

Sistema de Aquisição de Dados de Vibrações Mecânicas para Aerogeradores de Pequeno Porte

Guilherme Ricardo Hübner
Engenharia de Controle e Automação
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
guihubner95@gmail.com

Carlos Edurado de Souza
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
carlos.souza@ufsm.br

Claiton Moro Franchi
Humberto Pinheiro
Departamento de Processamento de Energia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
claiton.franchi@gmail.com
humberto.ctlab.ufsm.br@gmail.com

Resumo— Este trabalho relata o projeto de um sistema de aquisição de dados de vibrações mecânicas em aerogeradores. A produção de energia eólica tem crescido nos últimos anos e, sistemas capazes de proporcionar um aumento na vida útil de sólidos e diminuir o tempo de resposta de manutenção no caso de uma falha estrutural através da observação de frequências características em operação, passaram a desempenhar um importante papel em contexto global. Estudos relacionados a vibrações mecânicas obtiveram destaque na tentativa de prolongar a vida útil de sistemas mecânicos em geral, desempenhando esse papel através do monitoramento da resposta de uma estrutura mediante a aplicações de forças externas e em manutenções preditivas. Encontra-se hoje no mercado, dispositivos capazes de realizar medições de vibrações mecânicas, porém, grande parte deles possui custos elevados. Objetiva-se o trabalho, a elaboração de um sistema capaz de realizar medições de vibrações, fornecendo dados confiáveis e de baixo custo.

Palavras-Chaves— Aerogeradores, Baixo Custo, Sistema de Aquisição, Vibração Mecânica.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento da geração de energia eólica, estudos que possibilitem a melhora no desempenho de um aerogerador começaram a ser incentivados por empresas cujo interesse poderia render minimizações de custos e obtenção de uma prolongação na vida útil do aerogerador. Os aerogeradores atualmente comercializados são constituídos por um rotor de três pás esbeltas conectadas por um eixo ao sistema de geração localizado na parte superior da torre. A torre é sustentada pela fundação, que é a única obra civil envolvida na montagem de um aerogerador. Tanto as pás, quanto a torre e carcaça da turbina, são construídas empregando-se materiais compósitos capazes de resistir as solicitações típicas de estruturas aerodinâmicas.

Paradas no funcionamento de um aerogerador para reparos, por exemplo, acarretam em grandes prejuízos. Para tanto, existe a necessidade de otimizar as estratégias de manutenção de forma a maximizar o retorno em investimentos nos parques eólicos [1]. Pode-se observar conforme os resultados obtidos por [2] e [3] a relação direta entre o desempenho de aerogeradores e a otimização dos lucros com

base apenas em estudos e observações do comportamento vibracional do mesmo.

Conforme [4], a maior parte do corpo de pesquisas relacionadas a vibrações mecânicas de aerogeradores são referentes a modelos matemáticos com várias limitações e ideias das quais não refletem a realidade, necessitando uma abordagem prática mais próxima da real. A carência de sistemas que realizam a aquisição de dados das frequências de vibrações das turbinas eólicas tende a valorizar o estudo em relação ao tema do trabalho escolhido. Dessa forma é proposto um sistema que, além de validar modelos experimentais matemáticos dos quais descrevem o comportamento de uma torre eólica mediante a esforços harmônicos, possa ser utilizado também como instrumento de manutenções preditivas da torre eólica.

Objetiva-se com isso, desenvolver um sistema de aquisição de dados de vibrações mecânicas, capaz de realizar medições em uma faixa de frequências de interesse para aerogeradores de pequeno porte. Construir um protótipo e comprovar seu bom funcionamento através de ensaios, dos quais serão realizados em laboratórios com equipamentos próprios para a aplicação e posteriormente, a realização de medições em aerogeradores de pequeno porte.

