravar acidentes (BACCHIERI G., 2011).

Como há turbinas eólicas de pequenos, médios ou grandes portes, as pás ou hélices podem variar de tamanho dependendo de sua necessidade. Sabendo que pode haver restrições por suas dimensões e pesos, é preciso haver um estudo de viabilidade do caminho a ser tratado. A transportadora necessita, para transportar a carga, fazer um estudo de viabilidade e traçar a melhor rota até o destino, definindo, assim, o horário para ser realizado o transporte, as paradas, a melhor via disponível para o transporte e o número de funcionários necessários para acompanhar o transporte.

Com o crescimento do mercado eólico no Brasil e no mundo, empresas começaram a se estabelecer no país, e começaram a encontrar problemas. Algumas das principais dificuldades encontradas neste início são: problemas para conseguir licenças ambientais necessárias princi-

palmente devido à retirada de dunas, problemas aduaneiros durante o desembarque nos portos, gerado ora pela ineficiência da gestão portuária, ora por greves; falta de infraestrutura dos modais de transporte e de locais de armazenamento para cargas de grande porte, o que causa atrasos, custos maiores e, até mesmo, avarias nas partes do aerogerador. Os operadores logísticos que vem a planejar este tipo de projeto precisam pensar em todas estas variáveis apresentadas para que o custo operacional seja o menor possível. Para efetuar-se o transporte de uma pá eólica e outras partes do aerogerador com segurança e eficiência, é necessário que um conjunto de fatores distintos funcione perfeitamente, desde um operário no pátio fazendo as amarras na carga até o fiscal na rodovia verificando a documentação da carga (SHOJI, 2013).

Com base nas referências utilizadas nota-se que o transporte de cargas indivisíveis ainda passa por grandes desafios no Brasil, pois não se tem muitos estudos e investimentos nesta área. Para que melhore o transporte de carga indivisível seria necessária a realização de melhorias nas rodovias para que seja possível trafegar uma carga que ultrapasse os limites impostos, sem que haja a necessidade de fechar uma via ou até parar o tráfego, mas principalmente realizar investimentos para qualificar um maior número de pessoas aptas a cuidar da logística da operação. O desenvolvimento e a ampliação das vias, seja realizando obras de reparo ou remoção de fios de energia, taludes e placas, contornaria esse déficit no país, gerando empregos e aumentando a segurança das vias, principalmente durante a movimentação de cargas especiais na qual se necessita maior atenção devido aos riscos de seu excesso de volume.

2.3 Acelerômetros

Os acelerômetros podem ser definidos como dispositivos que medem as vibrações ou as acelerações estática/dinâmica do movimento de uma estrutura. Podem ser usados para medir inclinação, forças inercias (velocidade, deslocamento ou força) e choque ou vibração. São utilizados em diversas áreas como a elétrica, tecnológica, civil, mecânica, industrial, sendo instrumentos essenciais para o bom funcionamento dos sistemas que compõe essas áreas (PEREIRA, 2018).



Figura 5 – Acelerômetro AX-3D da BeanAir. Fonte: Arquivo pessoal

A miniaturização de eletrônicos permitiu o desenvolvimento de equipamentos de medição compactos e que possuem baixo consumo de energia, conforme Figura 5. Aliado a isso, a produção em larga escala desses dispositivos permitiu a criação de redes de sensores sem fio de baixo custo que propiciam melhores condições no monitoramento do transporte ([BALLESTRIN.R BENDER.R, 2017](#)).

Para realizar o planejamento prévio ao transporte das pás eólicas mantendo um custo operacional dentro de valores aceitáveis, os operadores logísticos buscam realizar o estudo das rotas visando às estradas que necessitam de menores reparos e pequenas obras e, principalmente, que possam causar menos danos no equipamento transportado.

Para realizar o transporte de transformadores, devido a sua alta complexidade, acelerômetros são acoplados a eles para captar as oscilações de vibrações durante o carregamento, descarregamento, quando se ergue o material dentro de um navio e em cima de caminhões, possibilitando à transportadora observar se houve algum dano durante o deslocamento da peça.

Os primeiros acelerômetros eram sistemas mecânicos construídos com molas ou giroscópios e ganharam relevância em 1915 a partir da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Ainda mantendo esse princípio, o conceito foi evoluindo e ampliou-se o leque de exploração da área, além de seu desenvolvimento estar sempre em evolução. Hoje podem medir diversas frequências, possuir sensores de temperatura, design compactos entre outras vantagens.

A análise de vibrações mecânicas a partir de acelerômetros é um método indispensável na detecção prematura de avarias, através da observação da evolução do nível global de vibrações e de uma análise das respectivas frequências, na análise espectral. As vibrações fazem com que os equipamentos comecem a deteriorar. Essa deterioração caracteriza-se pela modificação da distribuição de energia vibratória. Algumas vibrações podem ser desejadas, outras podem perturbar o normal funcionamento ou até destruir equipamentos. A análise de vibrações é um dos indicadores mais precisos do estado de funcionamento da máquina, permitindo identificar a fonte perturbadora. Atualmente estas técnicas provaram ser bastante eficientes e precisas para detectar avarias, porém, devido aos custos para se treinar uma pessoa e especializá-la e para adquirir todo o material necessário, ainda não é unanimidade ([SEQUEIRA.C.D., 2013](#)).

No Brasil, nos últimos anos, algumas empresas estão se aprimorando quanto ao transporte de cargas especiais, especialmente transformadores e começaram a receber prestação de serviços nesta área, recebendo análises de tendência e relatos quanto às condições dos equipamentos durante o deslocamento de onde foram fabricados até onde serão instalados. Para a captação de vibrações, são utilizados sensores denominados transdutores de vibração mecânica. Existem vários tipos de sensores, sendo o acelerômetro o mais utilizado devido à sua enorme versatilidade, enquanto outros sensores se resumem a aplicações muito específicas.

O princípio de funcionamento de um transdutor de aceleração tradicional baseia-se em cristais piezoelétricos contidos dentro dele (conforme Figura 6), que, quando comprimidos,

geram um pequeno sinal elétrico proporcional à aceleração. Após gerar este sinal, a partir do amplificador, ele é lido como forma de onda e fornece a informação necessária sobre o equipamento. Antes de se efetuar qualquer análise, a vibração tem de ser convertida num sinal elétrico, sendo essa tarefa desempenhada pelos transdutores com auxílio dos amplificadores. Estes convertem um sinal vibratório mecânico existente na superfície da máquina em outra forma de energia, normalmente em sinais elétricos característicos da vibração do equipamento, cuja forma de onda está relacionada com o movimento mecânico. A relação entre a forma de onda mecânica e a forma da onda elétrica, varia a partir do tipo de transdutor utilizado na transformação de sinal e no tipo de tratamento dado a esse sinal pelo aparelho analisador. A complexidade da instrumentação de medida e as técnicas de análise podem variar, contudo, em todos os casos, o transdutor de vibrações é o ponto mais crítico na cadeia de medição, porque com um sinal baixo demais os resultados da análise não serão confiáveis (PEREIRA, 2018).

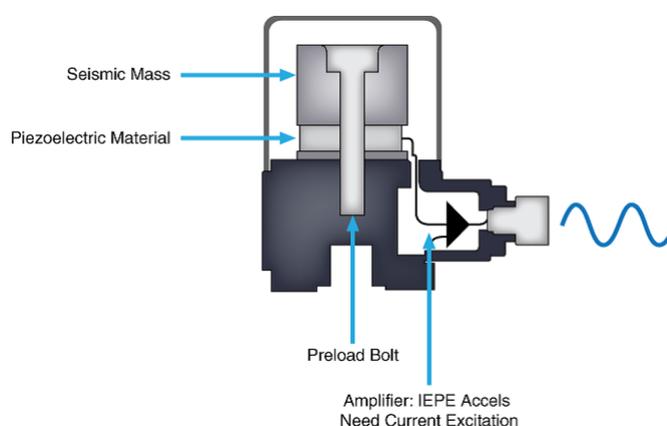


Figura 6 – Configuração Interna de um Acelerômetro (PEREIRA, 2018)

Quando ativado, o transdutor iguala a vibração transmitida pelo equipamento em estudo, a massa no interior do transdutor tende a manter-se estacionária no espaço. Um transdutor sensível à aceleração, também é conhecido por acelerômetro, e, este é fixado em uma superfície em movimento, onde haverá um deslocamento provocado pela força motriz F que dá origem ao movimento. Esta força provém do produto da aceleração com a massa sísmica. O tamanho do acelerômetro, mais precisamente sua massa sísmica, vai influenciar a gama de frequências utilizável e a sua sensibilidade. Em geral, quanto maior for o acelerômetro, maior a sua sensibilidade e menor a gama de frequência máxima utilizável. O intervalo de frequência em que os acelerômetros se encontram situa-se abaixo da sua primeira frequência natural. A sua sensibilidade é medida em milivolts por unidade de aceleração “g” e é aproximadamente constante até 20% da frequência de ressonância. Por esse motivo, o uso do acelerômetro até este limite superior de frequência resulta em padrões aceitáveis e aconselháveis (SEQUEIRA.C.D., 2013).

Após o armazenamento dos dados vindos do acelerômetro e sua filtragem, há a análise pela transformada de Fourier, que é baseada em valores teóricos e aproximados, dependendo principalmente dos materiais da estrutura e da distância entre a área de medição e a fonte de

ruído. Ao realizar uma análise de Fourier, uma frequência do espectro que lista as frequências e suas amplitudes correspondentes pode ser observada, gerando, assim, possíveis defeitos nos componentes dos aerogeradores.

Os acelerômetros geram dados em forma de pulsos que podem ser gravados em tempo real de forma ininterrupta e, também podem gravar dados em sua memória para depois serem analisados. A redução da quantidade de dados de aceleração salvos unidos a eventos de transporte podem ser feitos usando compressão de algoritmos, que otimiza a memória interna dos componentes e são eficientes em sua compactação sem eliminação de informações relevantes do processo. No entanto, dependendo da taxa de aquisição e o horário da coleta, é possível alcançar uma quantidade expressiva de dados que ainda devem ser pós processados para obter resultados finais.

