

Algoritmo Distribuído para Detecção de Dano em Aerogeradores utilizando Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio*

Érico T. Lemos¹, Igor Leão dos Santos¹, Luci Pirmez¹, Silvana Rossetto¹, Flávia C. Delicato¹, J. Neuman de Souza², Luiz Vaz¹

¹Programa de Pós-Graduação em Informática - Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária – 21.941-901 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

²Universidade Federal do Ceará (UFC) – Ceará – CE – Brasil

{ericotl, igorlsantos, luci.pirmez, silvana.rossetto, fdelicato, neuman.souza}@gmail.com, vaz@peno.coppe.ufrj.br

Resumo. Neste artigo é proposto um algoritmo distribuído para monitoramento de aerogeradores utilizando rede de atuadores e sensores sem fio (RASSF). Sua principal contribuição é a proposta de uma solução com descentralização total da decisão quanto à presença do dano, mantendo o processamento na RASSF. Para identificação do dano é utilizada a análise da frequência modal sob a influência de parâmetros ambientais, como a temperatura e umidade.

Abstract. This paper introduces a distributed algorithm for monitoring wind turbines using wireless of actuators and sensors network (WSAN). Its main contribution is to propose a solution with full decentralization of decision regarding the presence of damage, keeping the processing on WSAN. For identification of the damage is used to analyze the modal frequency under the influence of environmental parameters such as temperature and humidity.

1. Introdução

A crescente demanda energética mundial, o esgotamento das reservas de petróleo e gás e os problemas políticos e sociais que influenciam o comércio mundial de combustíveis fósseis podem ser apontados como fatores suficientemente atrativos para o investimento em fontes de energia renováveis no mundo. Atualmente, uma fonte alternativa de energia com exploração bem sucedida é a energia eólica. A energia eólica é obtida por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores. Apesar dos avanços dos equipamentos envolvidos nas usinas eólicas, tais como os sistemas avançados de transmissão, maior aerodinâmica das pás e melhor operação das turbinas, ainda existem diversos desafios a serem superados, dentre eles a manutenção das usinas eólicas, uma vez que as turbinas eólicas apresentam falhas frequentes. Os componentes das turbinas eólicas (geradores, engrenagens e pás dos rotores) registram em média de dois a três incidentes por ano para uma única turbina, sendo metade das falhas relativas aos componentes mecânicos [Shokrieh e Rafiee 2006].

Pelo exposto acima, por um lado, é crucial a adoção de fontes renováveis, como por exemplo a energia dos ventos, na matriz energética de cada país; por outro lado, é imprescindível a existência de sistemas eficientes de monitoramento que identifiquem possíveis problemas nas estruturas envolvidas na geração desse tipo de energia, como por exemplo, das usinas eólicas. O monitoramento da integridade da estrutura (SHM, do

*Artigo financiado com recursos da CNPQ (4781174, 309270, 477229, 306938), FINEP (01.10.0549.00, 01.100064.00), FAPERJ (101.360)

inglês *Structural Health Monitoring*) de usinas eólicas permite detectar, localizar, medir a extensão, determinar o tipo do dano e, conseqüentemente, antecipar consertos, evitando acidentes ou atrasos na geração de energia por essas usinas. Em geral, as estruturas físicas das turbinas eólicas sofrem fadiga causada por forças naturais como ventos, chuvas, variações de temperatura e também pelo desgaste gerado pelo próprio uso dos equipamentos. Tais eventos podem gerar tensões nos materiais ocasionando fraturas ou desgastes em partes da estrutura. Assim, o monitoramento da integridade das estruturas presentes em usinas eólicas é de grande importância para detectar danos, que são responsáveis por acidentes e podem causar grande prejuízo.

Enquanto o monitoramento tradicional das estruturas existentes nas turbinas eólicas envolve inspeções presenciais e tem um alto custo, o uso de um sistema de monitoramento automatizado e remoto não só aumenta a margem de segurança, ao aumentar a frequência das inspeções, como seu custo é reduzido drasticamente. Uma possível solução para realizar esse monitoramento consiste no uso de sensores dispostos estrategicamente ao longo da estrutura de uma turbina eólica e o envio dos dados sensorizados para uma estação supervisora. No entanto, a instalação de sensores que utilizem cabos de alimentação e dados na estrutura da turbina eólica pode ser bastante trabalhosa e custosa [Boller et al. 2009].

Nesse contexto, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), cujo surgimento foi decorrente dos avanços em tecnologias de rede sem fio e MEMS (*Micro ElectroMechanical System*), podem ser empregadas para monitorar remotamente as estruturas das turbinas eólicas. Diferentemente das redes de sensores convencionais, as RSSFs são compostas por dezenas a milhares de dispositivos de baixo custo e tamanho reduzido (sensores inteligentes), que são capazes de realizar sensoriamento, processamento e transmissão de informação através de enlaces sem fio. Esses sensores atuam de forma colaborativa, extraíndo dados das estruturas existentes na turbinas eólicas, bem como capturando medidas oriundas de eventos externos e transmitindo-as para um ou mais pontos de saída da rede, chamados sorvedouros, para serem analisados e processados.

Nas RSSF, os sensores são dispositivos passivos, gerando informações sobre o ambiente monitorado, mas não atuando sobre ele. Por outro lado, as Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio - RASSF (*Wireless Sensor and Actuators Networks* - WSANs) são redes capazes de executar ações no ambiente físico em resposta a situações interpretadas pelos sensores. Assim, é possível dentro da própria RASSF realizar tanto a coleta e a manipulação de informações relativas à integridade das estruturas das turbinas eólicas como executar ações de manutenção detectiva, alavancando ainda mais o seu potencial benefício no SHM, que exigem resposta imediata sob pena de causar sérios acidentes.