II. DEFINIÇÕES DE PROJETO

O ponto de partida para o desenvolvimento do sistema de vibrações mecânicas diz respeito a compreensão das características das principais frequências de vibrações de um aerogerador de pequeno porte. Essa análise foi realizada com base nos resultados obtidos por [1]. A partir dessa etapa, estabeleceu-se alguns parâmetros de projeto, dos quais foram essenciais para a definição dos componentes a serem utilizados e a arquitetura do sistema. A Tabela 1 apresenta esses parâmetros. As subseções seguintes sabordará ps principais components utilizados para o desenvolvimento do projeto.

Tabela 1-Parâmetros de Projeto.

Parâmetros de Projetos	
Faixa de Frequência de Interesse	0,5-60 Hz
Resolução	1/8 Hz
Frequência de Amostragem	128 Hz
Período de Amostragem	8 segundos

A. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema e as ligações entre os principais componentes podem ser visualizados na Figura 1-a). Almejava-se que a placa de aquisição de dados operasse de maneira autônoma ao aerogerador, sendo este alimentado por um conjunto de baterias.

As baterias são carregadas com o auxílio de um painel fotovoltaico. O controle de fluxo de energia do painel fotovoltaico e das baterias serão realizados por um controlador de carga. O sistema de aquisição de dados é fixado em meio a torre e possui dois pares de acelerômetros responsáveis pelas leituras de sinais de vibrações em alturas distintas e em eixos perpendiculares entre si, conforme pode-se visualizar na Figura 1-b).

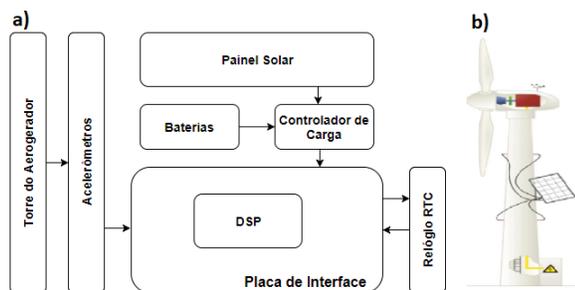


Figura 1-a) Arquitetura do Sistema b) Fixação do Sistema na Torre do Aerogerador.

B. Acelerômetros

Para o presente projeto, foram utilizados acelerômetros ICP®, dos quais, necessitam de uma fonte de alimentação de corrente constante para garantir o funcionamento adequado. Esses sensores requerem um circuito de excitação que consiste em uma fonte de tensão regulada de 18 a 30 Vcc, um diodo de corrente constante (DCC) de 2 a 10 mA e um capacitor de desacoplamento de 10 a 30 μ F responsável por retirar o nível CC do sinal [5].

C. Placa de Interface

Em função dos acelerômetros utilizados necessitarem um circuito de alimentação com corrente constante, por haver um segundo circuito responsável pelo tratamento do sinal resposta emitido pelos acelerômetros, adequando-os aos níveis de tensão do DSP utilizado e pela necessidade da alimentação dos demais componentes, fez-se necessário o desenvolvimento de uma placa de interface conforme ilustrada pela Figura 2.

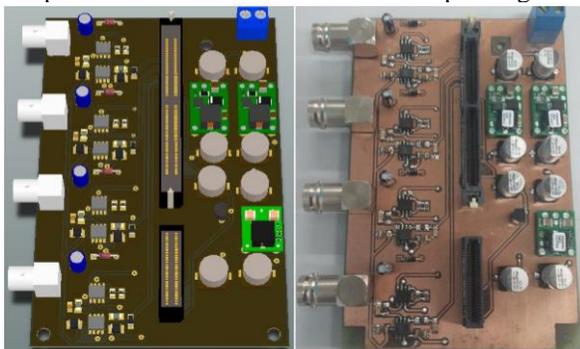


Figura 2- Placa de Interface [7].

D. DSP Concerto F28M36x

O dispositivo DSP Concerto F28M36x é o responsável pela aquisição e digitalização dos dados de estados (vibrações mecânicas) dos acelerômetros, realizar os cálculos necessários para a transformação dos sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência (Fast Fourier Transform – FFT) e por graver os resultados em um cartão SD. Este dispositivo possui dois processadores encapsulados em um mesmo chip, com subsistemas de comunicação e controle independentes.