Para reduzir o consumo, duas estratégias podem ser usadas. O primeiro é usar o sinal de interrupção de atividade do acelerômetro para acordar o processador. Assim, mesmo quando não coleta dados continuamente, o processador está em estado de hibernação para todo o período em que nenhum processamento está sendo realizado. Quando ativo, o programa recebe os parâmetros necessários para a operação correta dos periféricos e retoma a rotina de leitura. Depois que o sensor adquire suas variáveis e entra em um estado de transmissão, onde os dados são enviados ao controlador para download e análise. A segunda estratégia para reduzir o consumo de energia é executar o processamento de dados diretamente no aplicativo do sensor, que reduz a quantidade de dados enviados para o nó do controlador. Este processamento consiste em realizar a leitura dos dados e calcular apenas o valor dos dois picos mais altos, se obtendo assim a frequência em que o ocorreram os possíveis danos ao equipamento (BALLESTRIN,R BENDER,R, 2017).

O acelerômetro utilizado para o experimento foi o da empresa BeanAir (Figura 5), que é composto de alumínio e possui leitura de frequências entre 1 e 2000 Hz, alcance de modo em tempo real de 300 metros, capacidade de armazenamento de mais de 1000000 dados e converte os dados para um computador em 3 minutos quando está com memória completa (capacidade da bateria a 25 graus é 1250 mAh).

O BeanDevice AX-3D integra um acelerômetro micro-usinado de silício de três eixos com uma faixa de saída em escala real de -2g, +2g, -10g, +10g, -13g ou +13g. A detecção de aceleração é baseada no princípio de uma capacitância diferencial decorrente do movimento induzido pela aceleração do elemento sensor, que utiliza ainda o cancelamento de modo comum para diminuir os erros da variação do processo, temperatura e estresse ambiental (BEANAIR, 2019).

Os produtos BeanDevice AX-3D integram um filtro Butterworth de 5ª ordem de alto desempenho. O filtro Butterworth usado nas linhas de produtos BeanDevice Smartsensor tem a região de banda passante mais plana, o que significa que tem a menor atenuação na faixa de frequência desejada, conforme Figura 7 (BEANAIR, 2019).

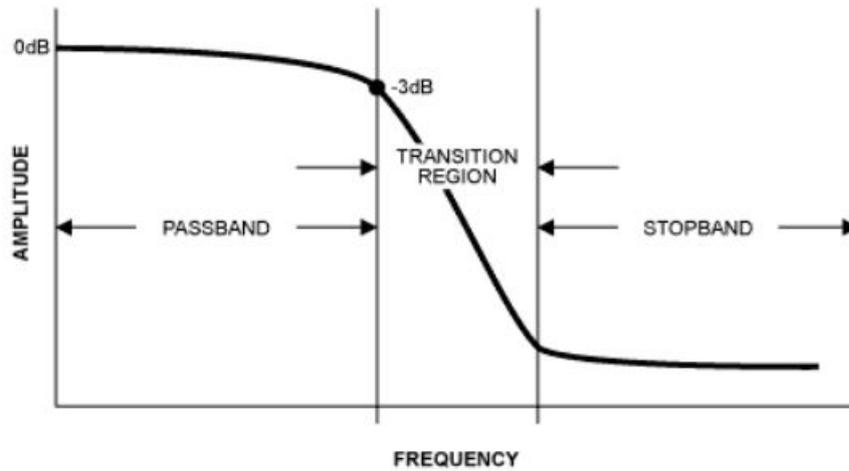


Figura 7 – Filtragem do Sinal do Acelerômetro (BEANAIR, 2019)

Ao selecionar um filtro analógico, o objetivo é fornecer uma frequência de corte que remova os sinais indesejados da entrada do ADC ou pelo menos os atenua a ponto de não afetar adversamente o circuito. Um filtro anti-aliasing é um filtro passa-baixa que faz isso. Uma vez que as frequências de sinal de interesse são conhecidas, use um programa de filtro simples para determinar a topologia de filtro necessária para atender aos requisitos de banda passante, banda de parada e região de transição.

O conversor Analógico para Digital é baseado em uma arquitetura verdadeira SAR (Registro de Aproximação Sucessiva) sem códigos ausentes. O ADC integra um sensor de temperatura interno, útil para realizar a calibração do sistema. A referência interna é compensada por temperatura dentro de 10 mV. A referência é cortada para fornecer um desvio típico de 10 ppm / grau Celsius.

Na Figura 8 podemos ver os componentes internos que compõem o funcionamento do acelerômetro usado no teste.

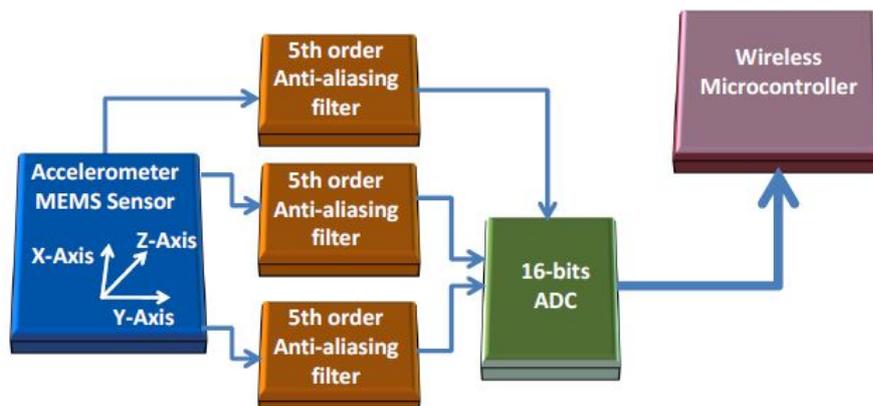


Figura 8 – Configuração Interna do Acelerômetro da BeanAir (BEANAIR, 2019)

2.4 Caracterização da Área de Estudo - Vibrações Mecânicas

As vibrações mecânicas decorrentes do transporte de componentes eólicos foram analisadas matematicamente a partir da Transformada de Fourier e, resultaram na condição atual da peça.

Com o avanço industrial e a construção de máquinas que utilizam motores para funcionar, os engenheiros tinham que lidar com problemas de redução da vibração e isolamento. Ao passar do tempo, técnicas de isolamento e redução de vibração tornaram-se parte fundamental do projeto da máquina e, com isso, cresceu a necessidade de medição e análise precisas de componentes mecânicos expostos à vibração. Essa necessidade foi amplamente satisfeita para as máquinas lentas e robustas do passado devido à experiência dos funcionários que lidavam com a planta, ou por instrumentos ópticos simples que medem o deslocamento vibratório. Nas últimas décadas uma nova tecnologia de medição de vibração foi desenvolvida e adequada para analisar maquinários com modernos sistemas e com alta velocidade. Usando acelerômetros piezoelétricos para converter o movimento vibratório em sinal elétrico, o processo de medição e análise foi se aperfeiçoando e sendo cada vez mais utilizados pela eletrônica.

Na prática, é muito difícil evitar vibrações. Geralmente elas ocorrem devido aos efeitos dinâmicos das tolerâncias, folgas, contato de rolamento e fricção entre peças da máquina e forças fora de equilíbrio na rotação e membros alternativos. Muitas vezes, pequenas e desprezíveis vibrações podem excitar as frequências ressonantes de algumas outras partes estruturais e ser amplificado em grandes fontes de vibração e ruídos. Às vezes, no entanto, a vibração mecânica desempenha um papel fundamental ao processo produtivo. Por exemplo, vibrações geradas intencionalmente em alimentadores de componentes, compactadores de concreto, perfuratrizes e estacas. Máquinas de teste de vibração são usadas extensivamente para fornecer um nível de energia de vibração para produtos e subconjuntos onde é necessário examinar suas características físicas ou respostas funcionais e verificar sua resistibilidade a vibrações ambientes (BRÜEL&KJÆR, 1982).

A vibração de um corpo se dá quando descreve um movimento de oscilação sobre uma posição de referência. O número de vezes que um ciclo completo de movimento ocorre durante o período de um segundo é chamado de frequência e é medido em hertz (Hz). O movimento consiste em um único componente ocorrendo em uma única frequência ou em várias componentes que ocorrem em diferentes frequências simultaneamente, como por exemplo, com o movimento do pistão de um motor de combustão. Os sinais de vibração na prática geralmente consistem em muitas frequências ocorrendo ao mesmo tempo e por isso é que não se pode analisar imediatamente apenas olhando para o tempo de amplitude padrão, quantos componentes existem e em que frequências que eles podem ocorrer. Essas componentes podem ser comparadas plotando a amplitude das vibrações contra sua frequência. A quebra dos sinais de vibração em componentes de frequência individuais é chamada análise de frequência, uma técnica que pode ser considerada base no estudo das medições de vibração de diagnóstico. O gráfico que mostra

o nível de vibração como uma função de frequência é chamado espectrograma de frequência. Ao analisar a frequência das vibrações da máquina, normalmente encontra-se um número de frequências periódicas proeminentes e componentes diretamente relacionados aos aspectos fundamentais movimentos de várias partes da máquina. Com a análise da frequência, portanto, se é capaz de rastrear as fontes de vibração indesejáveis (BRÜEL.KJÆR, 1982).

A amplitude da vibração, que é a característica que descreve o quão forte foi a vibração, pode ser quantificada em várias formas. No diagrama, é informado o relacionamento entre o nível pico a pico, o nível máximo, o nível médio e o nível RMS de uma onda senoidal.

O valor pico a pico é fundamental para o experimento, pois, na medida em que indica a extensão máxima da onda, mostra se o deslocamento vibratório de uma máquina foi crítica para o estresse máximo ou não. Além do valor de pico, mencionado anteriormente e que é de suma importância para indicar choques de curta duração, porém não leva em consideração o histórico de vibrações, o valor RMS é a medida de amplitude mais completa e relevante porque considera a história do tempo da onda e fornece um valor de amplitude diretamente relacionado ao conteúdo energético e, portanto, a habilidades destrutivas da vibração.

A aceleração vibratória não é um parâmetro que é medido sozinho, a partir de integradores eletrônicos o sinal de aceleração é convertido em velocidade e deslocamento. Os medidores de vibração mais modernos estão equipados para medir todos os três parâmetros. Onde uma única medição de vibração de banda larga de frequência for feita, a escolha dos parâmetros são importantes se o sinal tem componentes em muitas frequências.

