UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

Nicolás Eusebio Cortez Ledesma

Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura

Ilha Solteira

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

NICOLÁS EUSEBIO CORTEZ LEDESMA

Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura

NICOLÁS EUSEBIO CORTEZ LEDESMA

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Jozué Vieira Filho
Orientador

Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista
Co-orientador

Ilha Solteira
2015

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Cortez Ledesma, Nicolás Eusebio.
C828d Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura / Nicolás Eusebio Cortez Ledesma. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2015
117 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Jozué Vieira Filho
Co-orientador: Fabricio Guimarães Baptista
Inclui bibliografia

1. SHM. 2. Detecção de danos. 3. Compensação da temperatura. 4. Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). 5. Nó sensor inteligente. 6. Zigbee, GSM/GPRS.

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura

AUTOR: NICOLÁS EUSEBIO CORTEZ LEDESMA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA , Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOZUE VIEIRA FILHO
Coordenadoria Executiva - Sjbv / Campus Experimental de São João Da Boa Vista

Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. RICARDO TOKIO HIGUTI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. DOMINGOS ALVES RADE
Departamento de Engenharia Mecanica / Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof. Dr. ROBERTO GIL ANNES DA SILVA
Departamento de Engenharia Mecanica / Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Data da realização: 19 de agosto de 2015.

A minha Família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me dar saúde, por iluminar os meus caminhos e por me permitir prosseguir nos meus estudos com novas oportunidades de aprendizado;

À Gladys, minha amada esposa, pela sua companhia, pelo seu apoio, pelas suas orações, pela sua paciência e dedicação. Aos meus filhos, Nicolás, Henry e David, pela dedicação ao estudo e companhia no Brasil. A meus irmãos e minhas irmãs, pelo apoio, incentivo e torcida para a realização desse sonho;

Aos meus orientadores, professores Dr. Jozué Vieira Filho e Dr. Fabrício Guimarães Baptista, pelo apoio, dedicação e direcionamento na conclusão deste trabalho;

Ao professor Rubén Romero e a sua esposa Lucila, obrigado pelo apoio, confiança, amizade e solidariedade neste importante processo;

Aos professores do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), pela dedicação e contribuição académica ao longo do curso;

Aos professores Vicente Lopes Júnior e Eduardo Antonio Turra do grupo de materiais e sistemas inteligentes (GMSINT) do Departamento de Engenharia Mecânica, pela confiança e auxilio no uso de equipamentos do laboratório de Controle e Sistemas Inteligentes e pelo apoio na obtenção de recursos;

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP / FEIS, a todos os servidores e técnico–administrativos, pelo carinho, atenção, orientação e colaboração dispensadas sempre que precisei;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão de Ilha Solteira (FEPISA), pelo apoio financeiro.

Resumo

O monitoramento de integridade estrutural tem atraído o interesse de muitos pesquisadores ao longo das últimas décadas. Com os recentes avanços na tecnologia de comunicação sem fio, as redes sem fio podem, potencialmente, oferecer uma alternativa de baixo custo para seus homólogos tradicionais baseados em cabo. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento e implementação de um novo sistema de monitoramento de integridade estrutural sem fio baseado em um promissor e simples método para detectar dano em estruturas usando o princípio da impedância eletromecânica. O sistema proposto consiste de uma rede de sensores sem fio, escalável e de baixa potência; composta por nós sensores inteligentes, um nó de enlace e um centro de monitoramento remoto. O nó de enlace é usado como coordenador de uma rede ZigBee composta por múltiplos nós sensores inteligentes; e como um *gateway* para integrar a rede ZigBee com o centro de monitoramento remoto via uma rede GSM/GPRS e/ou um servidor HTTP. O nó sensor inteligente, baseado em microcontrolador, é um núcleo portátil, autônomo, realiza automaticamente a compensação das medições com variações da temperatura ambiente, pode controlar vários sensores e opera em modo local ou remoto. A identificação de dano é realizada mediante simples análise nas variações da tensão eficaz do sinal de resposta de transdutores piezelétricos, tais como cerâmicas de titanato zirconato de chumbo (PZT) colados à estrutura, obtidos no domínio do tempo para diferentes frequências do sinal de excitação, sendo que não é necessário calcular a impedância eletromecânica. A compensação dos efeitos da temperatura é realizada utilizando os coeficientes de correlação para calcular o valor efetivo do deslocamento de frequência a partir das assinaturas coletadas. Experimentos foram realizados com sucesso em uma estrutura de alumínio, variando a temperatura na faixa de 0ºC-60ºC; os resultados indicam que o nó sensor inteligente pode ser monitorado de qualquer lugar do mundo e é capaz de detectar danos incipientes, mesmo com a presença de uma variação significativa da temperatura. A contribuição do trabalho vai desde o *hardware* até a interface gráfica.

Palavras-chave: Monitoramento de integridade estrutural **(**SHM). Detecção de danos. Transdutores piezelétricos de PZT. Compensação da temperatura. Rede de sensores sem fio (RSSF). Nó sensor inteligente (NSI). Monitoramento remoto. ZigBee. GSM/GPRS.

Abstract

Structural health monitoring have attracted much research interest over the last few decades. With recent advances in wireless communication technology, wireless networks can potentially offer a low-cost alternative to traditional cable-based sensing systems. This work presents the design and implementation of a novel wireless structural health monitoring system based on a promising and simple method to detect damage in structures using the electromechanical impedance principle. The proposed system is a wireless low-power scalable sensor network composed of smart sensor nodes, a link node and a remote monitoring center (host node and server). The link node is used as the coordinator of a ZigBee network of multiple smart sensor nodes; and as a gateway to integrate ZigBee network with the remote monitoring center via a GSM/GPRS network and/or an HTTP server. The smart sensor node, based on microcontroller, is a portable core, standalone, which automatically compensates measurements with environment temperature variation, may control various sensors and operates in either local or remote mode. The identification of damage is performed by simply analyzing the variations of root mean square voltage of the response signals from piezoelectric transducers, such as PZT (Lead Zirconate Titanate) patches bonded to the structure, obtained for different frequencies of excitation signals in time domain, and it is not necessary to compute the electromechanical impedance. The temperature compensation is performed using the correlation coefficients to compute the effective frequency displacement value from the data signatures. Experiments were successfully performed on an aluminum structure and temperature varying from 0ºC to 60ºC; the results indicate that the proposed smart sensor node, which can be monitored from anywhere in the world and is able to detect damage in the initial stage, even in the presence of significant temperature variation. Our contribution ranges from the *hardware* to the graphical front end.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM). Damage Detection. PZT Transducer. Temperature compensation. Wireless Sensor Network (WSN). Smart sensor node. Remote monitoring. ZigBee. GSM/GPRS.

Lista de Figuras

Figura 1 – Modelo unidimensional usado representar a interação eletromecânica do acoplamento PZT/Estrutura..... 28
Figura 2 – Circuito de excitação para o acoplamento PZT/Estrutura..... 29
Figura 3 – Estrutura da pilha ZigBee..... 42
Figura 4 – Topologias de uma rede ZigBee..... 44
Figura 5 – Modos de transmissão. 47
Figura 6 – Modelo esquemático do módulo ATZB-24-A2. 48
Figura 7 – Arquitetura básica de uma rede GSM. 50
Figura 8 – Arquitetura rede GSM + GPRS..... 52
Figura 9 – Módulo Telit GM862-GPS..... 53
Figura 10 – Diagrama funcional do sistema de WSHM proposto..... 60
Figura 11 – Esquema funcional do NSI..... 61
Figura 12 – Interface UART: PIC18F2553 e transceptor ZigBit ATZB-24-A2. 64
Figura 13 – Modelo de circuito impresso: (a: acima) do núcleo computacional + módulo do sinal de excitação, (b: abaixo) do módulo de medição. 66
Figura 14 – Protótipo do hardware do NSI..... 66
Figura 15 – Diagrama funcional do de enlace..... 67
Figura 16 – Interface UART2: PIC18F45K22 e transceptor ZigBit ATZB-24-A2. 68
Figura 17 – Interface UART1: PIC18F2553 e transceptor GM862-GPS..... 69
Figura 18 – Protótipo de hardware da unidade de enlace..... 70
Figura 19 – Interface do centro de monitoramento remoto de fácil utilização..... 72
Figura 20 – Arquitetura de software para o núcleo computacional do NSI. 73
Figura 21 – Arquitetura de software para o núcleo computacional do nó de enlace..... 74
Figura 22 – Diagrama de estado para comunicação sem fio do NSI..... 77
Figura 23 – Diagrama de estado para comunicação sem fio do nó de enlace. 78
Figura 24 – Estrutura/PZT e porca de aço..... 80
Figura 25 – Assinaturas de tensão rms para a faixa de frequência de 17–33 kHz. 80
Figura 26 – Assinaturas de tensão rms para a faixa de frequência de 120–140 kHz. 81
Figura 27 – Assinaturas de tensão rms para (a) faixa de frequências baixas e (b) faixa de frequências altas. 81