O núcleo dedicado ao sistema de comunicação é baseado na CPU 32-bit ARM Cortex-M3 que oferece inúmeros periféricos de comunicação. Já o núcleo de controle é baseado na CPU de ponto flutuante de 32-bit C28x TMSF28335 que fornece os periféricos de controle, como *Enhanced Pulse-Width Modulator* (ePWM) com proteção de falhas [6].

O núcleo do C28x é responsável pelas aplicações de controle. Como a aquisição de dados é um processo importante para o projeto, foi designado ao processador essa tarefa. O microcontrolador Cortex-M3 é responsável por realizar o cálculo da FFT a partir dos dados recebidos do processador C28x e gravar o resultado no cartão de memória SD. Para realizar essa atividade, uma tarefa (thread) foi criada no sistema operacional tempo real (TIRTOS) [7].

O cálculo da FFT das medidas de vibrações, foi realizado através do algoritmo four1 [8], implementado em uma função externa a tarefa principal. O resultado obtido pelo sistema é gravado em um arquivo *comma-separated values* (CSV), o qual armazena os dados de forma tabelada permitindo tratar esses dados em diversos softwares [7].

Esse processo de gravação é realizado cada vez em que o cálculo da FFT é finalizado, isto é, ocorre de acordo com a frequência de amostragem escolhida. O módulo *SharedMemory* foi utilizado neste trabalho para a comunicação entre os processadores mencionados.

E. Relógio RTC

Em função do sistema de aquisição de dados gravar informações de frequências de vibrações de um aerogerador em um período de tempo decorrente, faz-se necessária a obtenção do instante de tempo em que tais eventos aconteceram, possibilitando então, a comparação de dados de diferentes grandezas nos momentos de tempos equivalentes. Para tal observação, anexou-se ao sistema, um dispositivo responsável por fornecer esse tipo de informação, comunicando-se via protocolo I2C com o microcontrolador utilizado.

F. Sistema de Geração e Armazenamento de Energia

O sistema de geração e armazenamento de energia é composto por um painel fotovoltaico, um controlador de carga e baterias. O intuito é fornecer energia ao sistema de forma independente da rede ligada ao aerogerador.

III. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o sistema desenvolvido, a etapa seguinte consistiu na realização de testes de validação do sistema e posterior medições de vibrações.

A. Teste de Validação do Sistema

Com o intuito de validar o sistema, foi realizado um teste no Laboratório de Ensaio da Engenharia Acústica na Universidade Federal de Santa Maria. Nesse ensaio, emitiu-se um sinal de vibração sobre o sistema projetado, os resultados obtidos por este, devem ser semelhantes aos resultados obtido através da leitura de um acelerômetro próprio da bancada. O teste será validado se ambos os acelerômetros, (sistema projetado e da própria bancada da acústica), fornecerem os mesmos resultados.

Com o auxílio de um excitador modal, aplicou-se um sinal de vibração com amplitude e frequência conhecidas. As confirmações das características do sinal são obtidas a partir da leitura de um acelerômetro da própria bancada. Na Figura 3 pode-se observar o esquema de ligações da bancada de testes com os equipamentos da Brüel & Kjaer. A Figura 4 ilustra os resultados gráficos obtidos com esse mesmo equipamento, onde o gráfico superior está no domínio da frequência e o gráfico inferior no domínio do tempo.



Figura 3-Esquema de Ligações da Bancada de Testes com os Equipamentos da Brüel & Kjaer.