A partir de medições feitas em outros experimentos, o valor geral da vibração RMS velocidade medida na faixa de 10 a 1000 Hz fornece a melhor indicação da gravidade de uma vibração. Provável explicação é que um dado nível de velocidade corresponde para um determinado nível de energia, de modo que a vibração em baixas e altas frequências é igualmente ponderada a partir de uma vibração ponto de vista energético. Na prática, muitas máquinas tem um espectro de velocidade com baixas oscilações. É vantajoso selecionar o parâmetro que fornece o espectro de frequência mais plano para melhor utilizar a faixa dinâmica (a diferença entre os menores e maiores valores que podem ser medidos) da instrumentação. Por esse motivo, a velocidade ou parâmetro de aceleração é normalmente selecionado para frequência para fins de análise. Como as medições de aceleração são ponderadas para componentes de vibração de alta frequência, parâmetros tendem a ser usados onde a faixa de frequência de interesse abrange altas frequências. A natureza dos sistemas mecânicos é tal que deslocamentos mais claros ocorrem apenas em baixas frequências, portanto medições de deslocamento são de valor limitado no estudo geral de vibração mecânica. Onde pequenas folgas entre os elementos da máquina estão sendo considerados, o deslocamento vibratório é, com certeza, uma fundamental consideração. O deslocamento é frequentemente usado como um indicador de desequilíbrio nas peças rotativas da máquina, porque grandes deslocamentos geralmente ocorrem no eixo rotacional relacionado à frequência, considerada a maior vertente para fins de equilíbrio (BRÜEL.KJÆR, 1982).

O medidor de vibração nos dará um único nível de vibração medido em uma ampla faixa de frequência. Para revelar os componentes de frequência individuais que compõem a banda larga do sinal, é realizada uma análise de frequência. Para esse fim, é usado um filtro que apenas passa as partes do sinal de vibração contidas em uma estreita faixa de frequência. A banda de passagem do filtro é movida sequencialmente em toda a faixa de frequência de interesse para obter uma leitura separada do nível de vibração para cada banda.

As medições de vibração de banda de frequência única e ampla são um útil indicador de vibração de aparência rápida, que pode ser usado, por exemplo, ao avaliar a condição geral de uma máquina ou a eficácia do isolamento de vibrações medidas. O nível real medido será julgado mais ou menos grave em comparação com as medições subsequentes. Para fins de diagnóstico, por exemplo, no curso do desenvolvimento do produto, a análise de frequência é necessária. Alguns componentes do espectro de frequência de vibração podem estar imediatamente relacionados a funções força, por exemplo, velocidades de rotação do eixo e frequências de rede.

Quase sempre encontraremos componentes de frequência significativos no espectro que também estão relacionados aos movimentos fundamentais. Os mais significativos são geralmente harmônicos (um múltiplo) de uma das frequências fundamentais. Harmônicos frequentemente surgem devido à distorção das frequências fundamentais ou porque o movimento periódico original não é puramente sinusoidal. Se eles coincidem com as frequências ressonantes de outros elementos da máquina, então possivelmente consideráveis níveis de vibração podem ocorrer, o que pode se tornar uma fonte de ruído ou resultar na transmissão de altas forças para outras peças do equipamento.

Muitas vezes, é impraticável alterar as frequências forçadas (velocidades do eixo e relações de transmissão, por exemplo.), portanto, outros métodos de redução de níveis de vibração indesejáveis são usados. Por exemplo, desafinando o elemento da máquina (alterando sua frequência ressonante) alterando sua massa ou rigidez; atenuando a transmissão de vibração com materiais de isolamento ou adicionando materiais de amortecimento para reduzir a amplitude da vibração (BRÜEL.KJÆR, 1982).

Os equipamentos raramente quebram sem aviso prévio, os sinais de falha iminente geralmente estão presentes muito antes da avaria que torna a máquina inutilizável. Os problemas nas máquinas são quase sempre caracterizados por um aumento no nível de vibração que pode ser medido em alguns pontos da superfície da máquina e, assim, agir como um indicador. A curva mostrada no gráfico abaixo é típica do nível de vibração contra o tempo e que demonstra esse efeito. Com manutenção preventiva normal, os reparos são realizados em intervalos fixos com base na expectativa de vida mínima para peças de desgaste. Adiando o reparo até que os níveis de vibração indiquem necessidade, mas antes da avaria, é desnecessário a remoção (que geralmente promove mais falhas) e atrasos na produção são evitados. Esta manutenção preventiva de máquinas e equipamentos comprovadamente fornece uma vantagem econômica apreciável, aumentando o tempo médio entre o desligamento e ainda impede a surpresa e

os efeitos prejudiciais do não funcionamento durante o expediente. Essas técnicas são agora amplamente usadas especialmente nas indústrias de processo contínuo e durante transporte de materiais eletrônicos frágeis. O nível de vibração que pode ser permitido antes da realização um reparo é mais bem determinado através da experiência.

Atualmente, as vibrações que necessitam intervenção possuem diferenças de duas a três vezes (6 a 10 dB acima) o nível de vibração considerado normal. Sobre vibrações em um corpo, a partir da análise de frequência da vibração de sinais se é capaz de localizar a fonte de muitos dos componentes de frequência presentes. O espectro de frequência de uma máquina em condições normais de operação pode, portanto, ser usado como um medidor em tempo real das condições de referência para essa máquina. Análises subsequentes podem ser comparadas com referência para que não seja apenas indicada a necessidade de ação, mas também a fonte da falha é diagnosticada (BRÜEL.KJÆR, 1982).

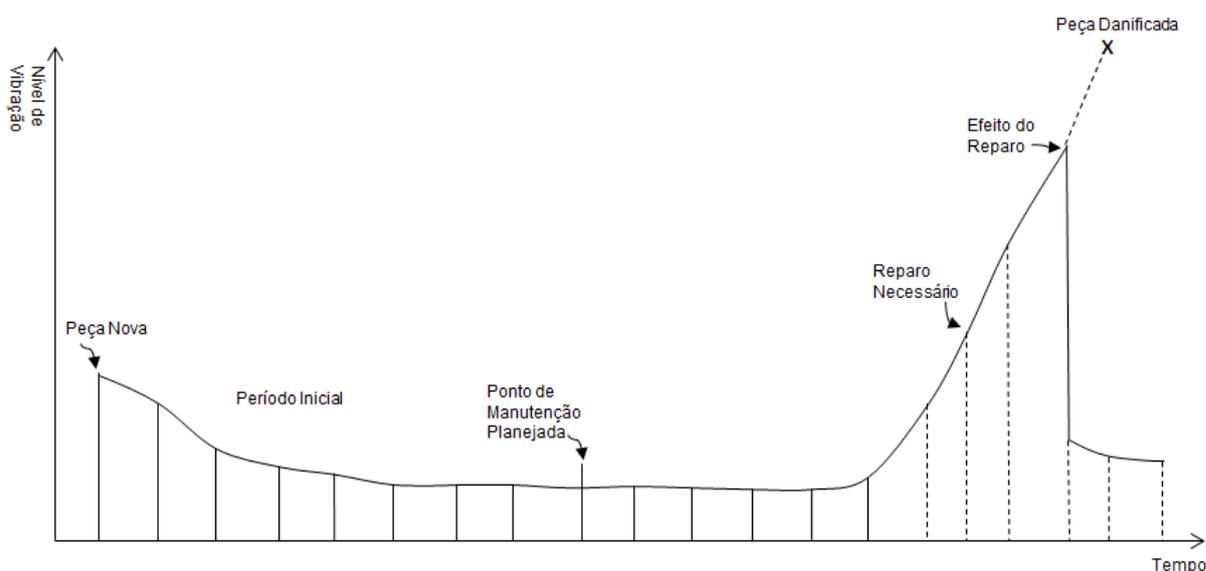


Figura 9 – Gráfico Vibrações x Tempo (BRÜEL.KJÆR, 1982)

O complexo ambiente de transporte sempre resulta na composição de frequências (espectro de frequências) com frequências individuais que possuem amplitudes diferentes. No transporte rodoviário, o vibrações ocorrem entre 3 e 350 Hz com acelerações de 0,5 a 1,0 g. A bordo de um navio vibrações ocorrem entre 2 e 33 Hz (SENSEBIG, 2017).

2.5 Metodologia - Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier é o método matemático que foi utilizado para obter resultados da condição da peça após seu transporte. Nesta seção será mostrada a parte teórica sobre a transformada e a parte prática de como obtêm-se um gráfico de aceleração x frequência a partir dos dados teóricos.

A FFT, ou transformada rápida de Fourier é uma implementação da transformada discreta de Fourier que se adapta ao hardware, a fim de maximizar o desempenho. Ela foi implementada na linguagem C e pode ser utilizada em várias arquiteturas de computadores e sistemas operacionais, devido sua agilidade na análise de dados. A FFTW (Biblioteca de Transformadas de Fourier) não impõe restrições à classificação (dimensionalidade) de transformações multidimensionais. (A maioria das outras implementações são limitadas a unidimensionais, ou no máximo dados bidimensionais e tridimensionais.). A FFTW suporta transformadas discretas de Fourier de dados reais, dados simétricos, antissimétricos (também chamados de cosseno discreto) e transformações senoidais (FRIGO M. E JOHNSON, 2005).

A interação do usuário com o FFTW ocorre em dois momentos: planejamento, no qual a FFTW se adapta ao hardware e execução, na qual a FFTW realiza um trabalho útil para o usuário. Para calcular uma DFT, o usuário chama primeiro o código FFTW, especificando o problema a ser resolvido. O problema é uma estrutura de dados que descreve a maneira que os dados de entrada se comportam, calculando tamanhos de matriz e layouts de memória, mas não contém os dados em si. Com isso, é produzido um plano, um dado executável que aceita os dados de entrada e calcula o valor desejado DFT (transformada discreta de Fourier). Posteriormente, o usuário pode executar o plano a quantidade de vezes necessárias e fazer análises a partir dele (FRIGO M. E JOHNSON, 2005).

O programador da FFTW trabalha medindo o tempo de execução real de muitos planos diferentes e selecionando o mais rápido. Este processo é análogo ao que um programador faria manualmente ao ajustar um programa para uma máquina fixa, mas no caso da FFTW nenhuma intervenção manual é necessária. Por causa das repetidas medições de desempenho, no entanto, o processo demanda maior tempo. Em aplicativos críticos para o desempenho, muitas transformações do mesmo tamanho são normalmente necessárias e, portanto, um grande custo único é geralmente aceitável. De outra forma, o FFTW fornece um modo de operação em que o planejador rapidamente retorna um plano inicial, que não é necessariamente o mais rápido, porém o programa fica pronto para receber novos dados (FRIGO M. E JOHNSON, 2005).

O fornecimento de dados para a posterior análise pela transformada de Fourier é obtido através da variação da aceleração gravitacional dos acelerômetros, que armazena os dados em sua memória ou transmite em tempo real para um computador através de wi-fi.