Obviamente, o emprego de RASSF como infra-estrutura de comunicação para monitorar estruturas em usinas eólicas bem como ferramenta de controle acabou gerando uma série de novos desafios [Akyildiz e Kasimoglu 2004]. Um desafio chave consiste em desenvolver metodologias descentralizadas que possibilitem, dentro da própria rede, localizar, detectar e determinar a extensão de danos nas turbinas eólicas de forma precisa e confiável, bem como em tomar decisões e executar ações de controle relativo à detecção desses danos. Em [Santos et al. 2010] nós apresentamos a proposta de um primeiro algoritmo parcialmente descentralizado para detectar, localizar e determinar a extensão de danos em estruturas, fazendo uso de RSSF. Nele, a integridade

de uma estrutura era determinada usando as medidas coletadas por sensores somente do tipo acelerômetro não levando em conta a influência dos parâmetros ambientais na variação da vibração. Entretanto, os trabalhos apresentados em [Deraemaeker et al. 2006, Xia et al. 2006, Sohn et al. 1999] destacam a influência de parâmetros ambientais (PA), como a temperatura e a umidade, na variação da vibração, mostrando a importância de correlacioná-los para detectar um dano de forma mais confiável.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é propor um segundo algoritmo descentralizado e confiável para detectar danos em estruturas inseridas em ambientes de usinas eólicas e gerar uma resposta de controle a partir da própria rede, fazendo uso de RASSF. Esse algoritmo é mais confiável do que o primeiro [Santos et al. 2010] uma vez que medidas de temperatura e umidade influenciam a frequência de vibração da estrutura [Sohn et al. 1999]. Assim, ao levar em conta além da vibração as medidas de temperatura e umidade se evita a identificação de falsos danos devido à mudança na vibração ocasionada, por exemplo, pela temperatura estar alta (verão) ou devido à alteração de massa da estrutura quando há chuvas (umidade alta). Não considerar essas variáveis simplificaria todo o modelo de identificação do dano, o que não é aceitável do ponto de vista da engenharia, pois as estruturas em geral estão sujeitas à influência dos parâmetros ambientais. Outra diferença importante do algoritmo proposto em relação ao primeiro algoritmo é que todo o processamento relativo à identificação do dano é realizado dentro da RASSF sem a necessidade de ajuda do nó sorvedouro ou de líderes de *cluster*. Além disso, criou-se uma representação para o dano, chamado Índice de Dano (ID), que é usado para descrever o dano de forma simplificada, representando somente as frequências que foram alteradas, ao invés de todas as frequências.

O restante do trabalho é organizado como segue. Na Seção 2, são apresentados os trabalhos recentes relacionados à RSSF aplicados ao SHM. Na Seção 3 é apresentada a proposta detalhada. Na Seção 4, são apresentados os experimentos e simulações realizados e por fim, na Seção 5 a conclusão e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

É possível observar que os algoritmos de SHM cada vez mais passam a utilizar o processamento interno dos nós sensores para diminuir os dados transmitidos na rede. [Gao et al. 2006] propôs uma estratégia de computação para a detecção de danos que retém as frequências modais nos sensores. A rede de sensores é dividida hierarquicamente em *clusters*. Como parte do esquema de processamento dos dados, a comunicação entre os nós sensores ocorre dentro de cada *cluster* para fornecer as **informações condensadas**, tais como funções de correlação, propriedades modais ou informações sobre os danos. Estas informações podem ser compartilhadas entre outros líderes de *clusters* ou enviadas para a estação base. Os dados mantidos dentro de cada *cluster* reduzem a transmissão de dados na rede e também o tempo de identificação do dano. A proposta de [Gao et al. 2006] não realiza o processamento na rede e sim agregações dos dados sensorizados.

[Hackamnn et al. 2008] implementou uma RSSF parcialmente descentralizada para monitorar a integridade de estruturas. Sua proposta inovou a forma de como a RSSF pode atuar em relação ao monitoramento da estrutura, deixando de ser uma rede de transferência dos dados coletados pelos sensores, e passando a realizar parte do processamento (não apenas agregação, como [Nagayama and Spencer, 2007]) dos dados

medidos. O método, *Damage Localization Assurance Criterion* (DLAC), é um algoritmo que coleta e processa parcialmente os dados nos próprios sensores, ou seja, dentro da RSSF. O processamento executado no sensor resolve parte da identificação do dano, antes de enviar os dados para o nó central. O nó central recebe, então, os dados pré-processados dos sensores e realiza a parte final da identificação e localização. Em seus resultados, a descentralização parcial da detecção do dano permitiu reduzir a quantidade de dados transmitidos na rede, bem como acelerar o processo de detecção do dano. É importante ressaltar que em sua proposta tanto a detecção quanto a localização do dano ainda são realizadas na estação base, de forma centralizada.

[Santos et al. 2010] propôs um algoritmo de decisão descentralizado para identificação e localização de dano em estruturas de plataformas de petróleo para redes de sensores, chamado de SENSOR-SHM. Utilizando uma topologia baseada em *cluster*, é possível identificar quatro papéis dos sensores: (i) estação base, responsável por realizar a interface entre a rede de sensores e os usuários, que recebem as mensagens contendo dados sobre a integridade da estrutura, (ii) o nó *sorvedouro*, responsável pela etapa de *setup*, que envolve a criação dos *clusters* e a sincronização dos líderes de *cluster*, (iii) o nó líder de *cluster*, que é responsável por coordenar os sensores e realizar a decisão do dano com as informações enviadas pelos sensores, e (iv) os sensores, que realizam o sensoriamento e o pré-processamento do dano, antes de enviar seus resultados ao líder de *cluster*. A principal diferença em relação ao trabalho de [Santos et al. 2010] é que o algoritmo proposto nesse trabalho envolve a **descentralização total** da decisão do dano, isto é, a RSSF é capaz de realizar **todo** o processo de decisão do dano, sendo a decisão realizada colaborativamente entre os sensores vizinhos, evitando o envio de seus dados ao nó líder de *cluster* ou nó sorvedouro. Outro diferencial do algoritmo proposto é a introdução de duas características da estrutura, a temperatura e a umidade, onde diferente das outras propostas somente os dados da vibração são utilizadas para identificação do dano. O algoritmo para identificação do dano em estruturas proposto neste trabalho apresenta resultados mais confiáveis se comparado com o trabalho de [Santos et al. 2010] como pode ser visto na seção de experimentos. No entanto, a proposta mantém a idéia original dos algoritmos da literatura de comparação das frequências modais, isto é, comparar a frequência da estrutura saudável, criada na etapa de *setup* do algoritmo, com as frequências posteriormente aferidas durante toda a operação do algoritmo e comparação com um limiar. A frequência da estrutura saudável é definida como sendo a primeira amostra da frequência da estrutura, onde é suposto neste momento, que a estrutura não esteja danificada, servindo como referência para as comparações futuras.