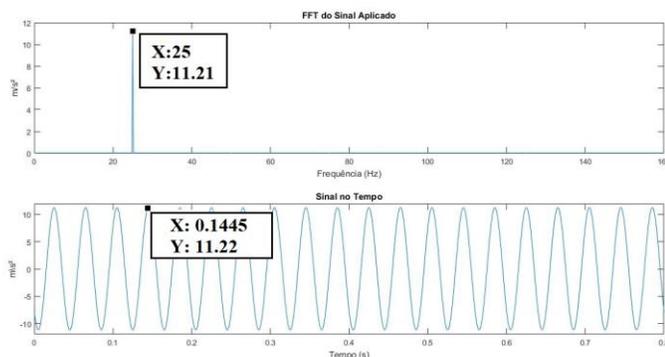


Figura 4-Resultados Gráficos Obtidos com os Equipamentos da Brüel & Kjaer.

Conforme pode ser observado na Figura 4, o sinal aplicado possui frequência de 25 Hz e amplitude de 11.2 m/s².

Após o conhecimento das características descritas do sinal aplicado, montou-se a bancada de testes de forma que o sistema de aquisição de dados projetado realizasse as leituras do sinal de vibração produzido pelo *Modal Exciter*, sendo aplicado a ele o mesmo sinal descrito anteriormente. Pode-se observar na Figura 5 o esquema de ligação da bancada de testes, porém dessa vez incluindo o sistema desenvolvido. A Figura 6 fornece informações gráficas dos resultados obtidos, onde novamente o gráfico superior está no domínio da frequência e o gráfico inferior no domínio do tempo.

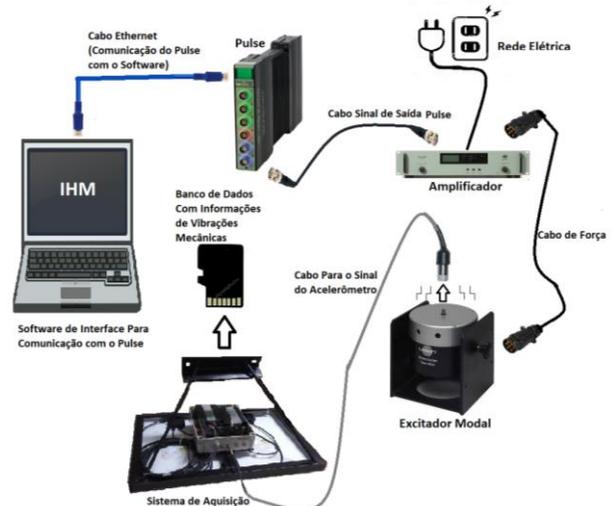


Figura 5-Esquema de Ligações da Bancada de Testes com o Sistema Desenvolvido.

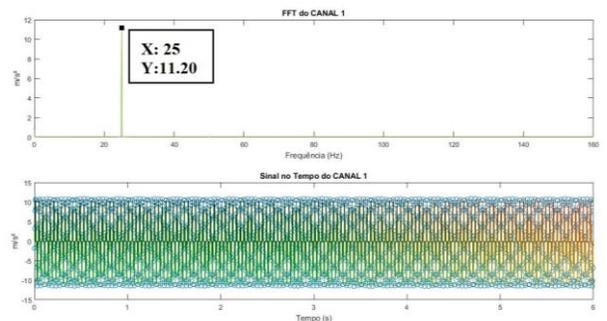


Figura 6-Resultado Gráfico Obtido com o Sistema Desenvolvido.

Conforme pode ser observado, os sinais obtidos com ambos medidores de vibrações são muito semelhantes em frequência e amplitude.

Por fim, o mesmo procedimento descrito anteriormente foi realizado aplicando um sinal *sweep*. A Figura 7 realiza um comparativo entre as FFTs do sistema projetado, representado pela cor azul, e o sistema da bancada do laboratório representado pela cor roxa. É importante lembrar que o espectro de frequência de interesse é até 60 Hz. A Figura 8 ilustra o percentual de erro relativo entre as curvas das FFTs.