As constantes da aceleração gravitacional nos três eixos (eixo x, y e z) do acelerômetro são, respectivamente, \hat{a}_{gx} , \hat{a}_{gy} e \hat{a}_{gz} e as componentes de aceleração produzidos por vibração respectivamente são \hat{a}_{vx} , \hat{a}_{vy} e \hat{a}_{vz} . A aceleração medida pelo acelerômetro é apresentada por \hat{a}_{mx} , \hat{a}_{my} e \hat{a}_{mz} respectivamente. Estas variáveis satisfazem a relação mostrada a seguir: (LIU J. WANG, 2017).

$$\hat{a}_{mx} = \hat{a}_{gx} + \hat{a}_{vx} \quad (2.1)$$

$$\hat{a}m_y = \hat{a}g_y + \hat{a}v_y \quad (2.2)$$

$$\hat{a}m_z = \hat{a}g_z + \hat{a}v_z \quad (2.3)$$

A análise de sinais no domínio da frequência e no domínio do tempo refletirá diferentes características físicas. A transformada de Fourier é uma ferramenta poderosa para converter um sinal a partir do domínio do tempo para o domínio de frequência (LIU J. WANG, 2017). Um sinal no domínio do tempo $x(t)$ com um comprimento de amostra T é transformado nos dados discretos $x(n)$ após a aquisição de dados. Se N pontos de dados forem coletados durante o tempo T , então a transformada de Fourier discreta normalizada (DFT) de $x(t)$ pode ser alcançada por:

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{2\pi}{N} nk} \quad (2.4)$$

Onde tanto o n como o k vão de $0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ e o DFT usa um algoritmo da transformada de Fourier. Após uma transformada discreta de Fourier, $x(n)$ se torna uma sequência complexa com o comprimento de N . O sinal de aceleração $Av(n)$ é obtido pela fusão dos três sinais de aceleração dos eixos, que podem ser calculados por:

$$|Av(n)| = \sqrt{avx(n)^2 + avy(n)^2 + avz(n)^2} \quad (2.5)$$

A Figura 10 nos mostra a fusão dos três sinais de aceleração, gerando uma só aceleração no domínio do tempo e ficando pronta para ser transformada em domínio da frequência.

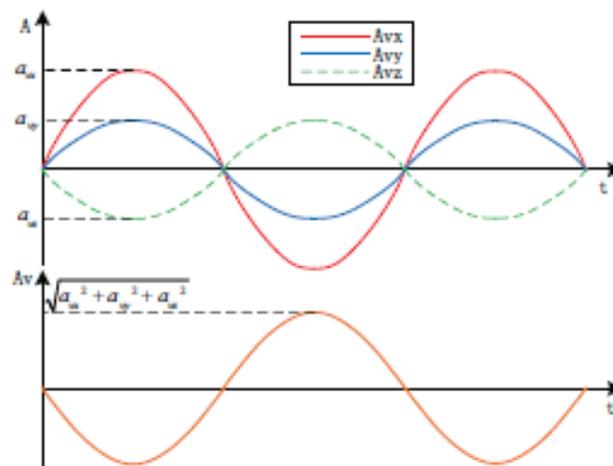


Figura 10 – Conversão dos Sinais de Aceleração, Fonte: (LIU J. WANG, 2017)

Após obter a aceleração medida pelo acelerômetro nos 3 eixos, eles são implementados pela transformada de Fourier para obtenção dos espectros de frequência, sendo estes espectros que serão analisados e servirão como parâmetros para dizer a condição do objeto medido. Na equação 3.5, $A_v(k)$ é obtido pela transformação do $A_v(n)$ de sinal de aceleração para o domínio da frequência por meio da transformada de Fourier. A amplitude, a frequência e a fase inicial do ângulo de cada componente harmônico de aceleração são encontradas e, a partir disso, a amplitude, o ângulo de fase inicial de cada deslocamento do componente harmônico e o sinal de deslocamento de vibração são obtidos (LIU J. WANG, 2017). A análise por este método é baseada em valores teóricos e aproximados, dependendo principalmente dos materiais da estrutura e da distância entre a área de medição e a fonte de ruído. Ao realizar uma análise de Fourier, uma frequência do espectro que lista as frequências e suas amplitudes correspondentes pode ser observada, conforme apresentado na Figura 11. Esse é o método usado no script FFT e PPV do SCILAB e ajuda a conhecer uma frequência e amplitude associadas à precisão (BEANAIR, 2019). Na Figura abaixo, o eixo X representa a frequência (Hz) e o eixo Y a aceleração (mG).

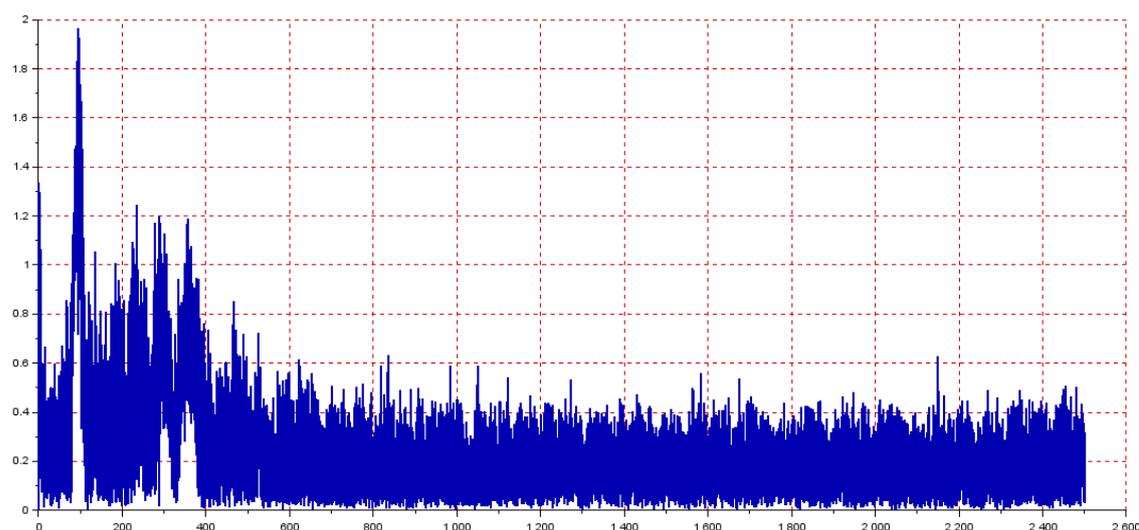


Figura 11 – Gráfico Aceleração x Frequência.

A Figura 11 corresponde a análise das variações obtidas pelo acelerômetro da Figura 5. Este modelo foi obtido durante um deslocamento feito por um veículo pela cidade de Ouro Preto - MG. Devido às irregularidades das ruas da cidade, houve um pico de aceleração de amplitude de módulo 2 na faixa de 100Hz e o restante do trajeto em calçamento foi substituído por asfalto e, com isso, as oscilações ficaram mais estáveis. Disponível com várias medições (variam de g a $g10 g$), o BeanDevice Wilow AX-3D é uma ULP (Ultra-Low-Power) acelerômetro WIFI com registrador de dados embutido (BEANAIR, 2019).

A obtenção desses dados é extremamente importante, pois permite ao transportador e à empresa responsável pelo equipamento saber exatamente em qual momento a peça foi danificada,

aprimorando a logística de transporte e manuseio do produto. Além disso, é fundamental contabilizar a porcentagem de pás eólicas que chegam ao sítio eólico já danificadas, porque além de ser necessário fazer a manutenção, ao se obter os dados e da análise da transformada de Fourier feita sobre eles com antecedência, poupa-se tempo e otimiza-se a instalação e geração de energia renovável.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Dados

Definido o conjunto transportador a ser utilizado para o experimento, a rota, o método de funcionamento do acelerômetro e a conversão dos valores para o domínio da frequência a partir da transformada de Fourier, para se obter os dados e realizar uma posterior avaliação da peça foram definidos os locais para instalação dos acelerômetros.

Neste trabalho, quatro acelerômetros foram instalados diretamente na pá eólica em quatro diferentes pontos para medição durante seu transporte e o sinal de aceleração e deslocamento foi obtido após realizar a integral quadrática dos valores coletados. Este método supera a desvantagem da instalação irregular de sensores em medição sem contato, porém a média do sinal de aceleração tem de ser diferente de zero e a instalação do acelerômetro deve estar regulado na mesma linha que a direção de vibração para evitar que o deslocamento medido seja desviado, ou seja, para otimizar o uso do equipamento, deve-se nivelar e calibrar os acelerômetros conforme o deslocamento da carga. Para melhorar a precisão dos dados obtidos, o acelerômetro tradicional de eixo único é substituído pelo acelerômetro de três eixos, fornecendo medições em x, y e z, além das informações necessárias para se obter a transformada discreta, conforme a Figura 12 (LIU J. WANG, 2017).

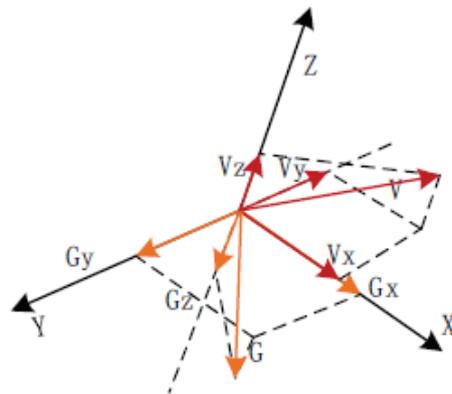


Figura 12 – Diagrama dos Sinais de Aceleração. Fonte:(LIU J. WANG, 2017)

Durante um impacto, a aceleração aumenta, atinge um valor máximo e depois diminui. Quando um corpo elástico, como uma pá eólica, atinge uma superfície dura, o movimento não para repentinamente. Devido a propriedades elásticas das pás, elas continuam a se mover por alguns milissegundos. À medida que a pá diminui a velocidade após um intervalo de tempo, o pulso de choque diminui. A causa do dano é a meia porção senoidal do pulso de choque com amplitude máxima. Se, no entanto, uma pequena bola de aço duro bater na mesma parede com a

mesma velocidade inicial do impacto, a duração do impacto é consideravelmente menor, mas a aceleração máxima é mais alta. Isto significa que, para a mesma energia de impacto, uma massa menor atinge maior aceleração de amplitude e menor duração ou maior frequência ($f = 1 / T$). É por isso que grandes equipamentos ($> 100T$) são danificados entre 2,5 a 5,0 g (2-20 HZ). Enquanto pequenos equipamentos, como laptops, estão danificados entre 37 e 50g (2-250Hz). Em comparação com um laptop, para a mesma energia de impacto, uma pá eólica atinge menores acelerações de pico (BEANAIR, 2019).