3. Proposta

A proposta desse trabalho consiste de um sistema de monitoramento e decisão descentralizado utilizando RASSF, composta por sensores, atuadores e um sorvedouro, para identificação de danos em aerogeradores.

3.1 Modelo de Operação do SHM

O procedimento operacional do SHM [Worden et al. 2007] é dividido em quatro etapas descritas em seguida. A primeira, **etapa de avaliação funcional**, analisa os dados da estrutura, como a localização, as dimensões, os materiais usados, as cargas, as condições iniciais de dano, o tipo de dano que se deseja detectar e, caso a análise não

seja feita em laboratório, dados do ambiente, como por exemplo, ventos e chuvas. Já a **etapa de aquisição de dados e normalização** determina os dados que serão utilizados para detecção do dano. Nesta etapa a forma e a periodicidade com que os dados são transferidos, o posicionamento e calibração dos sensores e as fontes de interferências devem ser identificados. Os dados ainda devem ser normalizados, para minimizar os erros decorrentes de ruídos gerados por fontes externas lidos pelos sensores. A **etapa de seleção das propriedades** consiste na seleção dos dados que são utilizados para identificar o dano. A proposta do presente trabalho utiliza a frequência de vibração, a temperatura e a umidade da estrutura. A análise da frequência utilizada para verificar a integridade da estrutura é chamada análise modal ou frequência modal [Farrar et al. 2001]. A temperatura e umidade influenciam a forma de vibração da estrutura que por sua vez influencia a análise modal. Por fim, a **etapa de modelagem estatística** faz uso de modelos probabilísticos para aprimorar a detecção de danos, caracterizando a existência, a localização, o tipo e a extensão do dano. Através dos modelos é possível determinar os limiares que serão usados nos algoritmos aplicados na identificação do dano. A presente proposta utilizou o método da regressão linear. A função central da regressão linear no presente trabalho é ajustar as frequências de vibração em termos da temperatura e umidade. O ajuste realizado permite comparar frequências de vibração que estão sob a influência da temperatura e umidade, que são parâmetros ambientais muito variáveis (por exemplo, conforme as estações do ano). O modelo de regressão é composto por dois tipos de coeficientes lineares. Os *coeficientes globais* são gerados fazendo uso dos dados vindos de todos os sensores da estrutura, enquanto que os *coeficientes locais* são gerados para cada sensor fazendo uso dos dados específicos do próprio sensor. A distinção de coeficientes se deve ao fato da diferenciação de altas e baixas frequências advindas do monitoramento da estrutura. As baixas frequências são espectros identificados por todos os sensores dispostos na estrutura, ao contrário das altas, que são identificadas por sensores do local onde está posicionado fisicamente o sensor. Logo, não se deve utilizar coeficientes **globais** para identificar danos em **altas** frequências uma vez que podem introduzir erros na identificação do dano.

3.2 Arquitetura Lógica do Sistema

A arquitetura proposta consiste de um conjunto de componentes e base de dados. Os componentes são: Gerência, Monitoramento, Tratamento dos Dados, Decisão de Dano e Atuadores. As bases são: base de dado de Coeficientes Locais e Globais (BCLG) e Base de Parâmetros de Monitoramento (BPM) (Figura 1).

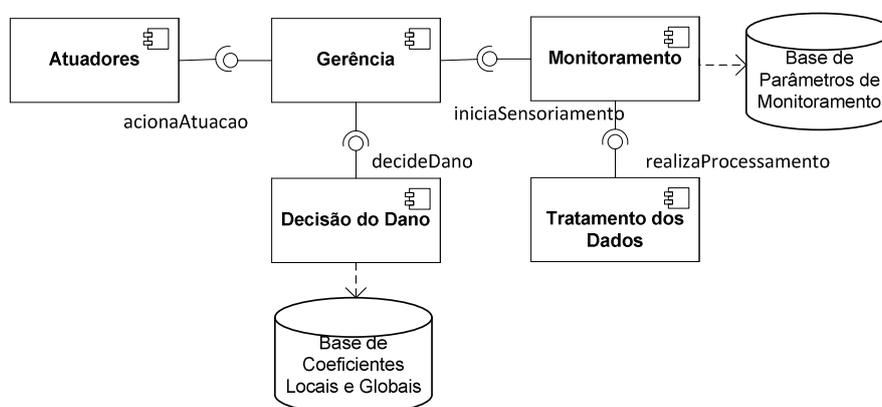


Figura 1. Arquitetura do mecanismo de decisão de detecção de dano.

A base **BCLG** fornece os coeficientes lineares locais e globais para a execução do algoritmo de decisão. Assim, a **BCLG** armazena β_{wL} , β_{tL} , β_{hL} , que são os coeficientes **locais** para frequência, temperatura e umidade, respectivamente e os coeficientes, β_{wG} , β_{tG} , β_{hG} , que são os coeficientes **globais** para frequência, temperatura e umidade, respectivamente, obtidos ao aplicar o modelo de regressão linear. Os coeficientes são configurados no momento em que a imagem contendo o código fonte compilado é carregada no sensor. A **BPM** contém os valores necessários para realizar o sensoriamento da estrutura e os parâmetros necessários para determinar como será realizada a coleta dos dados. Os parâmetros são: frequência de amostragem, tempo de monitoramento da vibração, temperatura e umidade. Os valores dos parâmetros exclusivos da vibração devem ser iguais para todos os nós sensores da estrutura e são configurados no sensor no momento em que a imagem executável contendo o código fonte compilado é carregado no sensor. O Componente de **Gerência** é responsável por coordenar a ação dos outros componentes e identificar os nós vizinhos que um dado sensor possui. O Componente de **Monitoramento** é responsável por executar todas as ações relativas à aquisição dos dados do ambiente a ser monitorado. O Componente de **Tratamento dos Dados** realiza a normalização dos dados, aplica a transformada de Fourier e faz identificação dos picos de frequência nos dados da vibração coletados com o intuito de reduzir por meio de agregação a quantidade de dados a serem transmitidas. O Componente de **Atuadores** é responsável por acionar o dispositivo mecânico que atuará diretamente na estrutura. O componente de **Decisão de Dano** é responsável por executar o algoritmo proposto nesse trabalho e sua responsabilidade é determinar de forma descentralizada e colaborativa com os outros sensores, a existência de um dano na estrutura.