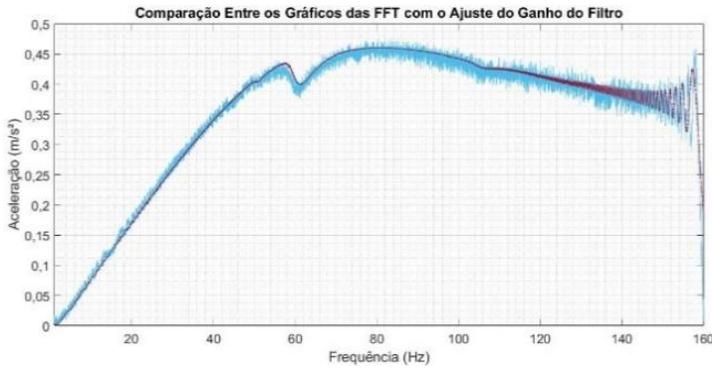


Figura 7-Comparação dos Gráficos Obtidos com os Medidores de Vibrações no Domínio da Frequência.

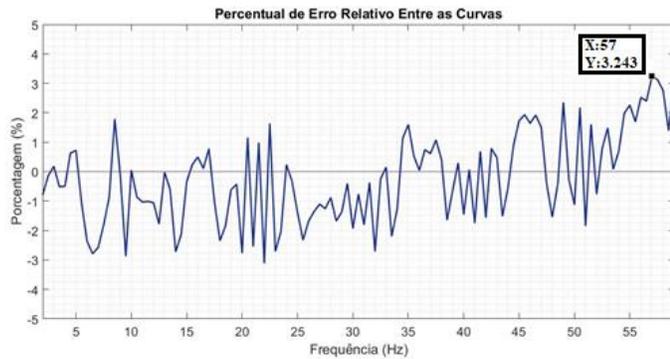


Figura 8-Percentual de Erro Relativo entre as Curvas das FFTs.

Conforme pode-se observar na Figura 7 e na Figura 8, ambas as curvas das FFTs são muito semelhantes, possuindo um erro relativo máximo de 3,2% em até 60 Hz. Parte desse erro é devido ao ruído da placa de aquisição de dados desenvolvida. Valida-se assim o sistema de medição de vibrações desenvolvido.

Faz-se de grande importância destacar que a queda do sinal próximo aos 60 Hz foi causada pelo aparelho de vibração, não havendo alguma relação com os sistemas de medições.

B. Medição de Vibrações em Aerogerador de Pequeno Porte de Eixo Horizontal

Com o sistema de medições de vibrações validado, o próximo passo consistiu em realizar medições de vibrações em um aerogerador de pequeno porte localizado na cidade de Rio Grande. As medições têm como objetivo verificar o comportamento do sistema mediante a situações reais de sua aplicação.

O sistema foi instalado em meio a torre do aerogerador, do qual um par de acelerômetros foi fixado em uma altura de 3,40 metros e outro par em aproximadamente 5,80 metros de altura. A Figura 9 ilustra o sistema instalado na torre do aerogerador.



Figura 9-Medição em Torre de Aerogerador de Eixo Horizontal.

Na Figura 10 pode-se observar os resultados gráficos obtidos em um dado momento qualquer da medição. Entre as principais frequências encontradas estão as vibrações em 4,625 Hz, 12,13 Hz e 19,5 Hz. Pode-se concluir que essas são algumas das frequências naturais do aerogerador.

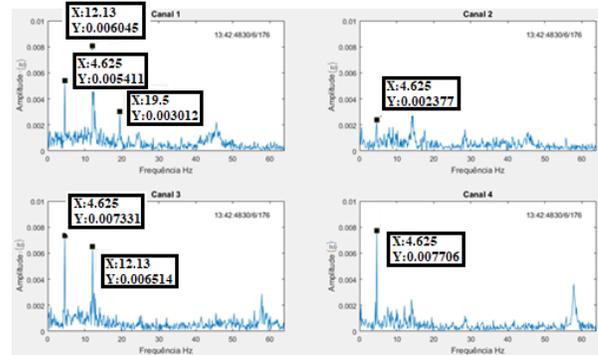


Figura 10-Resultado Gráfico das Medições de Vibração do Aerogerador de Eixo Horizontal.