A amplitude do pico é medida em unidades de "g" para o qual $g = 9,8m / s^2$. A forma de onda é descrita de três maneiras e qualquer uma pode ser adotada para componentes eólicos frequência, duração e mudança de velocidade (ΔV).

A frequência descreve o tempo em comparação com os ciclos por segundo e a unidade de medida é Hertz (Hz).

A duração descreve o tempo em comparação com segundos e o tempo usual unidade de medida é milissegundos (ms). As expressões matemáticas relacionadas a esses dois termos são:

$$Duracao = \frac{1}{Frequencia} \quad (3.1)$$

$$Frequencia = \frac{1}{Duracao} \quad (3.2)$$

Alteração de velocidade (ΔV) é a área abaixo do gráfico do tempo de aceleração do choque. Está diretamente relacionado à energia contida no choque. Quanto maior a velocidade, maior o conteúdo de energia. A Figura 13 mostra uma onda de choque ou uma onda de impacto no domínio do tempo. A onda é uma curva senoidal com aceleração em g ($g = 9,8m / s^2$) ao longo do eixo y e tempo em ms ao longo do eixo x.

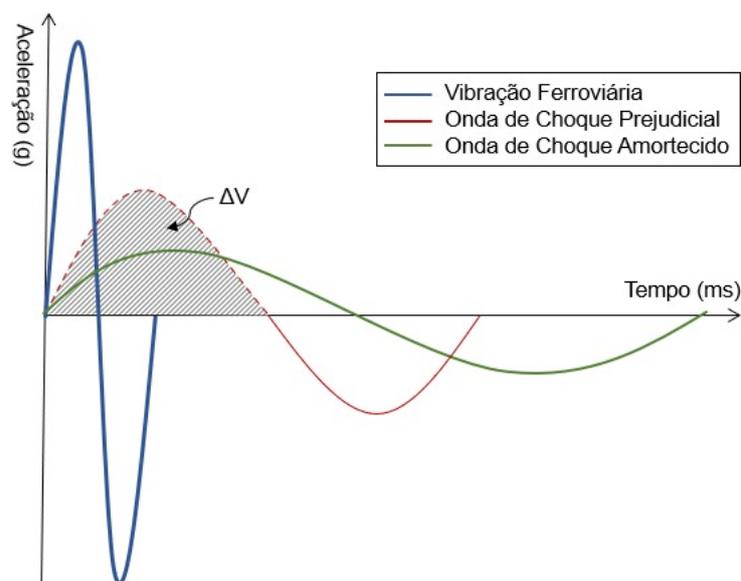


Figura 13 – Comparação entre Pulsos de Choque . Fonte:(SENSEBIG, 2017)

Existem duas partes de um choque que causam danos: Amplitude de pico (g) Mudança de velocidade (ΔV)

O dano na peça ocorre apenas quando a mudança de velocidade é maior do que a mudança crítica de velocidade. Abaixo da mudança crítica de velocidade, nenhum dano ocorre independentemente do nível de aceleração de entrada. Em essência, não há energia suficiente no choque para danificar a pá eólica. Exceder a mudança crítica de velocidade, no entanto, não implica necessariamente que ocorrerão danos. Se a mudança na velocidade ocorre de maneira a administrar doses aceitáveis de aceleração do produto, a mudança de velocidade pode ser muito grande sem causar nenhum dano. O dano ocorre apenas se tanto a mudança de velocidade (ΔV) quanto à amplitude de aceleração de pico (g) excede seu limiar crítico (SENSEBIG, 2017).

Na Figura 13, vibração ferroviária (onda de choque azul 2000g a 0,1ms Amplitude = 2000g e Duração = 0,1ms. Frequência: 500Hz) não causa danos, pois o ΔV crítico não é atingido.

Considerando que uma queda de algumas polegadas (dependendo do peso da peça, volume e natureza da superfície de impacto) pode produzir choque de 7g a 50ms (amplitude da onda vermelha = 7g e duração = 50ms, frequência: 10Hz) e pode danificar a pá eólica.

Danos a uma pá ocorrem apenas quando a amplitude de pico (g) e a duração (ou mudança de frequência ou velocidade (ΔV)) do pulso de choque atinge simultaneamente o limiar de dano. Estes dois juntos, especificam os critérios de dano ou NOSS (choque não operacional) de acordo com a especificação de um produto. Pode-se especificar a fragilidade ou NOSS de um equipamento das seguintes maneiras:

Em termos de amplitude e duração críticas (por exemplo, 7g a 50ms).

Em termos de amplitude e frequência críticas (por exemplo, 7g a 10Hz).

Em termos de amplitude crítica e mudança crítica de velocidade (ΔV) (por exemplo, 7g a 2,18 m/s).

A fragilidade da pá eólica depende de suas propriedades do material, massa, volume e design. Devido ao tamanho da peça e monetário é impossível estabelecer sua fragilidade usando queda padrão ou testes de mesa de choque. Teoricamente, pode-se calcular a fragilidade pela resposta à análise do espectro de Choque (SRS) ou em mais detalhes usando a análise FEA (Análise de Elementos Finitos). A melhor maneira prática de estimar a fragilidade das pás eólicas é analisar os registros históricos dos dados de impacto em correlação com os danos que possam ter ocorrido durante remessas anteriores. Após um número maior de testes, arquivar em uma tabela de correlação histórica entre choque e danos reais por diferentes pás ou peso será fundamental para melhorar a qualidade dos testes rodoviários (SENSEBIG, 2017).

A tabela a seguir (tabela 1) foi criada a partir de experimentos realizados em transportes de transformadores de diferentes tamanhos e, a partir de desgastes ocorridos na peça, foram definidos limites críticos do nível de fragilidade (g) e mudanças de velocidades (m/s). Como não há grandes variações e ainda não temos uma tabela específica para pás eólicas (variam entre 7 e 30 toneladas), será adotado a mesma tabela para realizar o cálculo dos danos sofridos pela peça (SENSEBIG, 2017).

Peso do Transformador (T)	Nível de Fragilidade (g)	(ΔV) Variação de Velocidade (m/s)
Até 10 T	9	1.40
Entre 10-50 T	6	0.94
Entre 50-100 T	5	0.78
Entre 100-200 T	3	0.47
Entre 200-300 T	2.5	0.39
Acima de 300 T	2	0.31

Tabela 1 – Peso x Aceleração x Variação de Velocidade. Fonte:(SENSEBIG, 2017)

Os registradores de impacto devem medir acelerações em três eixos, com faixa recomendada de 0g a 10g. Impactos que excedem os critérios de design em qualquer um dos três eixos podem causar danos. Dependendo, com base nos critérios de projeto, impactos longitudinais acima de 5g e entre 2-20 Hz são tidos como manuseio grosseiro.

A partir dos dados da tabela 1 é possível realizar a análise do transporte da carga especial e determinar as condições da peça no final do trajeto. É de grande importância este estudo, pois permite mensurar as condições da pá eólica e finalizar o projeto eólico com maior rapidez.



Figura 14 – Conjunto transportador semelhante ao utilizado no teste rodoviário. Fonte: Arquivo Pessoal.

Com o objetivo de apresentar os resultados do teste rodoviário realizado para um transporte de pá eólica no nordeste do Brasil, 4 acelerômetros foram instalados em um conjunto transportador semelhante ao da Figura 14 para realizar a medição da aceleração e impactos gerados na peça..

3.2 Método ou procedimento de análise

O teste rodoviário foi realizado em uma rota de aproximadamente 36 km por uma rodovia de pista simples. As condições da rodovia eram boas com pavimento regular exceto em alguns pontos de buracos e trechos recapeados.

Os acelerômetros foram instalados na pá e os quadros de embalagem foram distribuídos como indicado na tabela 2:

Dados	Acelerômetro A	Acelerômetro B	Acelerômetro C	Acelerômetro D
Local	Embalagem da Raiz (Tubo Inferior)	Na Raiz da Pá (Dentro da Raiz entre $0 < Z < 200\text{mm}$)	Na Embalagem da Ponta	No Spar Cap da Pá
Altura em Relação à Prancha da Carreta	120mm	400mm	700mm	1800mm
Deslocamento em Relação ao Centro da Carreta	1220mm	1220mm	950mm	950mm

Tabela 2 – Distribuição dos Acelerômetros.

As Figuras 15 e 16 mostram o posicionamento dos acelerômetros B e D na pá após a instalação:



Figura 15 – Acelerômetro B / Raiz da Pá: Arquivo Pessoal.

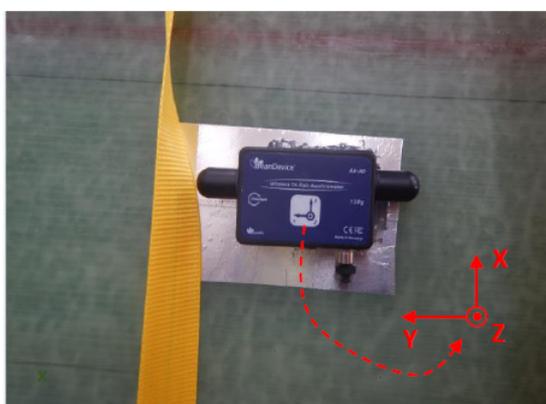


Figura 16 – Acelerômetro D / Spar Cap. Fonte: Arquivo Pessoal.

A configuração dos quatro acelerômetros foi setada conforme a tabela 3:

Configuração dos Acelerômetros	Valores
Ratio:	1
Offset:	0
Unit:	<i>g</i>
Data Acquisition Cycle:	10
Data Acquisition Duration:	NA
Sampling Rate:	10
Cut Off Frequency	8

Tabela 3 – Configuração dos Acelerômetros.

A definição dos eixos foi baseada no seguinte referencial:

Transversal: Paralelo ao chão e perpendicular ao eixo longitudinal da carreta;

Vertical: Perpendicular ao chão; Longitudinal: Paralelo ao chão e paralelo ao eixo longitudinal da carreta.

A orientação dos acelerômetros ficou disposta conforme a tabela 4:

Acelerômetro	Localização	Transversal	Vertical	Longitudinal
A	Quadro da Raiz	Y	Z	X
B	Na Raiz da Pá	Y	Z	X
C	Quadro da Ponta	Z	X	Y
D	Ponta da Pá	Z	X	Y

Tabela 4 – Localização dos Acelerômetros por Eixo.