Traçando uma correspondência entre os procedimentos operacionais e os componentes do sistema, a avaliação funcional e a seleção de propriedades são de responsabilidade do Componente de Gerência. A aquisição de dados e normalização é implementada no Componente de Monitoramento e Tratamento dos Dados, enquanto que a modelagem estatística é de responsabilidade do Componente de Decisão do Dano.

A RASSF possui três tipos de nós: o nó sorvedouro, o nó atuador e o nó sensor. O sorvedouro implementa somente o Componente de Gerência, suas funções são: (i) servir de interface entre a RASSF e a estação de monitoramento e (ii) enviar mensagens periódicas para os sensores iniciarem o monitoramento. O atuador implementa os Componentes de Gerência e Atuadores, sua função é receber as mensagens dos sensores e acionar o dispositivo físico ligado ao atuador. O sensor implementa todos os Componentes menos o Atuadores, suas funções são: (i) realizar o monitoramento da aceleração, temperatura e umidade; (ii) normalizar a aceleração; (iii) converter a aceleração em frequência; (iv) identificar o pico de frequência; (v) ajustar a frequência pelo modelo de regressão linear; (vi) verificar as variações de frequências; (vii) decidir colaborativamente se há nós vizinhos também com variações de frequências e (viii) se necessário, enviar mensagens à estação base e ao atuador caso algum dano seja detectado. Nas próximas subseções são detalhados os componentes do sistema.

3.2.1 Componente de Gerência

Esse componente é responsável por coordenar a ação de todos os outros componentes. As suas funções são descritas em seguida. Inicialmente, este componente realiza a etapa de *setup* do ambiente no sensor. A etapa de *setup* é responsável pelo estabelecimento da

rede de sensores na estrutura que está sendo monitorada, ou seja, a definição dos nós que são seus vizinhos. Para simplificação do problema, os sensores são informados a priori de quais nós sensores são seus vizinhos. A etapa de *setup* segue o modelo do trabalho anterior [Santos et al. 2010] e assume que a rede de sensores está temporalmente sincronizada e ainda determina as frequências modais sadias da estrutura. Em seguida, esse componente trata o envio e recebimento do Índice de Dano (definido na seção 3.2.7) entre os sensores e o envio da mensagem de dano detectado entre o nó sensor e o nó sorvedouro. Por fim, este componente ativa os componentes de Monitoramento, Decisão e Atuadores.

3.2.2 Componente de Monitoramento

Este componente é responsável por monitorar os dados de vibração, temperatura e umidade. O sensoriamento da **vibração** é realizado por unidades chamadas de acelerômetros instalados nos sensores. Para realizar a aferição da vibração é necessário que dois requisitos sejam atendidos. O primeiro requisito é determinar a frequência máxima que se deseja monitorar na estrutura (obtido com o auxílio de um especialista em estruturas), pois tal frequência define a **taxa de vibração** que se deseja amostrar. O segundo requisito é o tempo de Monitoramento o qual deve ser calculado de forma a não esgotar os recursos de memória interna dos nós sensores. Quanto maior o tempo de sensoriamento, maior deve ser a quantidade de memória interna disponível para armazenar os dados adquiridos. Assim, o cálculo do tempo de Monitoramento depende da especificação técnica de memória do nó da rede. Os dados da vibração devem ser tratados posteriormente pelas etapas de Normalização, Transformada Rápida de Fourier e Identificação de Picos de Frequência, definidos na seção 3.2.5.

Os valores da **temperatura e umidade** são obtidos diretamente das unidades de sensoriamento do tipo termômetro e sensor de umidade, respectivamente, que estão integradas ao sensor. A amostragem da temperatura deve estar entre os limites determinados no arquivo Parâmetro de Monitoramento. O sensoriamento da umidade (umidade relativa do ar) é direto e deve ser amostrado entre os limites de 0 a 100%, que representam o clima extremamente seco e o extremamente úmido, respectivamente.

3.2.3 Componente de Tratamento dos Dados

O Componente de Tratamento dos Dados é responsável por realizar o tratamento dos dados coletados da unidade de sensoriamento do tipo acelerômetro. É importante ressaltar que somente os dados de aceleração serão tratados. O tratamento dos dados de aceleração ocorre em três etapas descritas em seguida.

A **etapa de normalização** dos dados é necessária para remover os ruídos das amostras da vibração. Em estruturas civis é comum a existência de fontes externas de ruído, como por exemplo, os automóveis que trafegam sobre uma ponte. Essas fontes externas introduzem frequências não esperadas no espectro de frequência final da estrutura, causando problemas na identificação do dano na análise modal. Na **etapa de Transformada Rápida de Fourier (FFT)** os dados da vibração são amostrados em função do tempo, isto é, a cada momento, a aceleração da estrutura é amostrada. Como a análise modal é realizada com o espectro de frequência e não com os dados da aceleração, é necessário então que a aceleração seja convertida em frequência de vibração utilizando a FFT. A FFT permite a identificação das frequências modais da estrutura com suas respectivas amplitudes. O algoritmo completo da transformada de

Fourier é detalhado em [Cooley and Tukey, 1965]. Além de possibilitar a análise modal da estrutura, a FFT agrega os dados da aceleração. A agregação dos dados da aceleração através do procedimento da FFT é importante, pois reduz a quantidade de dados na memória do nó sensor. A agregação que a FFT introduz representa uma taxa de compressão [Nakamura et al. 2007] dos dados da ordem de 204:1 e o seu cálculo pode ser visto em [Hackmann et al. 2008]. Para realizar a execução da FFT são necessários alguns parâmetros como (i) a janela de amostragem, (ii) o intervalo de execução e (iii) as frequências alvo. Os valores dos parâmetros dependem da estrutura que esta sendo monitorada e estão armazenados na base Parâmetros de Monitoramento. A **etapa de Identificação dos Picos de Frequência** é parte fundamental do processo de identificação do dano. Após a execução da FFT, um conjunto de dados contendo o espectro de frequência é obtido, e um processamento adicional é necessário para a identificação das amplitudes máximas locais da estrutura. O procedimento de identificação dos picos de frequência também é caracterizado como uma função de agregação de dados, uma vez que reduz a quantidade de valores discretos da FFT para somente os número de valores de frequência que se deseja identificar (picos de frequência). Para identificação dos picos de frequência, utiliza-se o algoritmo proposto em [Santos et al. 2010], que recebe como entrada os intervalos de frequências desejadas e calcula o maior pico naquele intervalo.

