

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Lucas Santos (DRE: 118026744)

Pietro Tabachi D'Angelo Furtado (DRE: 118103994)

Tiago Pintor (DRE: 118032355)



UFRJ

Trabalho de Monitoração e Diagnóstico de Máquinas
Profª: Fernando Augusto Noronha Castro Pinto

Rio de Janeiro, 2023

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica tem se destacado como uma fonte renovável de geração de energia elétrica, impulsionando o desenvolvimento e aprimoramento dos aerogeradores. Essas máquinas realizam a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica de forma limpa e sustentável.

No entanto, as pás dos aerogeradores enfrentam diferentes tipos de esforços, incluindo cargas aerodinâmicas, vibrações, impactos de partículas e mudanças de temperatura. Essas condições adversas podem causar danos como fissuras, desgastes, delaminações e sobrecargas, que podem levar a falhas catastróficas se não forem detectadas e corrigidas a tempo. Portanto, é de vital importância implementar sistemas de monitoração eficientes para identificar precocemente esses defeitos e evitar consequências indesejáveis.

2. MÉTODOS DE DETECÇÃO

Atualmente o método mais utilizado para detecção de falhas em pá de aerogeradores ainda é inspeção visual. Porém, algumas outras abordagens estão sendo cada vez mais comumente utilizadas. Uma das formas mais promissoras é instrumentar turbinas eólicas e monitorar a integridade das pás por meio do monitoramento constante de suas vibrações com sensores do tipo acelerômetro. Além disso, utilizam atuadores para excitar o sistema de forma padronizada. A grande vantagem desse método é a notificação quase imediata do surgimento de um defeito, não sendo necessário esperar de 1 - 2 anos, entre uma inspeção visual e outra.

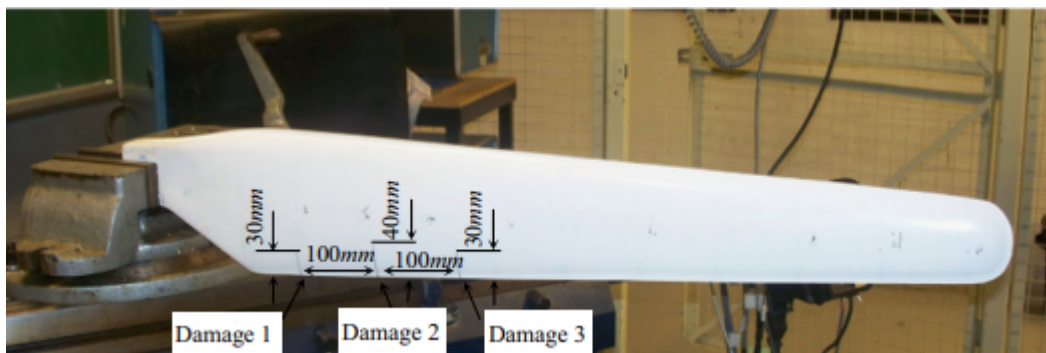


Imagem 1: Montagem experimental da pá engastada na morsa.

Dentre esses métodos, um dos mais utilizados baseia-se na mudança nos parâmetros modais, por exemplo, uma descontinuidade ou defeito quando surgem de maneira expressiva em uma pá, alterando as frequências naturais devido à mudança na massa e, principalmente, na rigidez do equipamento. Dessa forma, alteram suas características oscilatórias e permitem a detecção de um defeito. Contudo, para uma constatação de dano ao equipamento, é necessário realizar uma comparação de valores

entre um estado de referência (pá intacta) e da pá sendo monitorada. Discrepâncias nestes valores podem indicar um defeito.

Na figura abaixo, é possível ver curvas de ganho por frequência de ensaios realizados em uma pá de aerogerador. Os quatro gráficos representam as leituras de diferentes canais de quatro acelerômetros posicionados ao longo de seu comprimento. Esse posicionamento de diversos sensores ao longo do comprimento da pá é um fator importante, visto que o posicionamento dos acelerômetros pode influenciar nas leituras obtidas dos modos de vibração. Cada uma das três curvas dos gráficos representa um estado da pá, sendo a curva R o estado intacto, a curva C um estado com aumento de massa na pá, representando um caso de acúmulo de gelo, que é frequentemente observado nesse tipo de equipamento em operação, e a curva L que representa um caso onde três defeitos foram inseridos na pá em diferentes locais.