4 RESULTADOS

Dados do Experimento	Valores Obtidos
Hora de Início do Teste:	15:16:00h
Hora de Final do Teste:	17:30:12h
Duração:	2:13:48h
Velocidade Máxima do Veículo	70 km/h
Velocidade Média do Veículo	35 km/h
Comprimento:	54000mm
Largura	4500mm
Altura	3500mm
Comprimento Total	58000mm
Largura Total	4500mm
Altura Total	5000mm
Peso(Carga)	25t
Tara	27t
Peso Bruto Total	52t
Cavalo	6x2
Carreta	Extensora de 3 eixos direcionais

Tabela 5 – Valores e Especificações do Teste.

Na tabela 5 encontram-se os dados técnicos do experimento, contendo altura, comprimento, largura e peso do conjunto transportador, definições da carreta e cavalo, horário de início, fim e duração do teste.

Abaixo, nas Figuras 17, 18, 19 e 20 se encontram os gráficos das acelerações (Eixo Y) x tempos (Eixo X) obtidas nos três eixos de cada acelerômetro durante todo o teste. Para isso, os valores coletados durante 7892s de teste. Os picos isolados de aceleração, que ocorreram em curtos intervalos de tempo, foram desconsiderados, pois não são relevantes para esta análise.

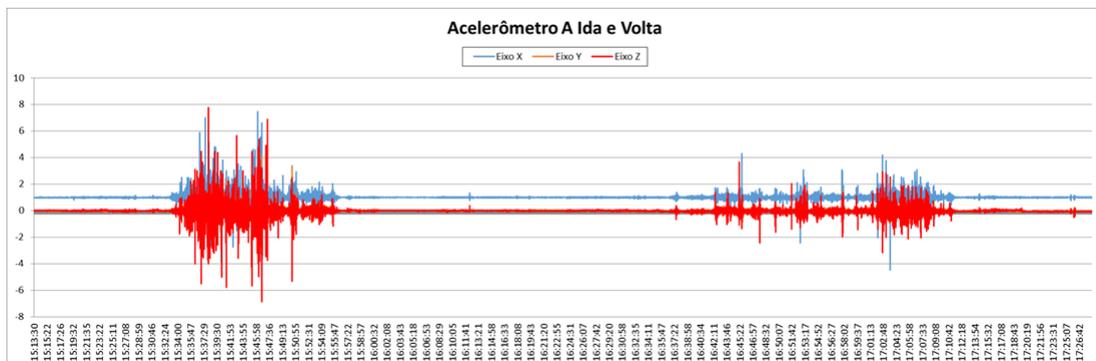


Figura 17 – Acelerômetro A, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.

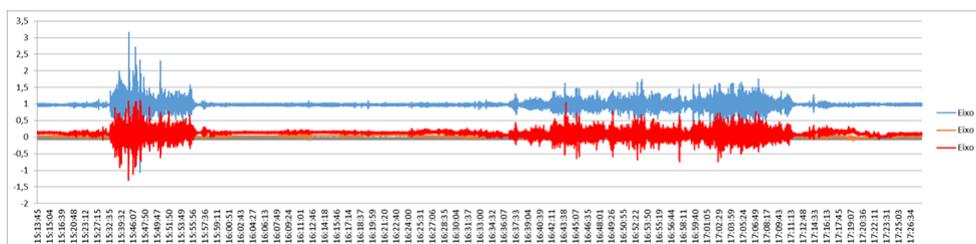


Figura 18 – Acelerômetro B, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.

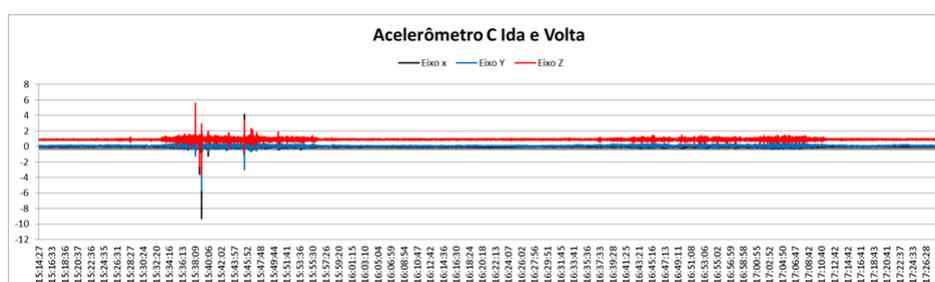


Figura 19 – Acelerômetro C, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.

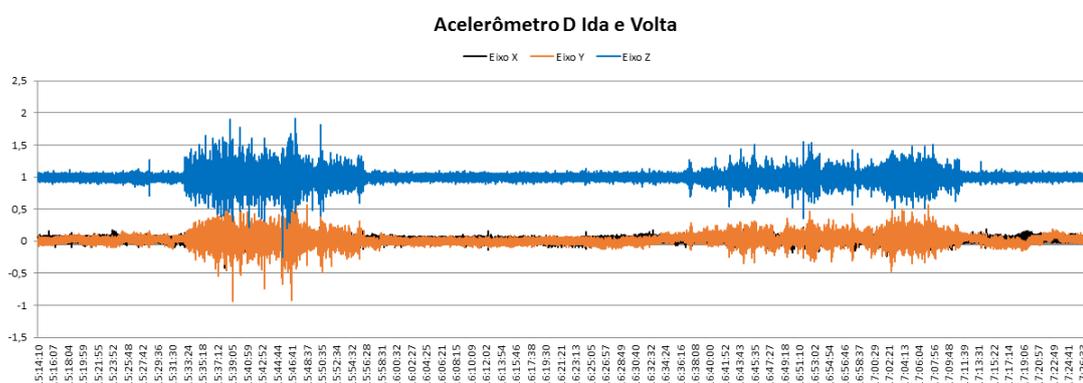


Figura 20 – Acelerômetro D, ida e volta. Fonte: Arquivo Pessoal.

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 17, 18, 19 e 20 pode-se notar que os maiores valores de acelerações aconteceram durante a ida entre 15:28:00h e 16:00:00h. Para uma melhor visualização destas acelerações, a seguir, nas Figuras 21, 22, 23 e 24 estão apresentados os gráficos de aceleração x tempo, antes de ser feita a transformada rápida de Fourier.

Eixo Vertical Acelerômetro A

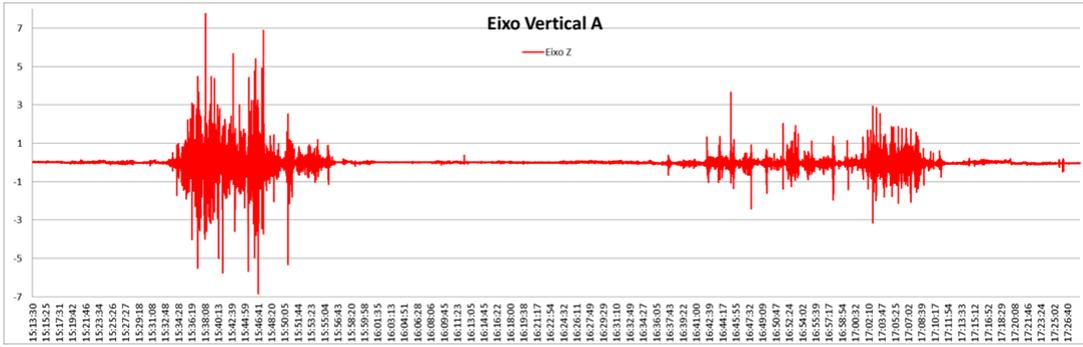


Figura 21 – Eixo vertical A, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.

Eixo Vertical Acelerômetro B

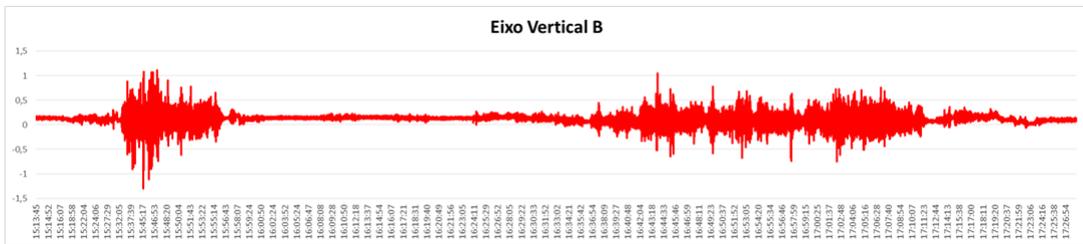


Figura 22 – Eixo vertical B, Aceleração x Tempo Fonte: Arquivo Pessoal.

Eixo Vertical Acelerômetro C

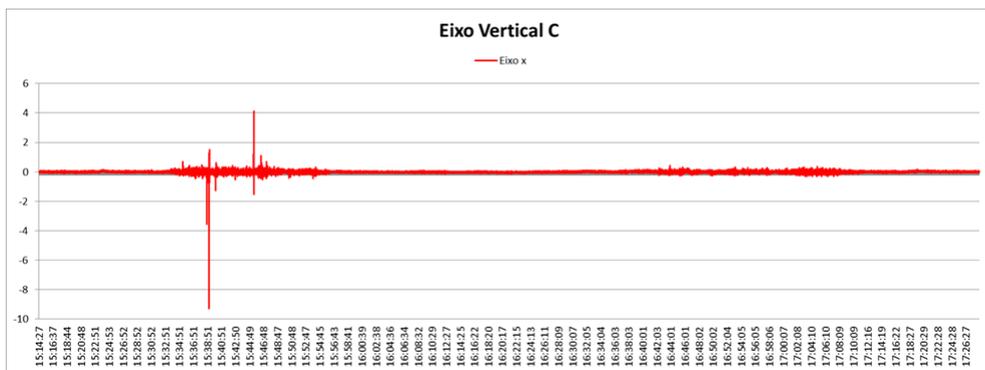


Figura 23 – Eixo vertical C, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.