Figura 28 – Índices (a) RMSD e (b) CCDM obtidos para as condições de estrutura íntegra e com danos localizados às distâncias de 10, 20, 30, e 40 cm do transdutor piezelétrico. 82
Figura 29 – Típica influência da temperatura sobre algumas propriedades das piezo-cerâmicas PSI-5A e PSI-5H: (a) constante dielétrica, (b) constante piezelétrica relativa. 86
Figura 30 – Fotografia da câmara climática modelo SM-8-8200 da Thermotron. 89
Figura 31 – Função de carregamento de temperatura usado na câmara climática. 89
Figura 32 – Assinaturas baseline: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz. 90
Figura 33 – Assinaturas com carga localizada a 30 cm: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz. 91
Figura 34 – Assinaturas do PZT solto: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz. 91
Figura 35 – Fluxograma para determinar o valor efetivo de deslocamento de frequência. 93
Figura 36 – Cálculo do deslocamento efetivo para a assinatura de monitoramento a 0ºC. 94
Figura 37 – Assinaturas baseline nominal compensado para 0ºC. 95
Figura 38 – Índices RMSD e CCDM antes e depois de aplicar o método de compensação a 0ºC. 95
Figura 39 – Cálculo do deslocamento efetivo para a assinatura de monitoramento a 60ºC. 96
Figura 40 – Assinaturas baseline nominal compensado para 60ºC. 96
Figura 41 – Índices RMSD e CCDM antes e depois de aplicar o método de compensação a 60ºC. 97
Figura 42 – Modelos para estimar Δf: (a) na assinatura baseline nominal, (b) na assinatura do PZT solto. 97
Figura 43 – Assinaturas do PZT solto: (a) em perspectiva 3D, (b) Temperatura vs. frequência. 99
Figura 44 – Assinaturas baseline: (a) em perspectiva 3D, (b) Temperatura vs. Frequência. 99

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação entre as principais tecnologias sem fio. 40
Tabela 2 – Parâmetros básicos do *hardware* do NSI. 65
Tabela 3 – Parâmetros básicos do *hardware* do nó de enlace..... 69

Lista de Siglas

802.15.4	The IEEE 802.15.4-2003 standard applicable to low-rate wireless Personal Area Network
AC	Alternating Current – Corrente alternada
Ad-hoc	Apenas para este propósito
AES	Advanced Encryption Standard
AODV	Protocolo de roteamento
API	Application Programming Interface
APL	Camada de aplicação
APN	Access Point Name
APS	Subcamada de suporte às aplicações
AT	ATention command
backbon	Rede de transporte
BCD	Binary-Coded Decimal – Decimal representado em binário
beacon	Farol para balizar uma comunicação
Bluethooth	Especificação industrial para áreas de redes pessoais sem fio WPAN (IEEE 802.15.1)
bps	Bits por segundo
BSC	Controlador de estação base
BSP	Board Support Package
BSS	Base Station Sub-system
BTS	Estação transceptora base
CAD	Conversor Analógico-Digital
CCDM	Correlation Coefficient Deviation Metric – Desvio do coeficiente de correlação
CDA	Conversor Digital-Analógico
CSMA	Carrier Sense Multiple Access – Acesso múltiplo com sensoriamento da portadora
DAC	Digital-to-Analog Converter – Conversor digital-analógico
DAQ	Data Acquisition – Dispositivo de aquisição de dados
DC	Direct Current – Corrente contínua
DDS	Direct Digital Synthesizer – Sintetizador digital direto

DFT	Discrete Fourier Transform – Transformada de Fourier discreta
DSP	Digital Signal Processor – Processador digital de sinais
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum - Espalhamento espectral em sequência direta
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EMI	Impedância Eletromecânica
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frecuency Division Multiple Access – Acesso ao meio por divisão de frequência
FFD	Full Function Device - Dispositivos de funções completas
FFT	Fast Fourier Transform – Transformada rápida de Fourier
FRF	Frequency Response Function – Função de resposta em frequência
FTP	File Transfer Protocol - Protocolo de transferência de arquivos
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GPIB	General Purpose Interface Bus
GPIO	General Purpose Input/Output
GPRS	General Packet Radio Service - Serviço geral de radiocomunicação por pacote
GPRS-CN	General Packet Service Core Network
GPS	Global Positioning System – Sistema de posicionamento global
GSM	Global System for Mobile Communications - Sistema global para comunicações móveis
HAL	Hardware Abstraction Layer
HP4192A	Analisador de Impedância do Hewlet Packard
HP4194A	Analisador de Impedância do Hewlet Packard
HTTP	Hypertext Transfer Protocol - Protocolo de transferência de hipertexto
Hw	Hardware
I2C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IRQ	Interrupt Request
ISM	Industrial, Scientific and Medical radio band
kbps	kilo bits por segundo
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LAN	Local Area Network – Rede de area local
LPF	Low-Pass Filter – Filtro passa-baixas

MAC	Media Access Control layer – camada de controle de acesso ao meio
MCU	Microcontroller Unit
MS	Mobile Station - Estação móvel
NASA	Nacional Aeronautics and Space Administration
NAT	Network address translator
NDE	Non-Destructive Evaluation – Avaliação não destrutiva
NSI	Nó Sensor Inteligente
NSS	Network and Switching Sub-system
NWK	Network layer - camada de rede
OMSS	Operation Sub-system
OPAMP	Operational Amplifier – Amplificador operacional
OSI	Interconexão de sistemas abertos
P2P	Ponto-a-ponto
PAN	Personal Area Network
PC	Personal Computer – Computador pessoal
PCB	Printed Circuit Board
PCU	Packet Control Unit
PDU	Protocol Data Unit
peer-to-peer	Entre pares (ponto a ponto)
PHY	Physical layer – camada física
PIC	Peripherical Interface Controller
PLL	Phase–Locked Loop
PPP	Point to Point Protocol
PROM	Programmable Read-Only Memory
PSD	Packet-Switching Domain
PSTN	Public Switched Telephone Network - rede telefônica pública comutada
PWM	Pulse Width Modulation – Modulação por largura de pulso
PZT	Pb-Lead Zirconate Titanate – Titanato zirconato de chumbo
RAM	Random Access Memory
RF	Radio Frequency - Rádio Frequência
RFD	Reduced Function Device - Dispositivos de funções reduzidas
RISC	Reduced Instruction Set Computer.
RMS, rms	Root mean square – valor quadrático médio ou valor eficaz
RMSD	Root Mean Square Deviation – Desvio da raiz media quadrática

RS232	Interface de comunicação serial
RSSF	Rede de sensores sem fio
RX	Receiver
SAP	ponto de acesso de serviço
SGSN	Serving GPRS Support Node
SHM	Structural Health Monitoring – Monitoramento de integridade estrutural
SIM	Circuito impresso do tipo smart card utilizado para identificar, controlar e armazenar dados de telefones celulares de tecnologia GSM.
SMS	Short Message Service
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol – Protocolo de transferência de correio simples
SPI	Serial Peripherical Interface – Interface de periféricos seriais
SRAM	Static Random Access Memory.
SSID	Service Set IDentifier
Sw	Software
TDMA	Time Division Multiple Access – Acesso ao meio por divisão do tempo
TSSOP	Thin Shrink Small Outline Package
TX	Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
WAP	Wireless Application Protocol – Protocolo de aplicação sem fio
Wi-Fi	Padrão IEEE 802.11g
Wireless	Sem fio
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WSHM	Wireless SHM
ZC	Coordenador ZigBee
ZDO	Dispositivo objeto ZigBee
ZED	Dispositivo final ZigBee
ZigBee	Wireless networking standards
ZigBee Pro	Wireless networking standards targeted at low-power applications
ZigBit	Modelo de transceptor de ATMEL
ZR	Roteador ZigBee

Sumário

Capítulo 1	**INTRODUÇÃO**	17
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	19
1.3	ESTRUTURA DA TESE	20
Capítulo 2	**IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS E SHM**	21
2.1	INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE SHM	21
2.2	FUNDAMENTOS DA PIEZELETRICIDADE	23
2.2.1	**O efeito piezelétrico**	23
2.2.2	**Teoria da piezeletricidade**	24
2.2.3	**Transdutores cerâmicos de PZT**	25
2.3	TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA (EMI)	27
2.4	DETECÇÃO DE DANO BASEADA NA TENSÃO RMS DO TRANSDUTOR	29
2.5	MÉTRICAS PARA DETECÇÃO DE DANO	31
2.6	REVISÃO DA LITERATURA	32
Capítulo 3	**FUNDAMENTOS DE RSSF E COMUNICAÇÕES MÓVEIS**	36
3.1	INTRODUÇÃO ÀS RSSF	36
3.1.1	**Nó sensor**	37
3.1.2	**Arquitetura de uma RSSF**	37
3.1.3	**Métodos de acesso ao meio para RSSFs**	38
3.1.4	**Tecnologias padrões para RSSFs**	39
3.2	O PADRÃO ZIGBEE	41
3.2.1	**Arquitetura da pilha ZigBee**	41
3.2.2	**Dispositivos de uma rede ZigBee**	43
3.2.3	**Topologias de uma rede ZigBee**	44
3.2.4	**Formação da rede ZigBee**	45
3.2.5	**Endereçamento de dispositivos**	46
3.2.6	**Modos de transmissão**	47