3.2.4 Componente de Atuadores

O Componente de Atuadores é responsável por ativar fisicamente os atuadores disponíveis na estrutura. Os atuadores podem ser chaves elétricas, relés, *leds*, etc. que por sua vez ativam freios, bombas de água ou óleo, que irão atuar mecanicamente na estrutura evitando ou contendo um problema detectado pela rede de sensores. Nessa proposta, o atuador é representado por um dos *leds* disponível no *hardware* do sensor.

3.2.5 Componente de Decisão de Dano

Esse componente é o mais importante da arquitetura e é onde está localizado o algoritmo proposto nesse trabalho. As funcionalidades desse componente são: (i) ajustar a frequência modal, (ii) criar o índice de dano, (iii) calcular a quantidade de variações de frequências (iv) identificar um dano colaborativamente na estrutura e, por fim, (v) informar a estação base e os atuadores dos seus resultados em relação ao dano. As funcionalidades estão representadas no pseudocódigo (Algoritmo 1) nas linhas, 5, 6, 7, 8, 10-11, respectivamente.

Algoritmo 1: Algoritmo distribuído executado no Componente de Decisão.

Entrada:	
1:	picos_iniciais; picos_monitorados; temperatura e umidade {Dados da etapa de setup e monitorados no ciclo}
Ação:	
2:	picos_ajustados = ajuste_freq (picos, temperatura, umidade); {Ajuste de frequência pela temperatura e umidade}
3:	ID = cria_indice_dano (picos_ajustados, picos); {Criação do Índice de Dano}
4:	se variacoes_dano (ID) > 1 então {Se tiver mais uma frequência acima dos limites}
5:	quantidade_id = solicita_ID_vizinhos (); {Solicita aos vizinhos seus ID's}
6:	se quantidade_id > 0 então {Se houver algum vizinho com frequência acima do limite}
7:	envia_msg_base (dano); {envio de mensagem para a estação base}
8:	envia_msg_atuar (true); {envio de mensagem para o atuador}
9:	fim se
10:	fim se

As **frequências modais ajustadas** são calculadas através das Equações 1 e 2 [Xia et al. 2006] e devem ser executadas para cada modo de frequência monitorada.

$$f_G(t, h) = w + t \cdot \beta_{tG} + h \cdot \beta_{hG} \quad (1)$$

$$f_L(t, h) = w + t \cdot \beta_{tL} + h \cdot \beta_{hL} \quad (2)$$

Onde $f_G(t, h)$ e $f_L(t, h)$ representam as frequências global (f_G) e local (f_L) ajustadas pelos parâmetros ambientais; w, t, h representam a frequência modal aferida, a temperatura e a umidade, respectivamente; β_{tG} e β_{hG} representam os coeficientes lineares globais da temperatura e da umidade; β_{tL} e β_{hL} representam os coeficientes lineares locais da temperatura e umidade.

O **índice de dano (ID)** é o artefato utilizado para indicar quais frequências modais estão alteradas. A criação do ID, nesse trabalho, representa um avanço em relação ao trabalho anterior [Santos et al. 2010], visto que deixa de ocorrer a transmissão dos dados da frequência modal de cada sensor para o seu respectivo líder de cluster o que gera uma grande quantidade de dados transmitidos desnecessariamente na rede. O ID resume todas as frequências que tiveram seus valores alterados com o uso de dados binários da forma descrita a seguir. O ID é dividido em dois: global e local. O ID global é calculado pelas variações significativas entre as frequências modais da estrutura saudável e as frequências modais **globais** ajustadas, enquanto que o ID local utiliza as frequências **locais** ajustadas. A variação local Δw_L e a global Δw_G são calculadas respectivamente usando a Equação 3 e 4.

$$\Delta w_L = |f_L(t, h) - w_0| \quad (3)$$

$$\Delta w_G = |f_G(t, h) - w_0| \quad (4)$$

Onde Δw_L , denominado de variação local, corresponde à variação entre a frequência modal da estrutura saudável (w_0) e a frequência modal ajustada local $f_L(t, h)$ e; Δw_G , denominado variação global, corresponde à variação entre a frequência modal da estrutura saudável (w_0) e a frequência modal ajustada global $f_G(t, h)$. Logo, para um conjunto de frequências modais tem-se: $\Delta w_{G1}, \Delta w_{G2}, \dots, \Delta w_{GN}$ para as variações globais e $\Delta w_{L1}, \Delta w_{L2}, \dots, \Delta w_{LN}$ para as variações locais, onde N representa a quantidade de frequências modais monitoradas na estrutura. As variações de frequência global e local entre as frequências saudáveis são controladas por limiares globais (l_{global}) e locais (l_{local}) (Equações 5 e 6). Os limiares globais (l_{global}) e locais (l_{local}) são obtidos do modelo de regressão linear, ou seja, sendo ϵ a variável que inclui todos os erros residuais da regressão, o limite local e o global é definido como a média dos erros residuais da regressão.