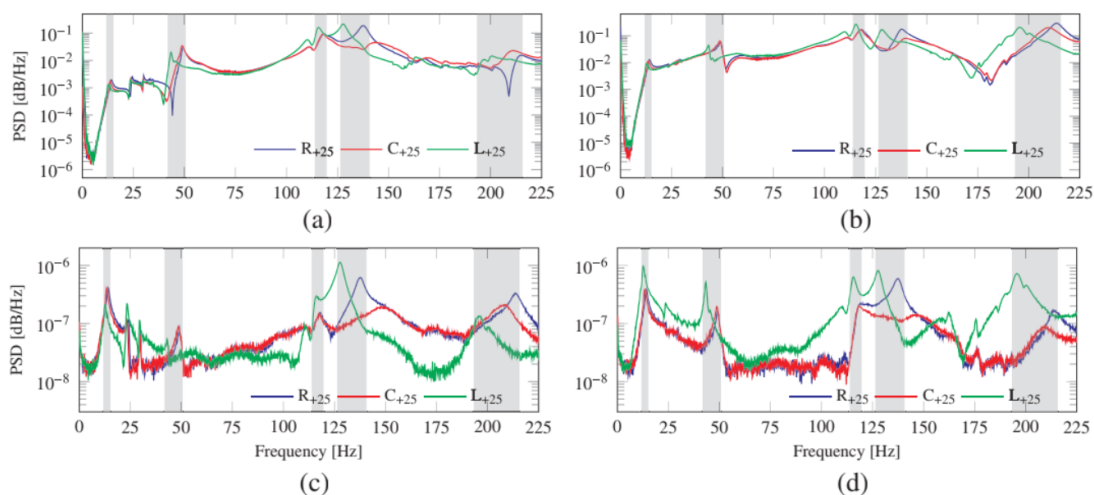


Imagem 2: Gráficos de amplitude de sinal em função da frequência. Fica clara a tendência de diminuição da frequência natural à medida que o dano fica mais severo.

A partir desses gráficos, conseguimos observar como o comportamento oscilatório no domínio da frequência é alterado de acordo com os casos citados anteriormente. É possível verificar que os picos dos casos C e L estão deslocados para a esquerda com relação a curva R (referência). Isso demonstra uma redução nos valores de frequências naturais para os casos que representam danos às pás.

Através de diversos ensaios, é possível determinar valores limites de redução nas frequências naturais para certo modelo de pá eólica, os quais caso sejam ultrapassados, revelam a detecção de um possível defeito.

Entretanto, a avaliação das frequências naturais não é suficiente para que localize o defeito. Para isso, é utilizado o método de análise da diferença de curvatura dos modos de vibração (Mode Shape Difference Curvature - MSDC).

$$\delta_j = \varphi_j^d - \varphi_j^f$$

Através da fórmula acima, podemos comparar, para o j-ésimo modo de vibração, a diferença dos modos da pá com defeito e saudável.

$$K = \kappa_1 \kappa_2$$

Para calcular a curvatura gaussiana, usamos os valores de κ_1 e κ_2 que são os valores máximo e mínimo de curvatura, curvaturas principais para um ponto da pá, sendo a curva obtida pelo plano normal ao eixo Pitch. A partir daí, modelamos os pontos referentes a essa diferença a partir de uma interpolação cúbica

$$y = S(x) \text{ and } S_i(x) = a_i(x-x_i)^3 + b_i(x-x_i)^2 + c_i(x-x_i) + d_i, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}$$

Em que encontramos os 4 coeficientes a partir de das seguintes condições de contorno:

$$y_i = S_i(x_i), \quad y_{i+1} = S(x_{i+1}) \quad (i = 0, 1, \dots, n)$$

$$S'_{i-1}(x_i) = S'_i(x_i), \quad S'_{i-1}(x_i) = S'_i(x_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$S'_0(x_0) = 0, \quad S'_{n-1}(x_n) = 0$$

A curvatura pode ser obtida por:

$$\kappa = \frac{S''}{(1+S'^2)^{(3/2)}}$$

Para pequenas deformações, podemos modelar a curvatura de uma viga por:

$$\kappa_b = \varphi'' = \frac{M}{EI}$$

Assim, é esperado que, ocorrendo um dano na pá, haja diminuição da rigidez à flexão (EI), aumentando a magnitude dessas diferenças nas regiões danificadas, tornando possível sua detecção e estimativa da severidade do dano.

Nesse sentido, [1] propõe o seguinte passo a passo para verificação da presença de falha, sua localização e análise de severidade.