Eixo Vertical Acelerômetro D

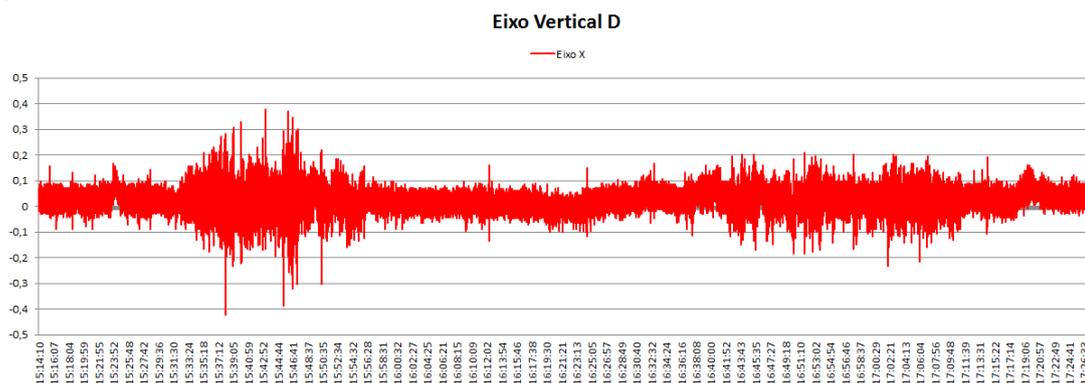


Figura 24 – Eixo vertical D, Aceleração x Tempo. Fonte: Arquivo Pessoal.

Tomando-se como base a tabela 1, referente aos transformadores, para mensurar os valores críticos a partir do peso da pá eólica, considerando que a pá utilizada no experimento possui 25 toneladas e, para ser danificada, necessita simultaneamente ter aceleração acima de 6g e variação de velocidade acima de 0,94 m/s. Também foi levado em consideração que dentro de uma rodovia uma carga especial deve possuir acelerações entre 0,5 e 1 g com variações de frequência entre 3 a 350 Hz para serem considerados valores aceitáveis. Após a aplicação da FFT (Transformada Rápida de Fourier), foram obtidos os seguintes valores das Figuras 25, 26, 27 e 28:

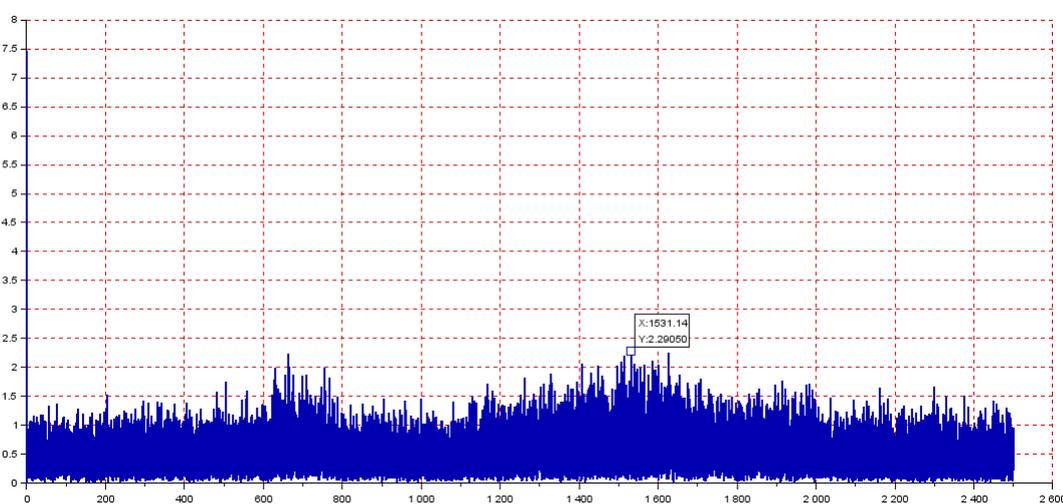


Figura 25 – Eixo vertical A, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.

Os valores obtidos estão na tabela 6 e é composto pelas medições, valor contínuo de sinal de aceleração (dentro dos padrões aceitáveis, entre 0,5 e 1,0), a maior amplitude encontrada (desconsideramos o primeiro valor, pois ele não se encaixa no padrão do experimento), a variação de velocidade para a maior amplitude e a duração da maior aceleração.

Acelerômetro A	Valores
Medições	80329
Valor Contínuo de Aceleração	0,90g
Maior amplitude encontrada	2,29g
Variação de Velocidade para Maior Amplitude	0,06 m/s
Duração da Aceleração	0,000033 ms

Tabela 6 – Valores Obtidos no Acelerômetro A

Para o eixo longitudinal foi encontrado aceleração máxima de 1.54g e para o transversal 1.57 g.

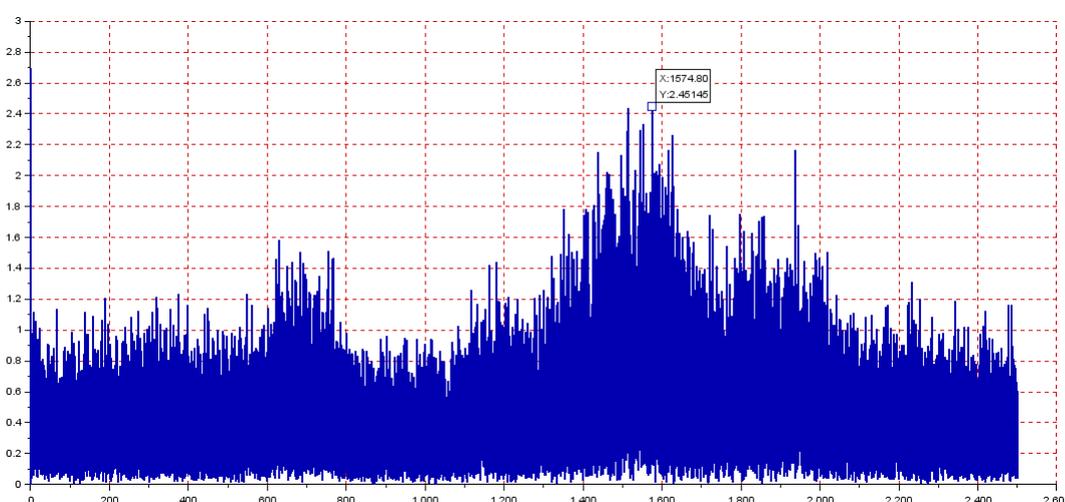


Figura 26 – Eixo vertical B, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.

Os valores obtidos estão na tabela 7 e é composto pelas medições, valor contínuo de sinal de aceleração (dentro dos padrões aceitáveis, entre 0,5 e 1,0), a maior amplitude encontrada (desconsideramos o primeiro valor, pois ele não se encaixa no padrão do experimento), a variação de velocidade para a maior amplitude e a duração da maior aceleração.

Acelerômetro B	Valores
Medições	80499
Valor Contínuo de Aceleração	0,99g
Maior amplitude encontrada	2,70g
Variação de Velocidade para Maior Amplitude	0,04 m/s
Duração da Aceleração	0,00032 ms

Tabela 7 – Valores Obtidos no Acelerômetro B

Para o eixo longitudinal foi encontrado aceleração máxima de 1,52g e para o transversal 1,98g.

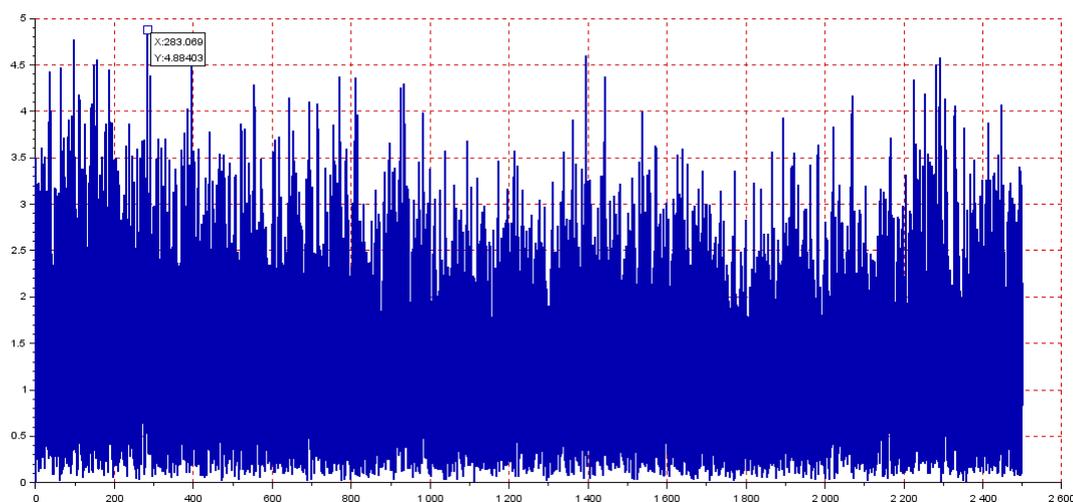


Figura 27 – Eixo vertical C, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.

Os valores obtidos estão na tabela 8 e é composto pelas medições, valor contínuo de sinal de aceleração (dentro dos padrões aceitáveis, entre 0,5 e 1,0), a maior amplitude encontrada, a variação de velocidade para a maior amplitude e a duração da maior aceleração.

Acelerômetro C	Valores
Medições	80899
Valor Contínuo de Aceleração	1,00g
Maior amplitude encontrada	4,89g
Varição de Velocidade para Maior Amplitude	2,25m/s
Duração da Aceleração	0,0018ms

Tabela 8 – Valores Obtidos no Acelerômetro C

Para o eixo longitudinal foi encontrado aceleração máxima de 2,98g e para o transversal 5,38g com variação de velocidade para a maior amplitude de 0,178 m/s.

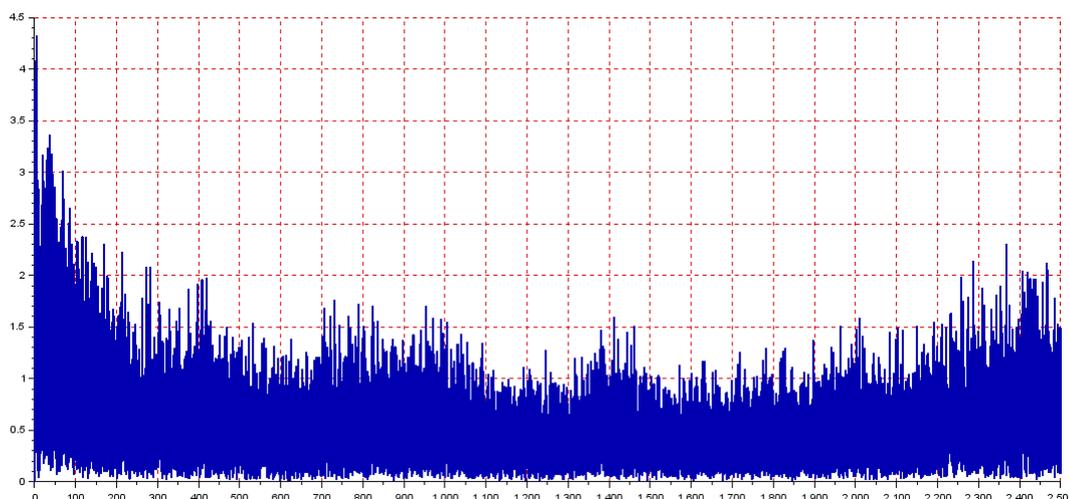


Figura 28 – Eixo vertical D, Aceleração x Frequência. Fonte: Arquivo Pessoal.