$$\Delta w_L \geq l_{local} \quad (5)$$

$$\Delta w_G \geq l_{global} \quad (6)$$

O ID é formado pelas variações de frequências modais que ultrapassarem os limiares determinados (Equações 5 e 6). Para cada modo de frequência, seja local ou global, é determinado um valor binário para o índice de dano da respectiva frequência modal. O valor binário “zero” é atribuído ao índice de dano dessa dada frequência modal. Caso contrário, “um” é atribuído ao índice de dano da dada frequência modal. O nó sensor quando solicitado pode enviar o ID para outros sensores a fim de colaborar na identificação do dano. Após calcular os índices de dano, é necessário realizar a **identificação do dano** propriamente dito. A identificação do dano é realizada em duas etapas. A primeira etapa é realizada em cada sensor fazendo uso do identificador de

dano do sensor, ou seja, tendo como base os índices de dano global e local. Para que o sensor **interprete a variação da frequência como um dano** é necessário que pelo menos duas variações dentro do mesmo ciclo de monitoramento que tenham ultrapassado o limiar local ou global. Em outras palavras, um sensor só irá reportar um dano quando pelo menos duas variações tenham extrapolado o limiar. A segunda etapa é realizada **colaborativamente** apenas pelos sensores que identificaram um possível dano (duas variações na frequência) e estes devem reforçar a existência do dano por meio da colaboração com os sensores vizinhos. Caso haja duas variações, o dado sensor solicitará individualmente aos seus vizinhos, o envio de seu ID apenas em caso de dano. Caso algum sensor vizinho de um dado sensor envie uma mensagem informando um ID com um dano, o Componente de Decisão desse dado sensor deve informar ao Componente de Gerência a presença de dano na estrutura. O Componente de Gerência por sua vez, deve acionar o Componente de Atuadores conforme descrito na seção 3.2.6 e enviar também uma mensagem ao nó sorvedouro informando a existência do dano e a identificação dos sensores que identificaram o dano.

4. Experimentos com o sistema de detecção de dano

Esta seção descreve os experimentos simulados de avaliação da proposta em termos do tempo de vida da rede e do consumo de recursos da rede, e um experimento real avaliando a identificação do dano. A metodologia aplicada nos experimentos e descrita a seguir é similar à aplicada no trabalho anterior [Santos et al. 2010], o que possibilitou a comparação com os resultados obtidos anteriormente.

4.1 Ambiente e métricas dos experimentos simulado e real

A implementação do experimento simulado considera uma RASSF composta por sensores MICAz. Os sensores são programados com a linguagem *Nesc* e utilizam o sistema operacional *TinyOS* na versão 2.1. Foi utilizado o simulador AVRORA 1.7 [Alberola and Pesch 2008]. Os protocolos usados no TinyOS e no Avrora são os padrões e a perda de pacotes é proporcional à distância entre os nós, conforme [Alberola, R. e Pesch, D. (2008)].

Três cenários de simulação foram implementados, contendo, cada um, respectivamente, 6, 9 e 12 sensores dispostos nas pás do aerogerador. Cada pá possui 20 metros de extensão. Toda a rede está a 1-hop de comunicação e o alcance do rádio de cada sensor é de 35m. Um nó sorvedouro/atuator foi posicionado no centro do aerogerador. Os sensores localizados nas pás são separados um do outro por uma distância de 6,6, 5 e 4 metros, respectivamente, para cada cenário. Os nós sensores que estão na mesma pá são considerados nós vizinhos e geram amostras periódicas a cada 10 segundos. A energia inicial de cada sensor é de 40 Joules e a simulação ocorre durante 1,5 horas para cada cenário até que todos os sensores tenham a sua bateria esgotada. Nos três cenários, a simulação recria uma estrutura real, ou seja, os dados de um aerogerador disponibilizados em [Larsen et al. 2002] foram inseridos diretamente no código dos sensores a fim de gerar os dados de entrada necessários para o funcionamento do sistema. As amostras do monitoramento do aerogerador foram obtidas durante 48 horas, de hora em hora.

As **métricas** utilizadas no experimento simulado são: **tempo de vida da rede, pacotes enviados e recebidos**. Define-se tempo de vida da rede como o tempo desde o início do seu funcionamento (todos os nós ligados) até o momento em que o primeiro nó

tem sua bateria descarregada. A quantidade de pacotes enviados e recebidos para cada sensor é definida como sendo a quantidade total de pacotes enviados e recebidos durante toda a simulação. As mensagens são enviadas por *broadcast* e todos os sensores estão no raio (40 metros) de cobertura do rádio. As mensagens são de dois tipos: (i) *IniciaMonitoramento* (16 bytes) que é utilizada pelo sorvedouro e indica a todos os sensores o início do monitoramento; e (ii) *retornarID* (32 bytes) que é utilizada pelos sensores no momento em que há um dano detectado.

No tocante ao experimento real, o objetivo é verificar se o sistema identifica um dano quando existe uma variação significativa de frequência. O mesmo programa utilizado no experimento de simulação foi utilizado neste experimento real, rodando em sensores reais MICAz. Todas as mensagens enviadas pelos sensores são lidas pelo sorvedouro, que está conectado a um computador via interface serial. No sorvedouro foi implementado um programa responsável por reencaminhar todas as mensagens para o computador e gravar, em arquivo, todo o conteúdo da mensagem para análise posterior. Nesse experimento real foi montada uma RASSF composta por 4 sensores. Os sensores foram identificados (*nodeid*) pelos valores de 1 a 4, sendo o menor valor atribuído ao sensor mais próximo ao rotor do aerogerador. O sorvedouro/atuador foi identificado com valor zero (0). Todos os dados do experimento real foram obtidos em [Songtao et al. 2008] são eles: (i) 48 medições (48 horas de medição, de hora em hora) de aceleração, temperatura e umidade; (ii) os coeficientes de temperatura e umidade são respectivamente 0,01358571 e 0,004521429; (iii) as frequências iniciais do aerogerador foram 1.810Hz, 3.446Hz, 5.619Hz, 10.448Hz, 10.918Hz e 14.578Hz para a 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª frequências modais; (iv) Os limites globais e locais de 0,8; (v) durante as 48 horas, a temperatura variou entre 18°C e 32°C e; (vi) a umidade relativa do ar variou de 25% a 96,5%. Quando a umidade atingiu 96,5%, ocorreu chuva. A **análise** utilizada nesse experimento foi constatar o envio de mensagens dos sensores para o sorvedouro/atuador relatando o dano.