1. Usar FEM para obter frequências naturais, resposta de vibração e modos de vibração das pás.
2. Fazer análise da resposta dinâmica baseado nas cargas aerodinâmicas

3. Fazer atualização do modelo FEM usando a análise experimental para uma viga sadia. Para fazer as frequências coincidirem, o módulo de Young da viga é modificado.
4. Computar frequência natural e modo de vibração para vigas com defeitos por meio de FEM com o modelo atualizado.
5. Comparando as frequências naturais, resposta de deslocamento e modos de vibração detectar a presença de dano e estimar por alto sua localização.. Nos números dos modos em que a frequência natural diminuir, fazemos a diferença dos modos δi referente ao deslocamento modal..
6. Aplicar a interpolação cúbica à superfície do deslocamento dos modos de vibração e calcular a curvatura
7. Detectar as localizações de dano e estimar a severidade baseado nas variação de curvatura.

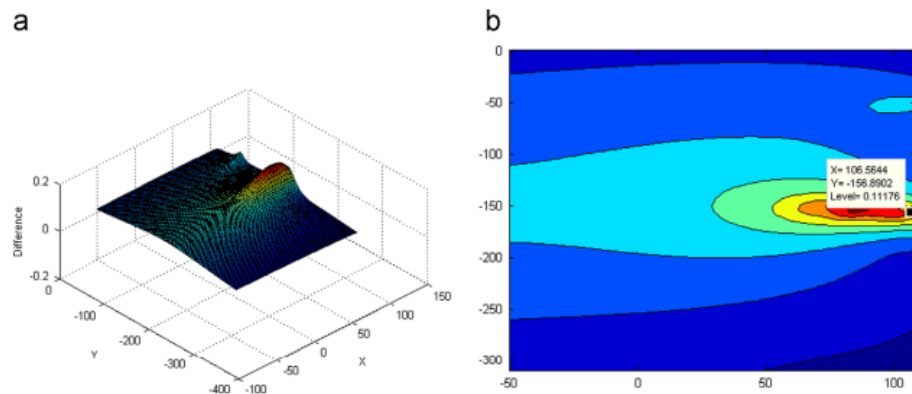


Fig. 7. Detection of two damages: (a) the surface figure of first mode shape difference between the blade with two damages and the intact blade, and (b) the corresponding contour map.

Imagem 3: Detecção do dano a partir da análise da diferença de curvatura do primeiro modo.

Outro método bem difundido é baseado em ondas guiadas, seu funcionamento consiste na geração de ondas de tensão através de um excitador, as quais são capturadas por sensores. Dois tipos de ondas guiadas podem ser utilizadas, as de alta frequência e baixa frequência.

A geração de vibrações com altas frequências são geradas por um excitador piezoelétrico e têm resolução de danos melhor, todavia requer alta densidade de acelerômetros, uma vez que as oscilações de alta frequência decaem rapidamente com a distância de propagação. A utilização de um grande número de acelerômetros adiciona complexidade ao sistema de monitoração da saúde estrutural e influencia negativamente no seu custo, tornando-o menos atrativo para os usuários finais. Por outro lado, a geração de ondas com baixas frequências são geradas a partir de atuadores eletromecânicos e podem

se propagar por distâncias maiores. Uma vez que frequências de ondas menores (na faixa de 1 kHz) sofrem menos perdas de energia ao se propagarem, assim necessitando de menos acelerômetros.

Considerando o tipo de baixa frequência, assim como no caso anterior, para a realização da monitoração e diagnóstico do defeito é necessário realizar medições na pá intacta, para assim, através de métodos estáticos, averiguar se o sinal recebido da pá em operação apresenta ou não defeitos. Por conta disso, o procedimento de medição é realizado em duas etapas: de treinamento e detecção. Durante a fase de treinamento, assume-se que a estrutura está intacta. Coleta-se várias amostras, caracterizando o estado normal sob diferentes regimes de operação e estabelece-se um modelo estatístico do estado normal para cada um. Na fase de detecção, cada amostra recém-adquirida é comparada com o modelo do estado normal. Se for detectado um desvio significativo, declara-se que a pá está danificada.

Essa comparação é feita a partir do vetor de características, lista ordenada da coleção de sinais pré-processados para cada impacto do atuador, o qual representa recursos de entrada para um modelo de machine learning que realiza uma análise. O vetor de características é baseado na covariância cruzada entre todos os pares de séries temporais do sensor. Como a função de covariância cruzada é uma medida de similaridade entre dois sinais, as mudanças no padrão de vibração serão refletidas como uma mudança na matriz de covariância cruzada.