3.2.7 **Modos de operação** 47
3.2.8 **O módulo ZigBit ATZB-24-A2** 48
3.3 SISTEMA DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS 49
3.3.1 **A rede GSM** 49
3.3.2 **Arquitetura da rede GSM** 50
3.3.3 **A tecnologia GPRS** 51
3.3.4 **Arquitetura da rede GPRS** 51
3.3.5 **O módulo Telit GM862-GPS** 53

Capítulo 4 **PROPOSTA DE UM SISTEMA DE WSHM** 55
4.1 INTRODUÇÃO 55
4.2 HARDWARE DO SISTEMA DE WSHM PROPOSTO 60
4.2.1 **Hardware do NSI** 61
4.2.2 **Hardware do nó de enlace** 67
4.3 SOFTWARE DO SISTEMA DE WSHM PROPOSTO 70
4.3.1 **Software de computador para o centro de monitoramento remoto** 71
4.3.2 **Firmware do NSI** 72
4.3.3 **Firmware do nó de enlace** 74
4.3.4 **Protocolos de comunicação sem fio para o NSI e nó de enlace** 77
4.4 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL 79
4.5 CONCLUSÃO 83

Capítulo 5 **COMPENSAÇÃO PARA OS EFEITOS DA TEMPERATURA** 85
5.1 INTRODUÇÃO 85
5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 88
5.2.1 **Corpo de prova sob carregamento de temperatura** 89
5.2.2 **Aquisição dos dados de tensão RMS** 90
5.3 COMPENSAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA 92
5.3.1 **Algoritmo para a etapa de pré-monitoramento** 93
5.3.2 **Algoritmo para a etapa de SHM** 94
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 94
5.4.1 **Caracterização do valor efetivo de deslocamento de frequência** 97
5.4.2 **Características do efeito da variação de temperatura** 98
5.5 CONCLUSÃO 100

Capítulo 6 **CONCLUSÕES** 101
6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS 101
6.2 TRABALHOS FUTUROS 103

Referências 105

Apêndice A 117

Capítulo 1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As sociedades modernas são fortemente dependentes de sistemas estruturais e mecânicos, tais como aviões, pontes, sistemas de geração de energia, máquinas rotativas, plataformas de petróleo, edifícios e sistemas de defesa. Durante sua vida útil, esses sistemas ficam expostos a numerosos fatores que podem afetar seu desempenho, sendo necessário avaliar periodicamente a integridade estrutural sob padrões de operação e segurança. Como muitos desses sistemas não podem ser substituídos por motivos econômicos, continuam sendo utilizados apesar do longo tempo de vida e da possibilidade de apresentarem danos que podem afetar o desempenho ou colocar em risco a segurança dos usuários. Além disso, em termos de concepção e introdução de novos sistemas de engenharia, existem novos materiais incorporados cujos processos de degradação a longo prazo ainda não são bem compreendidos. Por outro lado, no esforço para desenvolver projetos mais rentáveis, esses novos sistemas podem ser construídos com margens de segurança inferiores. Assim, as técnicas para detecção de danos estão sendo desenvolvidas e implementadas de modo que os sistemas possam continuar sendo utilizados com segurança quando sua operação se estende além da vida útil. Essas circunstâncias exigem que os danos incipientes devam ser detectados com a maior brevidade possível, em um esforço para evitar falhas que podem provocar graves consequências. Portanto, os sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM: *Structural Health Monitoring*) têm atraído um grande número de pesquisadores acadêmicos e industriais, considerando-se uma área de pesquisa muito importante, do ponto de vista econômico e de segurança, nos últimos anos.

O SHM é definido na literatura como a aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões de gestão durante o ciclo de vida de uma estrutura (FARRAR; WORDEN, 2013). O objetivo principal de um sistema de SHM é detectar e interpretar “mudanças”, se possível, em condições normais de operação, usando técnicas de avaliação não destrutivas (NDE: *Non-Destructive Evaluation*), visando minimizar custos de reparo e manutenção e para proporcionar um maior nível de segurança aos usuários, evitando possíveis falhas catastróficas. O principal desafio na concepção de um sistema de SHM é saber quais “mudanças” (danos) tem sofrido uma estrutura particular e como identificá-las. Assim, a escolha do transdutor representa um passo importante na definição da arquitetura e componentes do sistema de SHM. Existem muitos tipos de transdutores que detectam danos

através de uma variedade de técnicas, alguns mais eficazes do que outros. Os transdutores piezelétricos de titanato zirconato de chumbo (PZT: *Pb-lead Zirconate Titanate*) tornaram-se de particular interesse devido à sua versatilidade, adaptabilidade, baixo consumo de energia e elevada largura de banda.

Neste contexto, o método de SHM baseado na impedância eletromecânica (EMI: *Electro-Mechanical Impedance*) tem sido considerado como um dos mais promissores e se destaca por sua simplicidade e por utilizar componentes de baixo custo, tais como os transdutores piezelétricos de PZT. As aplicações típicas de SHM geralmente utilizam analisadores de impedância comerciais de alto custo ou sistemas de medição de impedância baseados na função de resposta em frequência (FRF: *Frequency Response Function*). Esses sistemas chegam a ser proibitivos para muitas aplicações por precisarem de dispositivos DAQ (*Data Acquisition*) com elevadas taxas de amostragem e/ou Processador Digital de Sinais (DSP: *Digital Signal Processor*) ou computador digital, para processar informação no domínio da frequência. Além do custo elevado, é necessário, em alguns casos, armazenar dados do sinal de excitação. Portanto, eles precisam de maiores capacidades de armazenamento de dados.

Neste trabalho é desenvolvido e implementado um novo sistema de SHM para detecção de danos em estruturas que usa o princípio da EMI. A abordagem para detectar danos consiste em registrar e avaliar só as variações apresentadas na tensão eficaz (rms: *root mean square*) de transdutores piezelétricos, quando eles são excitados por sinais elétricos senoidais em uma determinada faixa de frequência. Assim, o sistema proposto visa ser mais simples e barato, uma vez que não necessita calcular, de fato, a impedância elétrica e não depende da taxa de amostragem.

Por outro lado, considerando o tamanho das estruturas, os tipos de danos que se pretendem detectar e a área de ação dos transdutores, em geral, um sistema de SHM consiste de uma rede de sensores para aquisição de dados, para avaliar em tempo real as condições da estrutura. Em termos práticos, quando o tamanho do sistema de monitoramento cresce, aumenta o número de sensores ou atuadores e sua distribuição numa estrutura; e colocar cabos adicionais pode causar aumentos significativos no tempo e nos custos de instalação. Neste contexto, uma rede de sensores sem fio (RSSF) é a tecnologia apropriada para monitorar estruturas, principalmente para monitorar áreas de difícil acesso. Em comparação com seus homólogos naturais (isto é, sistemas com fio), as RSSFs mantêm a promessa de revolucionar a detecção de dados para uma ampla gama de aplicações, devido a sua confiabilidade, sincronização de tempo, precisão, flexibilidade, custo-benefício, processamento local de dados e facilidade de implantação (maior densidade de sensores e maior acessibilidade). Para aliviar o inconveniente

do consumo de energia, ponto-chave no projeto de RSSFs, tem-se como proposta as RSSFs baseadas na tecnologia ZigBee.

Assim, neste trabalho é desenvolvido e implementado uma RSSF de alcance global. Os principais componentes da RSSF proposta neste trabalho são: o nó sensor inteligente (NSI), um nó de enlace, um servidor HTTP e o centro de monitoramento remoto (computador pessoal). O NSI é de baixo consumo de energia e baixa taxa de transferência de dados, possui um transceptor sem fio com tecnologia ZigBee e tem a capacidade de monitorar zonas da estrutura com até 16 sensores, interrogando um sensor por vez.

Embora os sinais de resposta de transdutores piezelétricos tenham sido aplicados com sucesso nas técnicas de detecção de danos em estruturas de laboratório, em aplicações práticas, porém, as alterações desses sinais podem ter outras causas além do dano como, por exemplo, as mudanças nas condições ambientais, principalmente da temperatura. As diferentes propriedades elásticas, dielétricas, piezelétricas e piroelétricas dos materiais piezelétricos são influenciadas de forma distinta pelas variações da temperatura, dependendo da composição a da técnica de produção. Nas estruturas, o módulo de elasticidade (módulo de Young) e o coeficiente de Poisson, que também mudam com a temperatura, provocam mudanças na resposta dinâmica da estrutura, como as frequências naturais e os modos de vibração.