4.2 Resultados e Análises

Nesta seção são apresentados os resultados do experimento simulado e do real. Os resultados da simulação quanto ao tempo de vida da RASSF para os cenários simulados 1, 2 e 3 são respectivamente, 7.1, 7 e 6.2 anos (Figura 2). Observa-se em cada um dos cenários que os resultados de todos os sensores envolvidos no cenário em questão quanto ao tempo de vida são semelhantes. Assim, caso a bateria de algum sensor se esgote, ele não influenciaria nenhum outro sensor, mantendo-se, ainda que parcialmente, a operação dos outros sensores. O tempo de vida da rede no cenário 3 é reduzido devido ao aumento da quantidade de mensagens enviadas/recebidas entre sensores e estação base. Os resultados de tempo de vida obtidos no cenário 1 foram melhores quando comparados com os resultados dos experimentos realizados por [Hackmann et al. 2008] e [Santos et al. 2010]. No trabalho de [Hackmann et al. 2008] o tempo de vida estimado da RSSF contendo 7 nós sensores foi de 312 dias. Em [Santos et al. 2010] o tempo de vida estimado da rede contendo 8 nós sensores incluindo 2 líderes de cluster foi de 800 dias. No presente trabalho, o tempo de vida da rede para o segundo experimento é de aproximadamente 2555 dias. É importante mencionar que os experimentos simulados foram conduzidos com intervalos de 10 segundos, onde cada 10 segundos representam 1 hora.

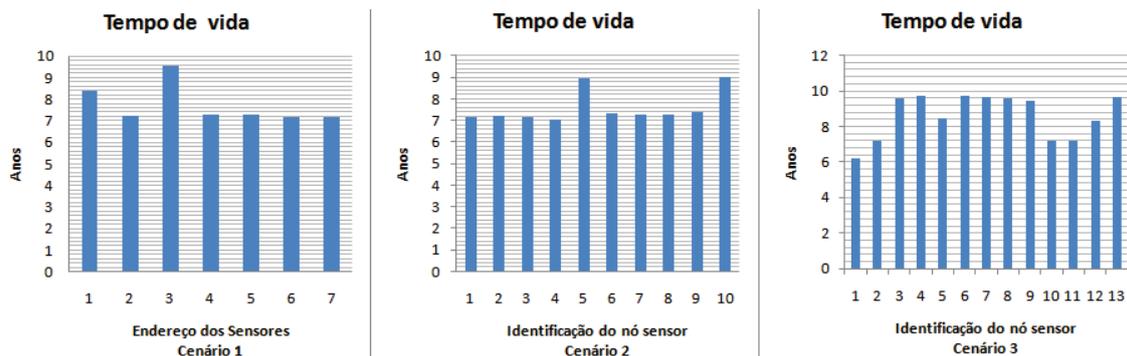


Figura 2. Tempo de vida dos sensores para os cenários 1, 2 e 3.

Os resultados em relação à quantidade de mensagens enviadas e recebidas na RASSF nos três cenários são ilustrados na Figura 3. É importante citar que, devido aos sensores estarem todos dentro do raio de alcance uns dos outros, todos os sensores recebem as mensagens enviadas, logo, a quantidade de mensagens recebidas é igual a soma de todas as mensagens enviadas.

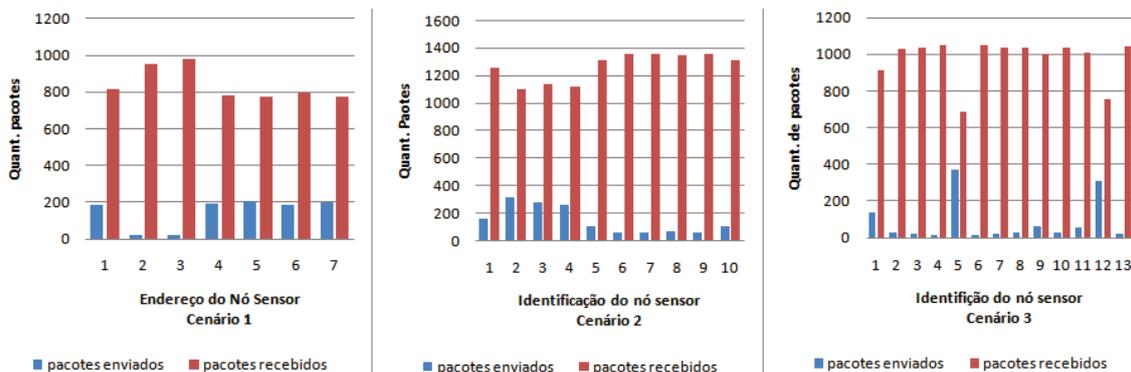


Figura 3. Quantidade de pacotes enviados/recebidos por nó para os cenários 1, 2 e 3.

Ao comparar o cenário 1 deste trabalho com os de [Santos et al. 2010] e [Hackmann et al. 2008], em termos de quantidade de mensagens transmitidas/recebidas, constata-se que os líderes de *cluster* (por tratarem maior quantidade de pacotes que os sensores) tinham suas baterias esgotadas mais rapidamente que os sensores, limitando primeiramente a operação dos sensores que estão vinculados aos líderes e posteriormente toda a rede. Observa-se uma redução média de 62% na quantidade de mensagens enviadas neste trabalho em relação à [Santos et al. 2010], devido a: (i) não haver comunicação com o líder de *cluster* para transferir dados das frequências sensorizadas; (ii) não ser necessário consultar outros líderes de *cluster* para realizar a localização do dano; e (iii) uma mensagem somente é enviada quando ocorre uma variação de frequência no sensor, reduzindo o número de mensagens enviadas na rede.

O experimento real de detecção foi capaz de identificar o dano como no trabalho proposto em [Larsen et al. 2002], servindo como comprovação do sistema de detecção de dano proposto. Tal detecção foi possível observando a variação da segunda e da sexta frequências modais, as quais foram geradas por um dano na pá do aerogerador.

Na figura 4 é possível observar nos sensores 2 e 3, à zero hora do segundo dia, uma diminuição da temperatura ($19,2^{\circ}\text{C}$) e um aumento na umidade relativa do ar (96,4%) (Figura 4b). Ou seja, a zero hora ocorre uma variação na segunda e na sexta

freqüência modal de ambos os sensores. A Figura 4a ilustra as alterações para o sensor 2. A segunda e a sexta freqüências ajustadas para o sensor 2 foram de 13,87Hz e 2,613Hz, respectivamente. Tais freqüências ultrapassaram os limites definidos previamente em 0,8 quando comparado com a freqüência sadia da estrutura.