Para cada um dos hits do atuador obtidos no estado sem defeitos, um vetor de características é extraído. A coleção dos vetores característicos é reunida em uma matriz. Esta matriz forma a base para o modelo estatístico da pá no estado referência. Desse modo, quando o atuador atinge a estrutura e uma nova amostra na etapa de detecção chega, a diferença entre a amostra e o modelo estatístico do estado saudável caracteriza a saúde da estrutura. Essa diferença é chamada índice de dano.

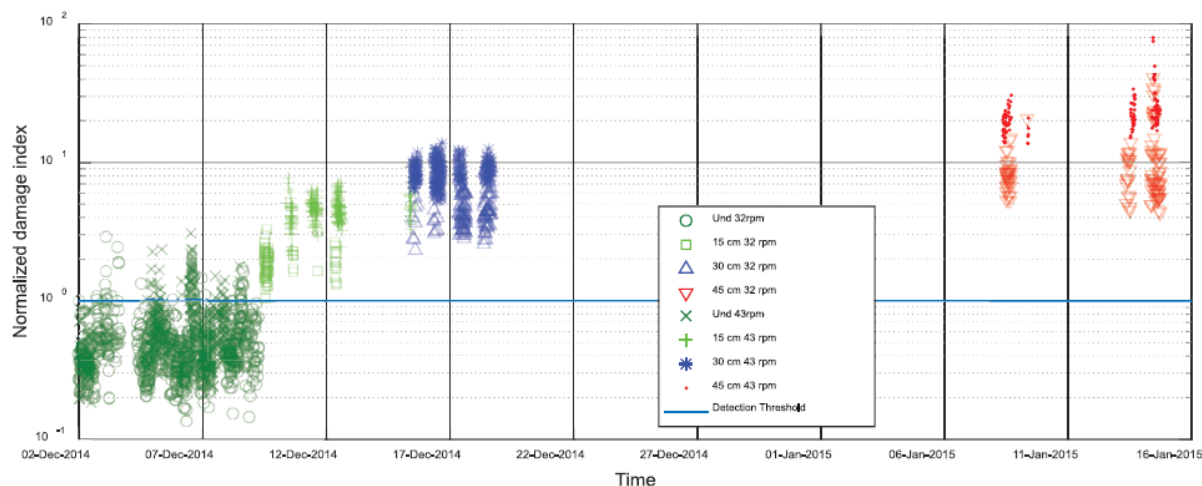


Imagem 4: gráfico do Index normalizado de dano em função do tempo.

Na figura acima, observa-se os valores de índice de danos adquiridos a partir da medição dos sensores ao longo de um período de tempo para um aerogerador operando com velocidades de 32 e 43 rpm. Além da mudança de velocidade, foram utilizados 4 cenários: sem defeito, com defeito de 15, 30 e 45 cm no bordo de fuga da pá (defeito muito comum). A linha limite foi traçada a partir dos dados obtidos na fase de treinamento, aceitando 5% de alarmes falsos, onde as amostras abaixo da linha limite são classificadas como estado saudável, enquanto as amostras acima do limite são declaradas como estado danificado. No exemplo foram obtidos 7,3% de alarmes falsos, valor um pouco acima do esperado, e 100% dos valores defeituosos se encontravam acima da linha limite.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL



Fig. 14. The finite element model of an intact blade.

Imagem 5: Modelagem da pá do aerogerador discretizada através de uma malha em elementos finitos. É mostrado o ponto onde é aplicado o engaste.

Para o modelo computacional, podemos considerar uma pá com secção “oca”, feita de fibra de vidro com FRP (fiber reinforced polymer), sendo o material considerado isotrópico. Como restrição de movimento, é considerado um engaste em uma de suas pontas, negligenciando, portanto, a elasticidade do suporte. Para a malha são considerados elementos de Casca.

Para realizar a atualização do modelo computacional, forçamos as diferenças de frequência naturais serem nulas, a partir da determinação de um módulo de elasticidade para cada frequência.

$$\left| (2\pi f_{Ti})^2 \bar{\mathbf{M}} - E_m^i \frac{\bar{\mathbf{K}}}{E} \right| = 0$$

Table 2

The modified Young's modulus E_m^i .

Mode number i	1	3	4	5
E_m^i (kg/mm ²)	1959	1865	1550	2223

Table 4

Frequencies for different cases obtained by finite element analysis.