C. Medição de Vibrações em Aerogerador de Pequeno Porte de Eixo Vertical

Para o aerogerador de eixo vertical, foi realizada uma análise modal por [9] com o intuito de conhecer as frequências e formas modais de vibrações do mesmo. A Figura 11 ilustra um modelo numérico simplificado da estrutura do aerogerador. A Tabela 2 informa as frequências de vibrações do aerogerador e seus modos.

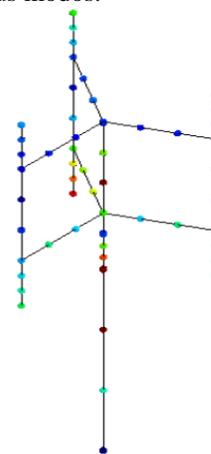


Figura 11-Modelo em Elementos Finitos do Aerogerador [9].

Tabela 2-Frequências Naturais de Vibrações do Aerogerador [9].

Modo	Frequências (Hz)
1	2,336652
2	2,507946
3	2,514984
4	6,882273
5	7,053142
6	10,72429
7	11,69172
8	11,81035
9	18,75708
10	19,46605
11	27,5878
12	28,83956
13	29,2201
14	43,94933
15	49,23017
16	51,53764
17	59,08208
18	61,1127
19	61,20063

Conforme [9], os modos de vibrações cujas frequências aparecem em grupos de três, possivelmente pertencem aos modos de vibrações das pás. Os modos de vibrações do aerogerador são referentes as duplas de frequências.

Havendo conhecimento em relação as características de vibrações do aerogerador, iniciou-se uma série de adaptações do sistema, para que o mesmo pudesse realizar as medições com condições apropriadas. Em função da conclusão obtida por [2] a respeito das torres cônicas, que devido suas configurações, atenuam as vibrações em um curto período de tempo se comparado a torres cilíndricas e que a carga é menor quando a torre da turbina eólica é mais baixa. Optou-se por realizar algumas modificações no sistema, com o intuito de analisar melhor os resultados.

Para o caso específico dos testes realizados com o aerogerador de eixo vertical, usou-se uma frequência de amostragem de 320Hz, dos quais foram gravados em um cartão SD no domínio do tempo e em um período contínuo. A Figura 12 ilustra os acelerômetros fixados ao aerogerador.



Figura 12-Sistema Fixado a Torre do Aerogerador de Eixo Vertical.

Com o intuito de analisar melhor os resultados obtidos, realizou-se uma estimativa de densidade de espectro de energia cruzada com o auxílio da função CPSD do *Matlab*.

Essa função é responsável por realizar o janelamento de dois canais distintos do sistema projetado, estando esses no domínio do tempo, em seguida realizar uma correlação entre esses sinais e por fim, passar essa relação para o domínio da frequência. Essa operação ajuda a reduzir significativamente os ruídos de medida. A Figura 13 ilustra os resultados obtidos da densidade de espectro de energia cruzada relativo aos dados de vibrações do aerogerador de eixo vertical. Ressalta-se que os picos obtidos e visualizados na Figura, foram observados em todos os dias de testes, mostrando-se assim a repetibilidade do sistema.

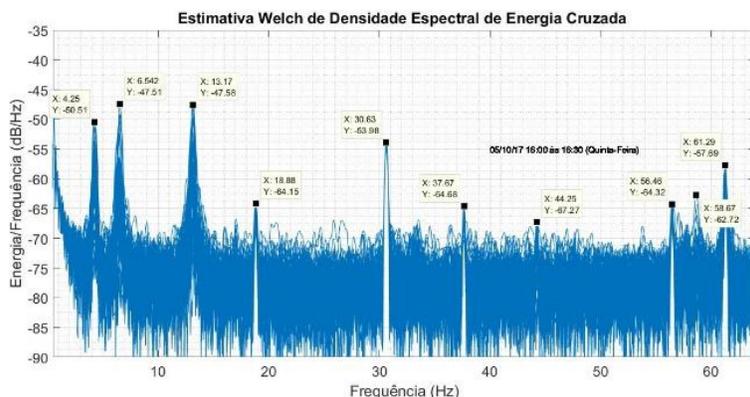


Figura 13-Densidade Espectral de Energia Cruzada das Frequências de Vibrações do Aerogerador.