Finalmente, uma outra contribuição do sistema proposto consiste em realizar a compensação automática dos sinais de resposta do transdutor devido ao efeito da variação de temperatura, visando evitar as falsas indicações de dano.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho visa contribuir com o desenvolvimento e implementação de um sistema de SHM sem fio (WSHM: *Wireless SHM*) de acesso remoto e cobertura global. Para atingi-lo, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Aperfeiçoar o sistema para detecção de falhas proposto por Cortez (2012) para obter um NSI portátil, capaz de detectar danos em estruturas com base na análise de tensões *rms* de transdutores piezelétricos. O NSI deve ter capacidade de excitar e obter resposta de até 16 transdutores piezelétricos e operar numa faixa de frequência de 5–250 kHz;
- Desenvolver e implementar uma RSSF de alcance global que integra uma rede ZigBee com uma rede GSM/GPRS (Global System for Mobile Communications/General Packet Radio Services – Sistema Global para Comunicações Móveis/Serviço de Rádio de Pacote

Geral), composta por NSIs, um nó de enlace, um servidor HTTP e um centro de monitoramento remoto (PC ou notebook);

- Desenvolver e implementar algoritmos para compensar automaticamente as variações nas assinaturas de tensão *rms* de transdutores piezelétricos devidas à variação de temperatura, visando evitar os falsos positivos (falsa indicação de dano).

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O conteúdo desta tese está organizado em seis capítulos, conforme descrito a seguir.

Neste primeiro capítulo é apresentado o escopo do trabalho, as motivações para sua realização, os objetivos e as contribuições.

No Capítulo 2 são apresentados uma introdução aos sistemas de SHM, os fundamentos da piezeletricidade, a técnica da EMI, a técnica para detecção de danos baseada na análise de tensões *rms* de transdutores piezelétricos e, para finalizar, uma revisão da literatura apontando algumas aplicações práticas no contexto dos sistemas de SHM baseados na técnica da EMI.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos das RSSFs, a tecnologia ZigBee e as características principais das redes de comunicações móveis GSM/GPRS.

No Capítulo 4 são apresentados os métodos, procedimentos e materiais empregados para implementar o sistema de WSHM proposto; e são presentados e discutidos os resultados experimentais.

O Capítulo 5 concentra-se no método da compensação das tensões *rms* de transdutores piezelétricos devido ao efeito da variação de temperatura ambiente, apresentando sua procedência, os algoritmos para sua implementação e os resultados experimentais ao monitorar uma estrutura de alumínio.

Finalmente, o Capítulo 6 fornece um resumo do trabalho realizado; são discutidas as conclusões juntamente com as recomendações para trabalhos futuros no desenvolvimento de sistemas de WSHM.

Capítulo 2 IDENTIFICAÇÃO DE DANOS EM ESTRUTURAS E SHM

Nestes últimos anos, o significativo progresso no desenvolvimento e implementação de sistemas de SHM é claramente perceptível, particularmente nas áreas de quantificação de dados através de novas técnicas de detecção, verificação e validação desses sistemas usando dados de laboratório e testes em campo. Os sistemas de SHM baseados na técnica da EMI continuam a ser uma ferramenta promissora nos métodos de NDE e, utilizando os benefícios dos transdutores piezelétricos, são amplamente utilizados para identificação de danos estruturais em tempo real ou em intervalos de tempo estabelecidos.

Neste capítulo faz-se uma introdução sucinta aos sistemas de SHM, os fundamentos de operação das cerâmicas de PZT, as principais características da técnica da EMI, algumas aplicações práticas e uma descrição do método de detecção de danos baseado na análise de tensões *rms* de transdutores piezelétricos.

2.1 INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS DE SHM

Praticamente todas as indústrias privadas e governamentais desejam detectar danos incipientes em seus produtos, bem como na sua infraestrutura de produção. As principais motivações são a segurança e o impacto econômico. Como exemplo, a indústria de fabricação de semicondutores está adotando essa tecnologia para minimizar a necessidade de usar maquinaria redundante a fim de evitar paralisações inadvertidas em suas plantas de fabricação. Esse tempo de inatividade pode significar, para essas empresas, a perda de milhões de dólares por hora. As empresas aeroespaciais, juntamente com as agências governamentais nos Estados Unidos, estão investigando a tecnologia de SHM para a detecção de danos em superfícies dos elementos de controle de naves espaciais ocultos por blindagens térmicas. Assim, é claro que a detecção de danos tem implicações significativas no aspecto da segurança. Além disso, como um exemplo a partir do contexto de engenharia civil, não existem, atualmente, métodos quantificáveis para determinar se os edifícios são seguros para serem reocupados após um terremoto significativo (FARRAR; WORDEN, 2013).

O SHM é uma tecnologia usada para automatizar os processos de inspeção mediante a análise e avaliação do estado da integridade de estruturas, em tempo real ou em intervalos de tempo definidos, tornando-se um elemento importante em algumas atividades de manutenção e

inspeção na indústria, tais como em estruturas aeronáuticas e aeroespaciais, infraestruturas civis, grandes estruturas marítimas e outros. A indústria aeroespacial tem um dos investimentos mais elevados para a pesquisa e desenvolvimento de sistemas de SHM. Várias organizações, como a Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA: *National Aeronautics and Space Administration*), endossaram grandes projetos de pesquisa relacionados com o SHM de estruturas aeroespaciais. Embora as condições adequadas de operação e um elevado nível de segurança em uma aeronave sejam garantidos por critérios exigentes de certificação, um sistema de SHM poderia reduzir significativamente os custos de reparo e manutenção, pela detecção de danos em estágio inicial, que representam, segundo Kessler et al. (2002), 27% do custo de seu ciclo de vida.

O SHM é definido na literatura como a aquisição, validação e análise de dados técnicos para facilitar as decisões de gestão durante o ciclo de vida de uma estrutura (FARRAR; WORDEN, 2013). Em geral, *integridade* é o estado da estrutura que permite a sua operação adequada com desempenho satisfatório; *monitoramento* é o processo de diagnóstico e prognóstico; e *dano* é uma falha material, estrutural, ou funcional que afeta o desempenho presente ou futuro da estrutura (INMAN et al., 2005; STASZEWSKI; WORDEN, 2009).

Nos sistemas de SHM avançados é possível identificar até cinco processos, que são: detecção, classificação, localização, avaliação e prognóstico (RYTTER, 1993). A *detecção* fornece uma indicação qualitativa que os danos podem estar presentes, a *classificação* fornece informações sobre o tipo de dano, a *localização* fornece informações sobre a posição provável do dano, a *avaliação* estima a severidade do dano e, finalmente, o *prognóstico* fornece uma estimativa da vida residual da estrutura. Todos esses elementos exigem diferentes níveis de dados, sinais e/ou processamento de informações (STASZEWSKI; WORDEN, 2009).

A presença de danos em uma estrutura afeta sua resposta dinâmica devido às alterações na rigidez, na massa, dissipação de energia, impedância mecânica e/ou nas propriedades geométricas. Geralmente, os sistemas de SHM coletam os dados enquanto a estrutura está em condição dinâmica por meio de vibração forçada, utilizando excitadores eletrodinâmicos (*shakers*) ou transdutores piezelétricos, ao longo de uma faixa de frequência. Normalmente, é necessário ter um registro de dados da estrutura em estado íntegro, conhecido como assinatura *baseline*. Então, a identificação de dano é baseada na comparação das assinaturas correspondentes a dois estados da estrutura; sendo no primeiro estado a assinatura *baseline* e no segundo estado a assinatura com suposto dano, ambos obtidos para uma faixa de frequência mais sensível ao dano.

As principais técnicas utilizadas em sistemas de SHM têm origem nos métodos de NDE, tais como a EMI, a emissão acústica, a inspeção ultrassônica, a inspeção por raios-X, vácuo comparativo, ondas de Lamb, inspeção por partícula magnética, correntes parasitas e aquelas baseadas em fibra óptica (SOHN et al., 2004).

Como mencionado, este trabalho é baseado no princípio da EMI que se caracteriza por utilizar transdutores piezelétricos. Para uma melhor compreensão desses dispositivos, é realizado um estudo básico dos fundamentos da piezeletricidade e dos materiais piezelétricos em suas aplicações mais destacadas, apresentado na próxima seção.

2.2 FUNDAMENTOS DA PIEZELETRICIDADE

Os transdutores piezelétricos são amplamente utilizados como elementos sensores e/ou atuadores em diversas aplicações tecnológicas. Nas últimas décadas, esses transdutores têm sido usados em sistemas de SHM na fase de detecção de danos estruturais. Devido ao efeito piezelétrico, o par transdutor/estrutura (com transdutor colado na estrutura monitorada) apresenta acoplamento eletromecânico, que permite avaliar as mudanças mecânicas da estrutura a partir das propriedades elétricas do transdutor.