Case	f_1 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)	f_5 (Hz)
Intact blade	22.821	89.677	192.58	346
Blade with one damage (damage 1)	22.818	89.671	192.57	345.97
Blade with two damages (damages 1 and 2)	22.775	89.61	192.22	345.46
Blade with three damages (damages 1, 2 and 3)	22.757	89.523	192.07	345.31

Table 5

Frequencies for different cases obtained from experiments.

Case	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Intact blade	22.8	89.4	192	346.8
Blade with one damage (damage 1)	22.2	88.8	190.2	339.6
Blade with two damages (damages 1 and 2)	21.9	88.1	189.6	334.8
Blade with three damages (damages 1, 2 and 3)	21.6	86.4	187.8	331.2

Imagem 6 :Tabelas que comparam módulo de Elasticidade em função da frequência, para a pá sadia, frequência natural em função do estado da pá por elementos finitos e experimentalmente.

Assim, com a atualização do modelo FEM, foi possível obter erros relativos menores que 0.4%.

Podemos também realizar uma análise da resposta dinâmica do sistema. Para isso, dividimos a viga em um número finito de seções, 10, por exemplo, e calculamos as cargas aerodinâmicas de Lift e Drag para cada uma delas por meio de:

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho C_L v_w^2 c_i dr$$

$$dF_D = \frac{1}{2} \rho C_D v_w^2 c_i dr$$

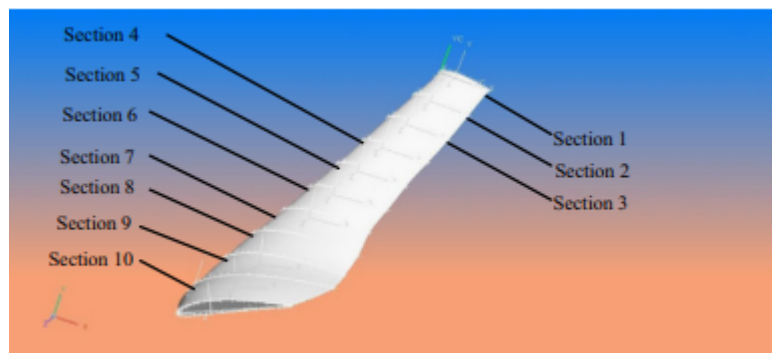


Imagem 7: Imagem que demonstra seccionamento da pá em 10 partes para a utilização da teoria de elementos de pá.

Posteriormente, fazemos uma transformação de base em termos de componentes axial e tangencial:

$$dF_a = dF_L \cos \varphi_i + dF_D \sin \varphi_i$$

$$dF_t = dF_L \sin \varphi_i - dF_D \cos \varphi_i$$

Com isso, podemos utilizar esses valores como entrada no software de elementos finitos e a partir daí, obtemos a resposta do sistema:

Table 9
Response analysis result comparison between the blade with damages and the one without damage.

Location	Blade with damages		Blade without damage		Δf	$\Delta \text{Disp.}$
	f (Hz)	Disp. (mm)	f (Hz)	Disp. (mm)		
1 (node 3082)	47.093	3.153	52.246	2.059	-5.193	1.094
2 (node 2761)	47.093	4.177	52.246	2.821	-5.193	1.356
3 (node 2387)	47.093	3.686	52.246	3.648	-5.193	0.038
4 (node 2047)	47.093	2.536	52.246	3.114	-5.193	-0.578
5 (node 1503)	47.093	1.144	52.246	1.763	-5.193	-0.619
6 (node 1024)	47.093	1.076	52.246	1.347	-5.193	-0.271
6 (node 1024)	71.056	0.963	74.334	0.833	-3.278	0.13