Com os resultados gráficos obtidos através do espectro de densidade de energia cruzada, pode-se perceber alguns picos mais definidos em certas frequências, as quais não se notavam nitidamente apenas com o auxílio das FFTs. A Tabela 3 ilustra as frequências que foram captadas por diversas vezes pelo sistema.

Tabela 3-Principais Frequências de Vibrações do Aerogerador Obtidas com o Sistema.

Principais Frequências Captadas Pelo Sistema
4,25 Hz
6,5 Hz
13, 25 Hz
18,88 Hz
30,6 Hz
37,67 Hz
44,25 Hz
56,46 Hz
61,3 Hz

Percebe-se coerência entre os resultados de vibrações obtidos pelo sistema de vibrações mecânicas quando comparados com os resultados de [9]. Os modos de vibrações mais baixos do aerogerador foram captados mais facilmente pelo sistema, em função destes modos serem facilmente excitados com as mudanças de velocidade do vento. Faz-se de grande importância ressaltar que os valores de frequências obtidos por [9] foram através de análises simplificadas, sendo os resultados obtidos através do sistema mais próximos da realidade.

IV. ORÇAMENTO

Para fins de comparação, fez-se um orçamento do custo do sistema de aquisição de dados de vibrações mecânicas e comparou-se com um sistema do qual realiza as mesmas medições. A Figura 14 ilustra o produto que se encontra no mercado juntamente de seu valor. A Tabela 4 ilustra o orçamento do sistema projetado. Percebe-se uma diferença de aproximadamente quatro vezes entre os valores dos produtos. A comparação foi realizada apenas com o produto da Figura 14, pois foi o mais semelhante encontrado com as características do sistema desenvolvido em meio comercial.



Figura 14-Medidor de vibrações mecânicas [13].

Tabela 4-Orçamento do Sistema Projetado.

Componente	Quantidade (Un)	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Baterias 5Ah VRLA	2	65	130
DSP F28M36x	1	700	700
Acelerômetro Industrial ICP	4	661,68	2646,72
Cabos para Acelerômetros	4	435,03	1740,12
Painel Solar	1	117,43	117,43
Caixa	1	50	50
Controlador de Carga	1	40	40
Conversor PTN78000N	1	45,19	45,19
Conversor PTN78000A	1	45,19	45,19
Conversor PTH08080W	1	24,85	24,85
Regulador de Tensão LP2950-3	1	3,9	3,9
Resistor	24	0,05	1,2
Capacitor	51	0,45	22,95
Bead	11	0,45	4,95
Amplificador LM6132	4	2,98	11,92
Amplificador AD620	4	5	20
Conector BNC	4	0,99	3,96
Diodo	4	0,17	0,68
Diodo Zener	4	0,11	0,44
Cartão SD	1	20	20
Relógio RTC	1	20	20
Total:			5649,5

V. CONCLUSÃO

Mediante aos testes realizados, conclui-se que o sistema de vibrações desenvolvido se encontra em condições desejadas de operação. Os resultados obtidos comprovam que o sistema de aquisição de dados de vibrações mecânicas é capaz de realizar medições corretas em faixas de frequências para aerogeradores de pequeno porte.

Obteve-se êxito mediante a implantação de um relógio em tempo real, o qual é responsável por fornecer informações cronológicas a cada medição realizada. Esse fator é de grande importância, pois possibilita a comparação de vibrações mecânicas em tempos equivalentes a outros fenômenos ambientais, como intensidade e direção do vento, dos quais podem ser medidos por outros sistemas paralelamente.