2.2.1 O efeito piezelétrico

O fenômeno da piezeletricidade foi descoberto em 1880 pelos irmãos Pierre e Jacques Curie. Eles verificaram que alguns cristais de quartzo, quando comprimidos em determinadas direções, apresentam cargas positivas e negativas sobre algumas partes da superfície. Essas cargas são proporcionais à pressão aplicada e desaparecem quando a pressão cessa.

A piezeletricidade descreve o fenômeno da geração de cargas elétricas em um material quando este é deformado mecanicamente, esse efeito é conhecido como *efeito piezelétrico direto*; o modo oposto descreve uma deformação mecânica em um material devido à aplicação de uma tensão elétrica; esse efeito é conhecido como *efeito piezelétrico inverso*. Ambos os efeitos são manifestações da mesma propriedade fundamental do cristal (CADY, 1946). Na prática, o efeito piezelétrico é utilizado nos modos de operação estático e dinâmico.

A descoberta do efeito piezelétrico tem motivado inúmeras investigações para o desenvolvimento de transdutores eletromecânicos. Os transdutores eletromecânicos são

dispositivos que convertem energia mecânica em energia elétrica (*efeito direto*) e energia elétrica em energia mecânica (*efeito inverso*).

Na atualidade, os materiais piezelétricos são utilizados como elementos sensores (forma passiva) e/ou atuadores (forma ativa) em aplicações tecnológicas desde baixa frequência (na faixa de poucos hertz) até frequências da ordem de GHz. As aplicações em baixas frequências são cobertas principalmente pelos materiais policristalinos (cerâmicos, polímeros ou compósitos). Cristais e filmes finos, por sua vez, são os mais utilizados em aplicações de altas frequências (EIRAS, 2004).

2.2.2 Teoria da piezeletricidade

Para compreender a operação dos transdutores piezelétricos é necessário conhecer as equações constitutivas que são utilizadas para descrever o acoplamento eletromecânico. As equações piezelétricas básicas podem ser obtidas a partir da energia livre de Gibbs (BERLINCOURT; CURRAN; JAFFE, 1964; BUSCH-VISHNIAC, 1999) como mostrado a seguir

$$D_m = d_{mi}^{H,\theta} T_i + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + p_m^{T,H} d\theta + m_{mk}^{T,\theta} H_k \tag{1}$$

$$S_i = s_{ij}^{E,H,\theta} T_j + d_{mi}^{H,\theta} E_m + d_{mi}^{E,\theta} H_m + \alpha_i^{E,H} d\theta \tag{2}$$

sendo que $d_{mi}^{H,\theta}$ são as constantes piezelétricas [m/V], $d_{mi}^{E,\theta}$ são as constantes piezomagnéticas [m/A], $p_m^{T,H}$ são as constantes piroelétricas [C/K.m^2], $m_{mk}^{T,\theta}$ são as constantes magneto-dielétricas [C/A.m], $\alpha_j^{E,H}$ são os coeficientes de expansão térmica [1/K], E_k e E_m são as componentes de campo elétrico [V/m], D_m são as componentes de deslocamento elétrico [C/m^2], H_k e H_m são os componentes de campo magnético [A/m], θ é a temperatura [K], S_i é o tensor de deformação mecânica, T_i é o tensor de tensão mecânica [N/m^2], $\varepsilon_{mk}^{T,H,\theta}$ é o tensor de permissividade dielétrica do material [C^2/N.m^2] e $s_{ij}^{E,H,\theta}$ é o tensor de compliância [m^2/N]. Os sobrescritos *E*, *H*, θ e *T* são para denotar que o campo elétrico, o campo magnético, a temperatura e a tensão mecânica são constantes. Considerando a simetria dos tensores, têm-se $i, j = 1, 2, ..., 6$ e $m, k = 1, 2, 3$.

Para um material piezelétrico padrão, é seguro assumir que os efeitos magnéticos são desprezíveis. Em muitos casos os efeitos térmicos são considerados desprezíveis, mas, nem

sempre é uma premissa certa, pois praticamente todos os materiais piezelétricos também são significativamente piroelétricos.

O comportamento dos materiais piezelétricos na gama linear pode ser explicado pela teoria linear de piezeletricidade. No caso de materiais não-ferroelétricos, como quartzo, essa teoria é muito precisa. Se os efeitos magnéticos e térmicos são considerados desprezíveis para pequenas mudanças nos parâmetros mecânicos e elétricos, a teoria linear de piezeletricidade (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE - ANSI/IEEE, 1987) é aplicável e a cerâmica piezelétrica é descrita pelo seguinte par de equações em notação tensorial.

$$D_m = d_{mi}\, T_i + \varepsilon^T_{mk}\, E_k \qquad (\textit{efeito direto}) \qquad (3)$$

$$S_i = s^E_{ij}\, T_j + d_{mi}\, E_m \qquad (\textit{efeito inverso}) \qquad (4)$$

As Equações (3) e (4) definem uma relação entre a tensão mecânica T_i, a deformação mecânica S_i, o campo elétrico E_k e o deslocamento elétrico D_m, que são acoplados através do coeficiente piezelétrico d_{mi}, da permissividade dielétrica ε^T_{mk} medida com tensão mecânica nula ($T = 0$) e do coeficiente de elasticidade s^E_{ij} medido com campo elétrico zero ($E = 0$). Em geral, a representação tensorial nas equações (3) e (4) resultaria em nove equações correspondentes aos componentes de deformação mecânica e direções de polarização respectivos. A simplificação das equações constitutivas é obtida considerando particularidades do material piezelétrico e sua interação com a estrutura a ser monitorada.

2.2.3 Transdutores cerâmicos de PZT

Estudos de soluções sólidas de $PbTiO_3$ e $PbZrO_3$, como os realizados por Jaffe, Roth e Marzullo (1954), Shirane, Suzuki e Takeda (1952) e Shirane e Takeda (1952), resultaram na obtenção das cerâmicas de PZT, que logo passaram a ser objeto de diversas investigações a fim de otimizar suas propriedades, ou como motivação para o desenvolvimento de novos compósitos cerâmicos.

As cerâmicas piezelétricas da família PZT ($PbTiO_3 \cdot PbZrO_3$) são largamente usadas em atuadores eletromecânicos, sensores, transdutores de ultrassom, entre outras aplicações (GALLEGO-JUÁREZ, 1989; ZHANG; ZHAO, 1999). Durante o processo de fabricação, a polarização da cerâmica de PZT consiste no aquecimento do material até ultrapassar sua temperatura de Curie. Em seguida, um intenso campo elétrico (20 kV/cm) é aplicado, o que faz

com que os dipolos se alinhem. A orientação do campo determina a orientação das propriedades piezelétricas obtidas. Assim, mantendo o campo elétrico constante, o material é resfriado abaixo de sua temperatura de Curie, fazendo com que os dipolos permaneçam permanentemente alinhados. Finalmente, o campo elétrico é retirado e o material fica polarizado. (RISTIC, 1983).

A vantagem das cerâmicas de PZT é que as suas características físicas, químicas e piezelétricas podem ser ajustadas conforme a aplicação. Elas podem ainda ser confeccionadas em uma infinidade de formatos por causa do processo de fabricação por aglomeração de partículas. O PZT é um material piezelétrico muito utilizado em estruturas inteligentes por causa de sua versatilidade, sua alta temperatura de Curie e de suas fortes características piezelétricas, entre outros fatores.

Por se tratar de uma cerâmica, a rigidez de uma pastilha de PZT geralmente é superior à da estrutura na qual ela está inserida, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência (acima de 80%), tornando-as eficientes em aplicações como atuadores. O PZT é ainda recomendado como atuador com autodetecção, particularmente no controle e identificação de danos em grandes faixas de frequência (BANKS; SMITH; WANG, 1996). As pastilhas de PZT exigem tensões de nível muito baixo, tipicamente menores de 1 V, para aplicar excitações de alta frequência sobre a estrutura monitorada (BAPTISTA; VIEIRA FILHO; INMAN, 2010; PARK; FARRAR, 2009).

Quando comparadas com outros materiais piezelétricos, as cerâmicas de PZT apresentam as seguintes vantagens: bom acoplamento eletromecânico, boa estabilidade, alta rigidez, resposta linear para campo elétrico de baixa intensidade e baixo custo (LIN; GIURGIUTIU, 2006). Devido a sua superioridade em serem ajustáveis a taxas muito altas de carregamento e de serem moldáveis a qualquer forma arbitrária, essas cerâmicas dominam o mercado de transdutores de hoje, faturando cerca de US $ 10 bilhões no mundo todo (KALIAPPAN; SIVAKUMAR, 2009).