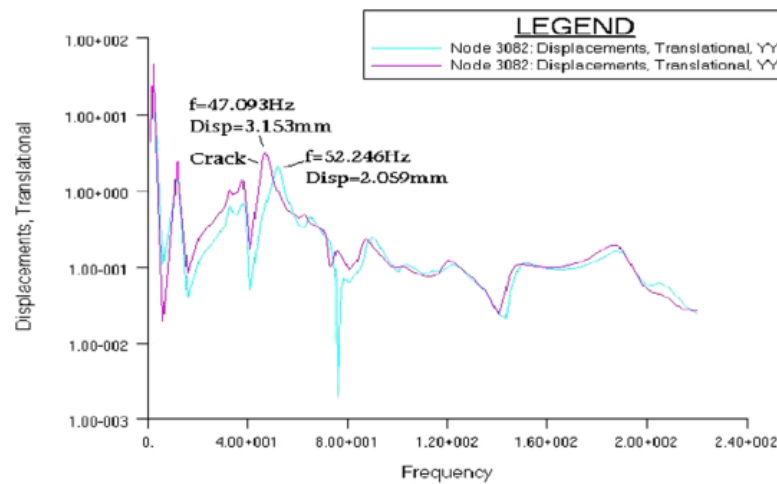


Fig. 17. Displacement magnitude vs. frequency plot at point 1 from dynamic response analysis for the intact blade (blue) and the blade with damages (pink). (For interpretation of the references to color in this figure caption, the reader is referred to the web version of this paper.)

Imagem 8: Frequências naturais com e sem dano e resposta dinâmica do sistema para os mesmos casos.

Podemos, mais uma vez, comparar as diferentes curvaturas e obter as localizações dos danos:

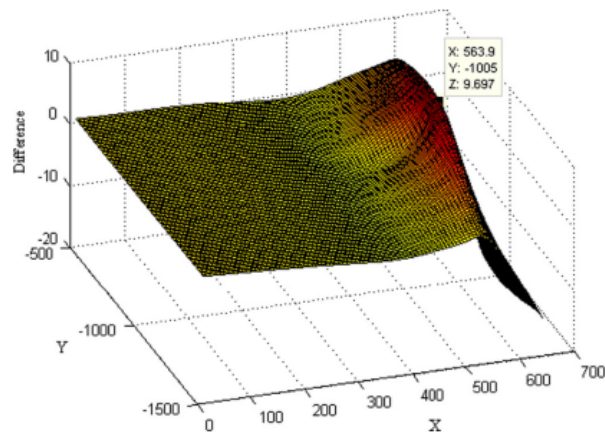


Fig. 19. Surface of the difference in displacement mode shape between the blade with damages and the intact blade (1 crack in location 2).

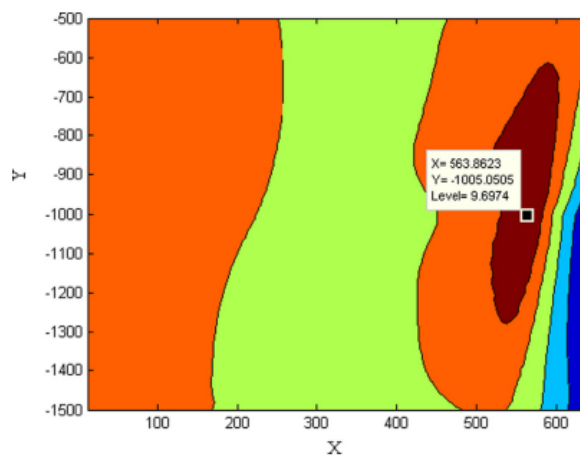


Fig. 20. Contour map of the difference in displacement mode shape between the blade with damages and the intact blade (1 crack at location 2).

Imagem 9:MSDC para a pá analisada a partir da resposta dinâmica.

Conclusão

Conclui-se portanto que há boa base teórica para detecção estática de danos em pás de aerogeradores. O custo dos acelerômetros piezoelétricos e a razão entre erro e sinal permanecem como desafios nesse setor, além da instrumentação da pá em operação para sistemas dinâmicos. Por conta disso, alguns pesquisadores têm utilizado métodos acústicos de detecção associados a Pattern Recognition.

Bibliografia:

[1] Damage detection method for wind turbine blades based on dynamics analysis and mode shape difference curvature information - Yanfeng Wang a,n , Ming Liang a , Jiawei Xiang b.

[2] Vibration-based monitoring of a small-scale wind turbine blade under varying climate conditions. Part I: An experimental benchmark - Yaowen Ou¹ | Konstantinos E. Tatsis¹ | Vasilis K. Dertimanis¹ | Minas D. Spiridonakos² | Eleni N. Chatzi.

[3] Active vibration-based structural health monitoring system for wind turbine blade: Demonstration on an operating Vestas V27 wind turbine - Dmitri Tcherniak and Lasse L Mølgaard.

[4] On damage diagnosis for a wind turbine blade using pattern recognition - N. Dervilis a,n, M. Choi c, S.G. Taylor b, R.J. Barthorpe a, G. Park b,d,C.R. Farrar b, K. Worden a.