Os valores obtidos estão na tabela 9 e é composto pelas medições, valor contínuo de sinal de aceleração (dentro dos padrões aceitáveis, entre 0,5 e 1,0), a maior amplitude encontrada (desconsideramos o primeiro valor, pois ele não se encaixa no padrão do experimento), a variação de velocidade para a maior amplitude e a duração da maior aceleração.

Acelerômetro D	Valores
Medições	80742
Valor Contínuo de Aceleração	0,98g
Maior amplitude encontrada	4,33g
Varição de Velocidade para Maior Amplitude	7,57 m/s
Duração da Aceleração	0,014 ms

Tabela 9 – Valores Obtidos no Acelerômetro D

Para o eixo longitudinal foi encontrado aceleração máxima de 0,74g e para o transversal 2,30g.

A pá utilizada no teste foi submetida à inspeção visual e ultrassom na região do apoio de ponta antes e depois da realização do teste rodoviário. Logo foi comprovado que o ensaio não introduziu nenhum dano as regiões de apoio da pá.

Na tabela 10 estão contidos os dados comparativos entre todos os 4 acelerômetros mostrando a velocidade da aceleração máxima, os valores de aceleração obtidos em cada eixo, a variação de velocidade para maior amplitude, o número de medições, duração das acelerações máximas e valores contínuos de aceleração.

Dados	Acelerômetro A	Acelerômetro B	Acelerômetro C	Acelerômetro D
Velocidade da Aceleração Máxima	61,7 km/h	41,7 km/h	53,1 km/h	62,1 km/h
Eixo Vertical	2,29g	2,70g	4,90g	4,33g
Eixo Longitudinal	1,55g	1,52g	2,98g	0,74g
Eixo Transversal	1,57g	1,98g	5,38g	2,30g
Varição de Velocidade para a Maior Amplitude	0,06 m/s	0,04 m/s	2,25 m/s	7,57 m/s
Valor Contínuo de Aceleração	0,90g	0,99g	1,00g	0,98g
Duração da Aceleração	0,00003 ms	0,00003 ms	0,0018 ms	0,0143ms
Medições Consideradas	80329	80499	80899	80742

Tabela 10 – Comparativo entre os valores obtidos entre os 4 acelerômetros.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada que configuração testada apresentou-se estável durante as manobras e também no teste na rodovia, os valores já adaptados em experimentos de transporte de transformadores por rodovias apresentaram valores críticos de aceleração e variação de velocidade iguais a, respectivamente, 6g e 0,94m/s. Como foi adotado o mesmo critério para as pás eólicas, durante a FFT (Transformada rápida de Fourier) não houve valores que ultrapassaram os valores críticos acima mencionados.

Mesmo com alguns acelerômetros registrando variações de velocidade no ponto de aceleração máxima acima do limite crítico (0,94m/s), como a aceleração se manteve abaixo de 6g, não houve dano à peça. Nos acelerômetros A e B, localizados mais próximos ao condutor da carreta, houve variações menores de aceleração (1,57g e 1,98g, respectivamente), então, como conclusão, a peça permaneceu segura e não passou por grandes atritos. Nos acelerômetros C e D, localizados próximos a ponta da pá, quando submetidos à grandes velocidades de aceleração pelo motorista (53,1 km/h e 62,1 km/h), resultaram em um aumento acentuado da variação de velocidade e, também, aumento da amplitude de aceleração.

Os valores levados em consideração dentro de uma rodovia para uma carga especial (acelerações entre 0,5 e 1g com variações de frequência entre 3 a 350 Hz) foram contemplados, o que validou o teste e seus resultados. Os pontos de escolha para acoplar os acelerômetros tiveram como base o estudo de fragilidade da peça e foram selecionados a partir disso, também validando o experimento.

Como conclusão para o teste, a aplicação dos acelerômetros conseguiu mostrar com uma rapidez muito maior e menor custo o real estado de conservação da peça do que o caso de deslocar uma equipe especializada com ultrassom para o parque eólico realizar inspeção visual e por ultrassom. O maior uso dos medidores de vibração consegue otimizar a montagem dos aerogeradores e resulta em menor prejuízo por tempo parado para o fabricante. A rodovia usada para o experimento não possuía condições graves de conservação, porém, se o experimento fosse aplicado a rotas mais desgastadas pelo tempo, o resultado poderia acusar danos à pá. A transformada de Fourier se mostrou como uma ferramenta fundamental para a aplicação no experimento, fazendo com que a conclusão sobre o estado de conservação da peça coincidissem com o ultrassom.

Como trabalhos futuros, podem ser elaborados testes em tempo real dos acelerômetros, sem usar a memória interna dos mesmos, o que faria com que os dados fossem lidos em um computador simultaneamente com o registro do impacto sofrido pela peça. Com isso, seria possível saber o ponto exato da estrada que necessita maior cuidado do planejador da rota e do motorista, podendo ser elaborado um GPS que indica locais de risco ao veículo e evitaria

acidentes. Também será possível utilizar o presente trabalho como modelo para análises mais robustas utilizando outros teoremas para a avaliação de impactos e comparando com os valores apresentados pela Transformada de Fourier, validando ainda mais o uso de acelerômetros no transporte de cargas especiais.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 1. ed. Brasília: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 17, 20 e 21.
- BACCHIERI G., B. A. J. D. *Acidentes de trânsito no Brasil de 1998 a 2010: Muitas mudanças e poucos resultados*. Revista Saúde Pública, v.45, n.5, p.949-963, 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.org/pdf/rsp/2011.v45n5/949-963/pt>>. Acesso em: 26 jan. 2020.>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado na página 26.
- BADGER J. DAVIS, N. D. R. e. a. *GLOBAL WIND ATLAS, Mean Wind Speed Map, Brazil*. [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://globalwindatlas.info/>>. Acesso em: 27th July 2020. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 22.
- BALLESTRIN.R BENDER.R, B. e. M. *Low cost wireless sensor network for vibration detection*. Fortaleza: 2nd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), 2017. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- BEANAIR. *BeanDeviceRWilowR AX-3D*. [s.n.], 2019. Disponível em: <<https://www.beanair.com/wifivibration-velocity-sensor-mqtt-and-iot-ready-overview.html>>. Acesso em: 26 jan. 2020. Citado 5 vezes nas páginas 10, 30, 31, 38 e 41.
- BRÜEL.KJÆR. *Measuring Vibration*. Nærum, Denmark: [s.n.], 1982. Citado 5 vezes nas páginas 10, 32, 33, 34 e 35.
- CBEE. *Centro Brasileiro de Energia Eólica*. [s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.eolica.com.br>>. Acesso em: 17th April 2020. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- CHESF-BRASCEP. *Fontes Energéticas Brasileiras*. 1. ed. Rio de Janeiro: Inventário/Tecnologia. Energia Eólica, 1987. De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- CNT. *Brasil tem apenas 12,3% da malha rodoviária com pavimento*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/brasil-tem-apenas-12-da-malha-rodoviaria-compavimento>>. Acesso em: 18 jan. 2020. Citado na página 26.
- CRESESB. *História da Energia Eólica e suas utilizações*. [s.n.], 2017. Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 17th April 2020. Citado 4 vezes nas páginas 10, 17, 18 e 19.
- FIGUEIREDO K. F.; FLEURY, P. F. W. P. *Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos*. 1. ed. Sao Paulo: [s.n.], 2003. Citado na página 23.
- FRIGO M. E JOHNSON, S. *he Design and Implementation of FFTW3*. [S.l.]: Proc. IEEE. Vol 93(2).p. 216–231, 2005. Citado na página 36.
- GOTSFRIEDT G.P. CUNHA, J. e. F. J. *Transporte de pás eólicas, um desafio rodoviário*. Santos: Anais do II Encontro Científico de Gestão Portuária: Redes de Empresas e Cadeias Produtivas, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.

LIU J. WANG, P. e. T. X. *Vibration displacement measurement based on three axes accelerometer*. Jinan: in Chinese Automation Congress (CAC) pp. 2374-2378., 2017. Citado 5 vezes nas páginas 10, 36, 37, 38 e 40.

MADSEN, B. *International Wind Energy Development World Market*. Dinamarca: BTM Consult, 2000. Citado na página 20.

MORELLI, F. S. *Panorama Geral da Energia Eólica no Brasil*. São Carlos: Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 22.

PEREIRA, M. *Acelerômetros*. Jaraguá do Sul: Anuário da Produção Acadêmica Docente.Faculdade Anhanguera de Jaraguá do Sul, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 10, 27 e 29.

RIBEIRO M, C. S. e. D. S. C. V. *A QUALIDADE DA MALHA RODOVIÁRIA NO BRASIL E EM GOIÁS*. Goiás: formação de Praças do Comando da Academia da Polícia Militar de Goiás, 2018. Citado na página 26.

SCIENTIFIC.AMERICA. *Mr. Brush's Windmill Dynamo*. 63. ed. [S.l.]: n. 25 cover and p. 389, 1890. Citado na página 19.

SENSEBIG. *TRANSFORMER SHIPPING HANDBOOK*. Unitech Arcadia, South City 2, Sector 49 Gurgaon, 122018, India.: .Volume 1,Issue 1.204, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 10, 11, 35, 42 e 43.

SEQUEIRA.C.D. *Sensores para medições de Vibrações Mecânicas – Acelerômetros*. [S.l.]: Acelerômetros. Revista Manutenção. 116, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 29.

SHEPHERD, D. *Historical Development of the Windmill*. 1. ed. New York: SPERA, S.A, 1994. In *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*. Citado na página 17.

SHOJI, D. V. *Aplicação do AHP em um caso de escolha dos modais de transporte para a movimentação das partes de um aerogerador*. Guaratinguetá: 54 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Produção Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 26 e 27.

TECMUNDO. *Lâmina de turbina eólica de 83 metros é transportada por caminhões*. [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/energia-eolica/53969-lamina-de-turbina-eolica-de-83-metros-e-transportada-por-caminhoes.htm>>. Acesso em: 22/05/2020. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 25.

WWEA. *Wind Energy International 2007-2008*. New Delhi, India: World Wind Energy Association, 2009. Citado na página 21.