Geralmente, os transdutores piezelétricos utilizados em aplicações de SHM são constituídos por pequenas placas delgadas de cerâmicas de PZT revestidas, em ambas as faces, por um filme metálico que serve como eletrodo. Esses transdutores são cortados na forma e tamanho desejados para se adaptarem à estrutura a ser monitorada (sites de referência de alguns fabricantes: www.atcp.com.br; www.americanpiezo.com; www.murata.com; www.piezo.com; www.piezotechnologies.com; www.smart-material.com;). Devido ao seu bom acoplamento eletromecânico, é o elemento fundamental para implementar a técnica da EMI analisada na próxima seção.

2.3 TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA (EMI)

A técnica da EMI é uma forma de NDE baseada na FRF que se destaca por sua simplicidade e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo, vem sendo desenvolvida como uma ferramenta promissora para identificação de danos estruturais em tempo real (ANNAMDAS; RADHIKA, 2013; PARK; FARRAR, 2009; PARK et al., 2003).

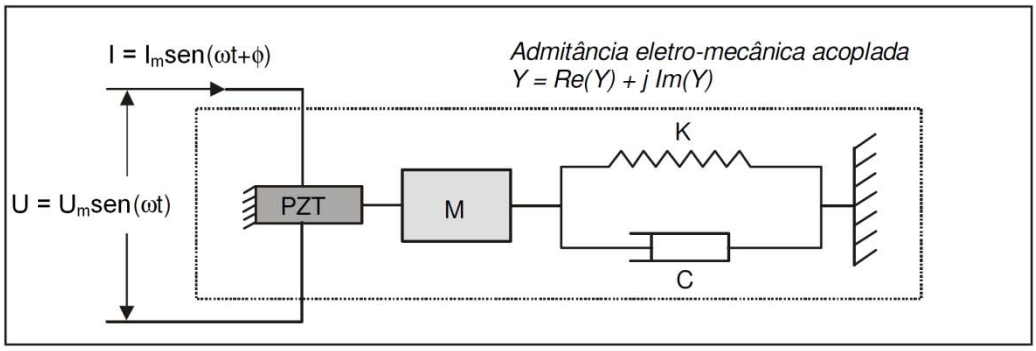
Para detectar e localizar danos em uma estrutura empregam-se atuadores/sensores piezelétricos para excitar/medir a impedância elétrica em faixas de altas frequências (tipicamente acima de 10 kHz). Esses transdutores, geralmente cerâmicas de PZT, são colados na estrutura a ser monitorada por meio de um adesivo de alta rigidez a base de cianoacrilato ou uma resina de epóxi. O transdutor colado na estrutura é alimentado por um campo elétrico alternado de amplitude fixa que excita e induz vibrações na estrutura (efeito piezelétrico inverso); as vibrações resultantes induzem campo elétrico no transdutor (efeito piezelétrico direto). O transdutor piezelétrico como atuador permite induzir vibrações na estrutura e como sensor permite medir tensão de resposta. O fato de utilizar o mesmo elemento transdutor como sensor e atuador não somente reduz o número de componentes, como também os fios associados a cada um (PARK et al., 2003).

Como as medições diretas da impedância mecânica de uma estrutura são de difícil obtenção, devido ao efeito piezelétrico é estabelecida uma relação entre as propriedades mecânicas da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Logo, é possível monitorar a resposta dinâmica da estrutura através da medição da impedância elétrica (CAWLEY, 1984).

Um modelo eletromecânico, que quantitativamente descreve o processo de medição de impedância, é apresentado na Figura 1. O transdutor piezelétrico é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta à aplicação de tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixa e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade.

Na Figura 1, M é a massa, K é a constante elástica da mola e C o coeficiente de amortecimento. O transdutor é excitado por uma fonte de tensão senoidal U com amplitude U_m e frequência angular ω que produz uma corrente I com amplitude I_m e fase ϕ. Considerando que as propriedades do transdutor sejam invariáveis no tempo, qualquer mudança na estrutura irá afetar o valor da impedância do sistema.

Figura 1 – Modelo unidimensional usado representar a interação eletromecânica do acoplamento PZT/Estrutura.



Fonte: (LIANG; SUN; ROGERS, 1994).

A solução do sistema apresentado na Figura 1 em termos da impedância elétrica do transdutor é dada, de acordo com Liang, Sun e Rogers (1994), pela seguinte equação

$$Z_E(\omega) = \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{I}} = \frac{1}{i\,\omega\,a}\left(\bar{\varepsilon}_{33}^{T}\left(1 - i\delta\right) - \frac{Z(\omega)}{Z(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^{E} \right)^{-1} \tag{5}$$

sendo i a unidade imaginária, Z_E a impedância elétrica, Z e Z_a são as impedâncias mecânicas da estrutura monitorada e do transdutor, respectivamente, a uma constante geométrica, $\bar{\varepsilon}_{33}^{T}$ a constante dielétrica a tensão mecânica constante, δ é o coeficiente de perda dielétrica, $\hat{Y}_{xx}^{E}$ o módulo de Young a um campo elétrico constante e d_{3x} a constante piezelétrica na direção arbitrária x.

De acordo com a Equação (5), qualquer alteração na impedância mecânica da estrutura provocada por um dano implica uma variação correspondente na impedância eletromecânica do conjunto. Portanto, a técnica da EMI permite que a integridade da estrutura seja avaliada de uma maneira simples através da medição da impedância elétrica do transdutor piezelétrico.

É importante notar que a complexidade dos espectros da EMI depende da geometria da estrutura e sua composição. As assinaturas de admitância refletem o comportamento de ressonância e, para estruturas com geometria simples, possuem picos bem separados na faixa de baixa frequência. A impedância é inversamente proporcional à admitância e, portanto, indica uma resistência estrutural dependente da frequência para a excitação aplicada (ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2009).

O primeiro termo da Equação (5) reescrito em forma de uma admitância fica como segue

$$Y_{1E}(\omega) = i\,\omega\,a\left[\,\bar{\varepsilon}_{33}^{T}\left(1 - i\delta\right)\right] \tag{6}$$

Na Equação (6), $Y_{1E}(\omega)$ é a susceptância capacitiva do PZT livre. Neste termo, a constante dielétrica, $\bar{\varepsilon}_{33}^{T}$, é conhecida por variar significativamente com a temperatura. Assim, uma mudança na temperatura irá causar uma mudança gradual na assinatura da admitância elétrica, na faixa de frequência, devido à variação da constante dielétrica com a temperatura (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996).

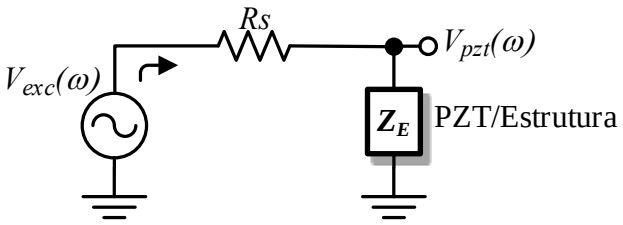
Deve-se notar que a impedância mecânica da estrutura também é dependente da temperatura. De fato, o módulo de Young varia ligeiramente com a temperatura e a expansão térmica do material pode induzir tensão mecânica em estruturas restritas. O principal efeito provocado pelas variações das propriedades estruturais é a mudança das frequências de ressonância estruturais, ou seja, o deslocamento dos picos de ressonância da admitância ao longo da frequência (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996).

2.4 DETECÇÃO DE DANO BASEADA NA TENSÃO RMS DO TRANSDUTOR

As técnicas baseadas no princípio da EMI continuam sendo amplamente pesquisadas e diversos circuitos têm sido propostos para a medição da impedância elétrica de transdutores piezelétricos com precisão (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009; FINZI NETO et al., 2011; PEAIRS; PARK; INMAN, 2002, 2004; XU; GIURGIUTIU, 2005). No entanto, um método eficiente de SHM baseado na impedância não tem que medir a impedância elétrica em si, mas apenas medir a sua variação (VIEIRA FILHO et al., 2011).

Nesta seção, o circuito usado para excitar e obter o sinal de resposta do transdutor é o da Figura 2. Embora existam outros sistemas de SHM usando esse tipo de circuito, também foi usado para desenvolver um novo método para detecção de danos baseado em uma simples análise comparativa de tensões *rms* de transdutores piezelétricos (CORTEZ, 2012).

Figura 2 – Circuito de excitação para o acoplamento PZT/Estrutura.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A seguir, apresenta-se uma fundamentação mais detalhada do método proposto por Cortez (2012).

Para um transdutor piezelétrico colado em uma estrutura e excitado com um sinal senoidal de frequência única, f_{exc}, um modo simples de calcular a magnitude da impedância elétrica, $|Z_E(\omega)|$, é usando a Equação (7).

$$|Z_E(\omega)| = \frac{V_{pzt_rms}(\omega)}{I_{pzt_rms}(\omega)}, \qquad \omega = 2\pi f_{exc} \tag{7}$$

sendo que $V_{pzt_rms}(\omega)$ é a tensão *rms* de resposta no transdutor, $I_{pzt_rms}(\omega)$ é a corrente *rms* e ω é a frequência angular.