Determinou-se também mediante a estudos realizados, fatores fundamentais relacionados a forma de aquisição de dados do sistema para o aerogerador de eixo horizontal e vertical. Definiu-se em função da qualidade do sinal da FFT de resposta, uma frequência de aquisição de dados 5 vezes maior que a frequência de interesse. Em função desse fator, os

cálculos da FFT não poderão ser realizados pelo DSP. Essa consequência diz respeito pela frequência de amostragem não se tratar de um número proporcional à potência 2, sendo assim, serão salvas informações no tempo em um cartão SD.

Por fim, observou-se o comportamento vibracional de um aerogerador de eixo vertical, o qual foi possível comparar com informações de análises modais realizadas por [9] e constatar as frequências naturais normalmente excitadas do sólido.

Para a continuidade do trabalho, sugere-se a realização de métodos e meios dos quais possam reduzir o tamanho e peso do sistema de aquisição de dados, possibilitando uma maior facilidade em seu transporte e fixação. Outro fator a ser estudado é em relação ao DSP utilizado, o qual foi sobre dimensionado em função de sua capacidade de processamento em relação as funções que devem ser desempenhadas por ele.

Em seguida, faz-se possível o estudo e as modificações necessárias para a implantação desse sistema em aerogeradores de dimensões maiores ou até mesmo, para componentes específicos de aerogeradores. Por fim, o sistema de aquisição poderá fornecer a um sistema de supervisão de vibrações mecânicas com acesso remoto, atualizando informações de tempos em tempos. Com isso, o comportamento do aerogerador e demais componentes poderá ser analisado e estudado em instantes próximos das ocorrências dos fenômenos climáticos e ambientais.

Referências bibliográficas

- OLIVEIRA, T. A. **Análise Modal de Estruturas: Abordagem Numérica e Experimental em um Sistema Livre-Livre**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria.
- LARREA, L. R. **Vibration Analysis of a VAWT**. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Técnica de Sofia.
- NGUYEN J. A. **Vibration Study of Vertical Axis Wind Turbine**. 2014. 21º Congresso Internacional de Som e Vibração.
- ZIJUN, Z. **Wind Turbine Vibration Study: A Data Driven**. Trabalho de Conclusão de Mestrado – University of Iowa.
- PCB PIEZOTRONICS. **Introduction to Piezoelectric Accelerometers**. 2016. Disponível em: <https://www.pcb.com/techsupport/tech_accel.aspx> Acesso em: 20 abr. 2017.
- TEXAS INSTRUMENTS. **User's Guide**. 2016. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhd4m/spruhd4m.pdf> Acesso em: 27 abr. 2017.
- SCHÖNE, M. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Medição de Vibrações para uma Torre de Aerogerador**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria.
- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. **Numerical Recipes in C**. Cambridge University Press, 2002.
- CHAGAS, G. **Análise Modal Numérica de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Maria.
- RAO, S. **Vibrações mecânicas**. Pearson Prentice Hall, 2009.
- BRUEL & KJAER. **Products**. Acesso em: <https://www.bksv.com/en/products>. Acessado em: 07 de Maio de 2017.
- HANLY, S. **Vibration Analysis: FFT, PSD and Spectrogram Basics**. 2016. Acessado em: <http://blog.mide.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>. Acesso em: 03 de Maio de 2017.
- INSTRUTEMP. **Medidor de vibrações com 4 canais**. Acesso em: <http://www.instrutemp.com.br/produto/1299/medidor+de+vibracao+com+4+canaisregistrador+de+dados+extech+vb500?dfw_tracker=16646+VB500+&esvt=-&esvq=&esvadt=999999---1&esvcrea=96355275884&esvplace=&esvd=c&esvaid=50117&gclid=CjwKEAjwm7jKBRDE2_H_t8DVxzISJACwS9WbSunk4SjXm45HYNDcO4_5Cj_9V2aAis6trX7SAgTAABoCflZw_wcB>. Acessado em: 23 de Junho de 2017.