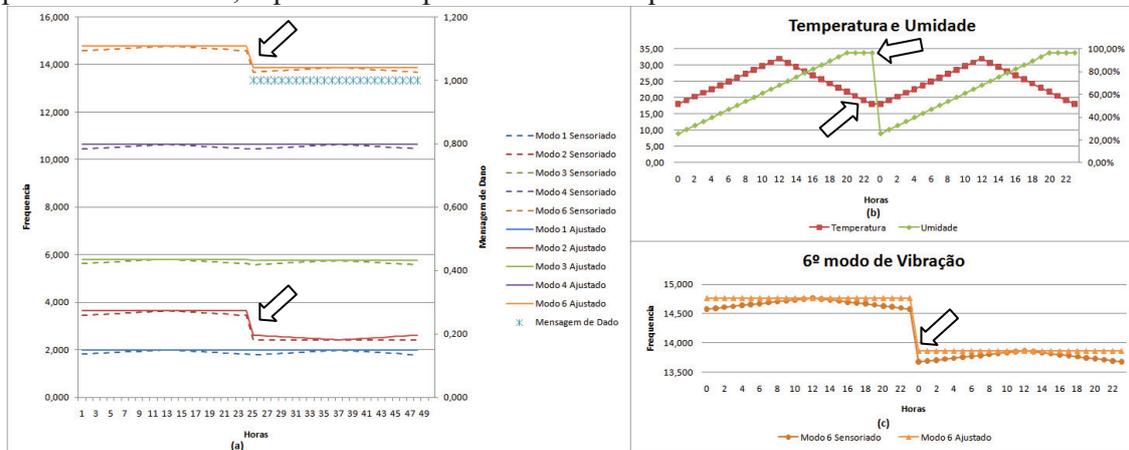


Figura 4. Sensor 2 (a) Freqüência modais e ajustadas. (b) Variação da Temperatura e Umidade do ambiente. (c) Detecção do dano.

Uma vez identificada a variação nessas duas freqüências modais, o sensor envia uma mensagem informando o seu ID à rede. No sensor 3 houve a mesma variação, ocasionando também o envio de uma mensagem à rede com seu ID. Desta forma o sensor 2 recebe a mensagem do sensor 3 e vice-versa. Cada um destes sensores passa a enviar ao sorvedouro/atuador uma mensagem contendo o alerta sobre o dano a cada intervalo de monitoramento da estrutura enquanto esta situação persistir. O envio destas mensagens de alerta está representado na Figura 4a (eixo vertical à direita). O atuador, ao receber uma mensagem de dano, realiza sua função de reduzir a velocidade do aerogerador, representada neste experimento pelo acendimento de um *led* do sensor.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs um novo algoritmo distribuído para detecção de dano em aerogeradores utilizando RASSF. O algoritmo distribuído aplicado à rede plana de sensores obteve melhor desempenho de tempo de vida da rede quando comparado com experimentos semelhantes de outros autores, mesmo incluindo novas variáveis (temperatura e umidade) na detecção do dano. A criação do Índice de Dano teve papel fundamental na simplificação da representação do dano na rede, possibilitando com isso a implementação do algoritmo distribuído, além de reduzir a quantidade de dados trafegados na rede.

Os resultados obtidos nos experimentos relativos ao tempo de vida da rede, a quantidade de mensagens enviadas e recebidas e a eficiência na identificação do dano foram promissores e seus avanços serão explorados em trabalhos futuros na generalização para qualquer tipo de estrutura civil.

Referências

Akyildiz, I. e Kasimoglu, I. (2004) "Wireless sensor and actor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks* (Elsevier), vol. 2, no. 4, pp. 351–367.

- Alberola, R. e Pesch, D. (2008) "AvroraZ: extending Avrora with an IEEE 802.15.4 compliant radio chip model", 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks, p.43-50, Canada.
- Boller, C. et al. (2009), "Encyclopedia of structural health monitoring", John Wiley & Sons Ltd. (2009).
- Cooley, J. e Tukey, J. (1965) "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". *Mathematics of Computation* 19 (April), p. 297--301.
- Deraemaeker, A. et al. (2008) "Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment", *Mec. Systems and Signal Processing*.
- Farrar, C. et al. (1994) "Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande". Los Alamos National Laboratory Report: LA-12767-MS.
- Farrar C. et al. (2001) "Vibration-based structural damage identification", *Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 359, p. 131–149.
- Gao, Y. et al. (2006) "Distributed computing strategy for structural health monitoring". *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, p. 488 - 507.
- Hackmann, G. et al. (2008) "A holistic approach to decentralized structural damage localization using wireless sensor networks", 29th IEEE Real-time Systems Symposium.
- Larsen, G. et al. (2002) "Identification of damage to wind turbine blades by modal parameter estimation", Report Riso-R-1334 (EN), Riso National Laboratory, Denmark.
- Nakamura, E. et al. (2007) "Information fusion for wireless sensor networks: methods, models, and classification", *ACM Journal on Computing Surveys* 39, p. 55, article 9.
- Santos, I. et al. (2010) "Resource Consumption Analysis for a Structural Health Monitoring Algorithm Using Wireless Sensor Networks", *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Gramado.
- Shokrieh, M. e Rafiee, R. (2006) "Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade", *Compos. Struct.* v.74, p. 332-342.
- Sohn, S. et al (1999) "An experimental study of temperature effect on modal parameters of the Alamosa Canyon Bridge". *Earthquake Eng. and Struct. Dynamics*; v.28, p. 879–897.
- Songtao, X. et al. (2008) "Dynamics of Real Structure in Fresh, Damaged and Reinforced States in Comparison with Shake Table and Simulation Models". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 7, No. 2 pp.355-362.
- Worden, K. et al. (2007) "The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring", *Mathematical, Physical & Engineering Sciences* 463: 1639–1664.
- Xia, Y. et al (2006) "Long term vibration monitoring of a rc slab: Temperature and humidity effect", *Engineering Structures* 28 (3), pp. 441–452.