A impedância elétrica é uma grandeza bidimensional que expressa uma função de valores complexos que depende da frequência, podendo ser representada em termos das partes real (resistência) e imaginária (reatância) ou magnitude e fase.

Com base na Figura 2 e no pressuposto que as partes real e imaginaria de Z_E sejam conhecidas, como representado na Equação (8), a impedância total do circuito, Z_T, é representada na Equação (9) e sua magnitude, $|Z_T|$, é representada na Equação (10).

$$Z_E(\omega) = R_E(\omega) + i\,X_E(\omega) \tag{8}$$

$$Z_T(\omega) = R_S + R_E(\omega) + i\,X_E(\omega) \tag{9}$$

$$|Z_T(\omega)| = \sqrt{R_S^2 + 2R_S.R_E(\omega) + |Z_E(\omega)|^2} \tag{10}$$

sendo *Rs* um resistor de precisão usado para limitar a intensidade de corrente através do transdutor.

Assim, a tensão *rms* de resposta do transdutor pode ser calculada como segue

$$V_{pzt_rms}(\omega) = \frac{|Z_E(\omega)|}{|Z_T(\omega)|} * V_{exc_rms}(\omega), \tag{11}$$

e substituindo a Equação (10) em (11), pode ser representada através da Equação (12).

$$V_{pzt_rms}(\omega) = \frac{|Z_E(\omega)|}{\sqrt{R_S^2 + 2R_S * R_E(\omega) + |Z_E(\omega)|^2}} * V_{exc_rms}(\omega) \tag{12}$$

Na Equação (12), em regime permanente e considerando que a tensão de excitação V_{exc} é fixa em amplitude para cada frequência ω, pode-se inferir que a tensão V_{pzt} irá mudar somente

se a impedância Z_E mudar, o que ocorre quando a estrutura sofre qualquer alteração na sua resposta dinâmica, que pode ser pela presença de dano. Assim, qualquer variação na impedância do acoplamento PZT/Estrutura refletirá em uma alteração no valor da tensão *rms do* transdutor. Desta forma, o sinal V_{pzt_rms} pode ser diretamente relacionado com a integridade da estrutura monitorada.

Portanto, nessa abordagem demonstra-se que a análise da variação da tensão elétrica do transdutor piezelétrico é suficiente para detectar danos estruturais. No entanto, existem métricas para avaliar quantitativamente essas variações, como as que são apresentadas na seção seguinte.

2.5 MÉTRICAS PARA DETECÇÃO DE DANO

A identificação do dano é feita comparando as assinaturas de resposta do transdutor medidas com a estrutura em estado íntegro (condição inicial) e após ter sofrido um possível dano. A assinatura obtida quando a estrutura se encontra em estado íntegro chama-se assinatura *baseline*, e a assinatura obtida quando a estrutura se encontra sob inspeção (ou com suposto dano) chama-se assinatura de monitoramento. Essa comparação é realizada por meio de índices de dano. Os índices mais usados na literatura são o desvio da raiz média quadrática, RMSD (*Root Mean Square Deviation*), e a métrica do desvio do coeficiente de correlação, CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*).

O índice RMSD é baseado na norma euclidiana (GIURGIUTIU; ROGERS, 1998). Algumas modificações nesse índice foram sugeridas por vários pesquisadores, sendo um dos mais utilizados o calculado por

$$RMSD = \sum_{\omega_i}^{\omega_f} \sqrt{\frac{\left[V_d(\omega) - V_h(\omega)\right]^2}{\left[V_h(\omega)\right]^2}}, \tag{13}$$

sendo $V_h(\omega)$ a tensão *rms* de resposta do transdutor com a estrutura íntegra (assinatura *baseline*) e $V_d(\omega)$ a tensão *rms* após a ocorrência de um possível dano (assinatura de monitoramento), ambas medidas na frequência ω, que varia de ω_i (frequência inicial) até ω_f (frequência final).

Já o índice CCDM é obtido por (MARQUI et al., 2008)

$$CCDM = 1 - C_C \tag{14}$$

sendo C_C o coeficiente de correlação calculada mediante a seguinte equação:

$$C_C = \left| \frac{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} \left[V_h(\omega) - \bar{V}_h(\omega) \right] \left[V_d(\omega) - \bar{V}_d(\omega) \right]}{\sqrt{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} \left[V_h(\omega) - \bar{V}_h(\omega) \right]^2} \sqrt{\sum_{\omega_i}^{\omega_f} \left[V_d(\omega) - \bar{V}_d(\omega) \right]^2}} \right|, \tag{15}$$

sendo $\bar{V}_h(\omega)$ e $\bar{V}_d(\omega)$ as médias da tensão *rms* na faixa de frequência considerada obtidas antes e depois do dano, respectivamente, dadas por

$$\bar{V}_h = \frac{1}{N} \sum_{\omega_i}^{\omega_f} V_h(\omega) \qquad \bar{V}_d = \frac{1}{N} \sum_{\omega_i}^{\omega_f} V_d(\omega), \tag{16}$$

e N é o número total de amostras.

Os índices RMSD e CCDM devem ser calculados em uma faixa de frequência que contenha as frequências naturais da estrutura mais sensíveis ao dano e garanta uma boa repetitividade entre as medidas. A seleção dessa faixa de frequência é feita por metodologias que utilizam dados medidos em uma quantidade considerável de testes. Além disso, as frequências dessa faixa devem ser altas o suficiente para que tenham um comprimento de onda menor que o tamanho do dano que se deseja detectar (NOKES; CLOUD, 1993). Frequências elevadas, entretanto, limitam a região de sensibilidade do transdutor, mas podem ser vantajosas para a localização de dano em sistemas que utilizam rede de transdutores (PARK et al., 2003).

Na próxima seção é feita uma revisão da literatura destacando os principais sistemas de medição desenvolvidos para a técnica da EMI e que serviram como motivação e referência para o sistema proposto neste trabalho.

2.6 REVISÃO DA LITERATURA

As medições de impedância elétrica aplicadas ao SHM baseado na técnica da EMI, usando os benefícios dos transdutores de cerâmica piezelétrica, teve o seu desenvolvimento teórico proposto pela primeira vez por Liang, Sun e Rogers (1994) e substancialmente desenvolvido por (BHALLA; SOH, 2003, 2004A, 2004B, 2004C; CHAUDHRY; JOSEPH, et al., 1995; CHAUDHRY; LALANDE, et al., 1995; GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2000, 2002; GIURGIUTIU; ZAGRAI E BAO, 2002; GIURGIUTIU et al., 2003; PARK; CUDNEY E INMAN, 2000A, 2000B, 2001; PARK et al., 1999; PARK et al., 2003; PARK et al., 2006; PARK et al., 2007; PARK et al., 2005; PEAIRS; PARK E INMAN, 2004; SOH et al., 2000; SUN et al., 1995).

Muitas universidades e centros de pesquisa continuam utilizando instrumentos comerciais de alto custo, tais como os analisadores de impedância HP4192A, HP4194A da Agilent, analisadores de espectro e dispositivos DAQ; a fim de desenvolver sistemas de SHM baseados na impedância eletromecânica. Vários investigadores têm explorado meios de reduzir o custo dos analisadores de impedância e propor sistemas alternativos mais rápidos e compactos para aplicações em campo. Nesta seção faz-se uma análise sucinta de alguns sistemas para a medição da impedância elétrica em aplicações de SHM.

Peairs, Park e Inman (2002, 2004) usaram um analisador de espectro e um circuito auxiliar para obter um valor aproximado da impedância elétrica do transdutor no domínio da frequência, na qual é necessário calcular a DFT (*Discrete Fourier Transform* – transformada de Fourier discreta) dos sinais de excitação e resposta através de um analisador de espectro. Aplica-se um sinal de excitação tipo *chirp*, que é gerado pelos mesmos instrumentos usados para analisar os espectros dos dois sinais. Esse método apresenta algumas desvantagens: a impedância é apenas uma aproximação válida se a resistência R_S é pequena em relação à impedância do transdutor; em geral, precisa-se de um amplificador de alto ganho, o que pode limitar a largura de banda do sistema e; necessita-se de um analisador de espectro.

Xu e Giurgiutiu (2005) propuseram um analisador de impedância que usa apenas um resistor como circuito auxiliar. O sinal de excitação é sintetizado digitalmente através do *software* LabVIEW. A aquisição dos sinais de excitação e resposta é feita de forma síncrona usando um dispositivo DAQ controlado pelo *software* LabVIEW. Esse método é mais preciso e eficiente que o anterior, mas apresenta algumas desvantagens como: uso de DAQ, uso de *software* proprietário e pouca versatilidade.

Kim et al. (2007) propuseram um sistema que utiliza um DSP para excitar a estrutura mediante um trem de pulsos retangulares digitais de várias frequências, gerados mediante modulação por largura de pulso (PWM: *Pulse Width Modulation*). Essa abordagem implementa um algoritmo que elimina o uso de conversores analógico-digital (CAD) e conversores digital-analógico (CDA), mas para aplicações comerciais, a faixa e o passo de frequência são limitados pela pouca memória do DSP e pela complexidade computacional do algoritmo.

Park et al. (2008) propuseram um sistema baseado em um dispositivo de medição de impedância integrado, o *chip* AD5933 da Analog Devices. Embora esse dispositivo seja muito compacto e de baixo custo, ele apresenta algumas limitações para muitas aplicações em SHM, como por exemplo: a faixa frequência é limitada até 100 kHz, com número de passos de frequência de até 511 por varredura; necessita-se de um núcleo computacional

(microcontrolador, microprocessador, DSP ou computador) para seu gerenciamento e para armazenar os dados em memória externa.

Radil, Ramos e Serra (2008) propuseram um instrumento portátil para medição de impedância baseado em um DSP. O sinal de excitação é gerado usando um sintetizador digital direto (DDS: *Direct Digital Synthesizer*), o AD9834 da Analog Devices. O sistema implementa, no DSP, algoritmos da FFT (*Fast Fourier Transform*) e de *sine-fitting* que determinam, no domínio da frequência, os componentes necessários para obter e impedância desconhecida. O sistema é portátil, mas depende de um DAQ de elevada taxa de amostragem, precisa de uma memória externa de capacidade elevada e requer ser programada para cada uma das frequências de interesse, uma por vez.

Wang e You (2008) apresentaram um circuito complexo para monitorar o módulo da impedância elétrica de um transdutor piezelétrico através de um circuito ponte eletrônico. O sinal de excitação usado é um sinal de *clock* em vez de uma onda senoidal. Além de o circuito ser complexo, é necessário um dispositivo DAQ conectado a um computador pessoal (PC: *Personal Computer*) gerenciado pelo *software* LabVIEW.

Baptista e Vieira Filho (2009) propuseram um sistema de medição de impedância elétrica usando um circuito auxiliar simples. Todo o processo e gerenciado mediante uma interface de usuário desenvolvido em LabVIEW que controla um dispositivo DAQ, através do qual é sintetizado o sinal de excitação tipo *chirp* e é realizada, em forma síncrona, a aquisição dos sinais de excitação e resposta, que logo são processados no domínio da frequência usando a DFT. Esse sistema é rápido e preciso, mas depende de um DAQ, de um *software* proprietário e de um prévio processo de calibração.

Finzi Neto et al. (2011) apresentaram um sistema misto para medir a impedância elétrica. O sinal de excitação é gerado usando o DDS AD9834 da Analog Devices e os sinais de resposta, usados para calcular a impedância, são obtidos por um sistema misturado de *hardware & software* baseado em LabVIEW, DSP, DAQ e um PC. Embora esse sistema prometa ser rápido e os dados possam ser amostrados usando uma frequência de amostragem independente, apresenta, no entanto, as mesmas desvantagens discutidas anteriormente, tais como: o valor da impedância é apenas uma aproximação válida para determinados casos; depende dos dispositivos DSP, DDS e DAQ; depende do *software* LabVIEW; e depende de um PC.

Vieira Filho et al. (2011); Vieira Filho, Baptista e Inman (2011) apresentaram uma nova abordagem para SHM baseada na EMI. No primeiro caso, o transdutor é excitado e apenas o sinal de resposta no tempo foi analisado usando a transformada de *Wavelet*; no segundo caso foi feita a medição da impedância elétrica no domínio do tempo. Embora esse sistema

demonstre que a resposta no domínio do tempo é suficiente para detectar dano em uma estrutura, apresenta, no entanto, quase as mesmas características do sistema que usa como base, ou seja, o trabalho apresentado por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009).

Resumindo, a maioria das soluções implementa algoritmos para calcular a DFT, a FFT, a compensação ou ajustamento de curvas, os quais requerem uma quantidade razoável de memória, CADs com alta taxa de amostragem, além do elevado custo computacional. Por outro lado, as soluções de "custo médio" são desenvolvidas usando analisadores de espectro ou PCs com DAQs. Assim, sistemas de SHM, como apresentado por Cortez (2012), que exijam pouca memória, baixa capacidade de cálculo, tempo de processamento reduzido e que utilizem DAQs com baixas taxas de amostragem ainda são desejáveis para minimizar os custos.

Cortez (2012) apresentou um novo sistema para SHM microcontrolado, cujo método para detectar danos em estruturas se caracteriza por ser simples e baseado na análise de tensões *rms* de transdutores piezelétricos. O sinal de excitação é gerado usando um DDS AD5932 da Analog Devices. O núcleo computacional do sistema, que é um microcontrolador PIC16F877A da Microchip, controla um DDS AD5932 da Analog Devices para gerar o sinal de excitação; realiza a aquisição das tensões *rms* do transdutor piezelétrico e armazena-os em uma memória externa. Esse sistema pode realizar uma aquisição de até 4096 dados por varredura e independe da taxa de amostragem do CAD incorporado no microcontrolador. A identificação de danos é realizada mediante simples análise das tensões *rms* de resposta do transdutor, não sendo necessário armazenar os dados do sinal de excitação. O sistema foi projetado e implementado para funcionar apenas na faixa de frequência de 3–50 kHz.

Assim, nesta Tese são apresentadas melhorias significativas ao sistema de SHM proposto em (CORTEZ, 2012). Na Seção 2.4, foi apresentada uma fundamentação aprimorada do método de detecção de dano. No Capítulo 4, apresenta-se um sistema aperfeiçoado em *hardware* e *software*. Portanto, em relação aos sistemas de detecção de dano existentes na literatura, o sistema proposto apresenta as seguintes vantagens: é simples, independe da taxa de amostragem, não necessita processar dados no domínio da frequência; consequentemente, o custo computacional requerido é baixo e pode ser implementado usando componentes eletrônicos de baixo custo.

No entanto, em aplicações reais, pelo tamanho das estruturas e pela área de ação dos transdutores, em geral, os sistemas de SHM consistem em uma rede de sensores, onde a aquisição de dados é gerenciada por núcleos computacionais que executam algoritmos para avaliar as condições da estrutura. No próximo capítulo é apresentada uma breve introdução às RSSF, que permitem caracterizar o sistema de SHM proposto.

Capítulo 3 FUNDAMENTOS DE RSSF E COMUNICAÇÕES MÓVEIS

Com os avanços na tecnologia de comunicação sem fio, as RSSFs são uma alternativa de baixo custo aos tradicionais sistemas de monitoramento e controle baseados em cabos. Usando as RSSFs é possível estabelecer arquiteturas flexíveis e reconfiguráveis pela facilidade para realocar os sensores e controladores. Neste capítulo são apresentados alguns aspectos básicos das RSSFs, algumas tecnologias ou padrões de comunicação sem fio, com ênfase nas tecnologias ZigBee e GSM/GPRS.

3.1 INTRODUÇÃO ÀS RSSF

Em geral, as RSSFs são formadas por um grande número de dispositivos autônomos chamados nós sensores, capazes de realizar sensoriamento, processamento e transmissão de informação através de enlaces sem fio. Os nós sensores podem ser instalados, um a um, em locais pré-estabelecidos, de modo que possam atuar em forma colaborativa, realizando aquisição de dados e transmitindo-os para pontos da rede chamados sorvedouros. As RSSFs têm como objetivo monitorar e, eventualmente, controlar sistemas, sem intervenção humana direta. Uma RSSF tende a ser dependente da aplicação a que se destina, isto é, os requisitos de *hardware* e *software* e os mecanismos de operação variam de acordo com a aplicação.

Atualmente, as RSSFs podem estar conectadas à Internet, mas diferem das redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Em geral, possuem um grande número de elementos distribuídos, operam sem intervenção humana direta, têm restrições severas de energia, e devem possuir mecanismos para autogerenciamento (autoconfiguração, automanutenção, auto-organização, autoproteção, etc.) devido à deposição em áreas remotas e a topologia dinâmica. Os nós de uma RSSF podem ser descartados, perdidos ou saírem de serviço por diferentes razões como falta de energia, problemas na deposição, ameaças e ataques à segurança, falhas nos componentes e/ou falha de comunicação (RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003). Mesmo sem a mobilidade dos nós, a topologia da rede é dinâmica. Algoritmos distribuídos tradicionais, como protocolos de comunicação e eleição do líder devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente (LOUREIRO et al., 2003).

3.1.1 Nó sensor

Em geral, uma rede possui um ou mais nós de escoamento de dados, chamados de sorvedouros, e diversos nós sensores. Os sorvedouros, geralmente são os nós com maior poder computacional e sem restrições de energia. Esses nós fazem a interface entre a aplicação e a rede. Os nós sensores, em geral, contêm uma ou mais unidades de sensoriamento e possuem capacidades limitadas de processamento e armazenamento.

O *hardware* de um nó sensor típico é composto por cinco subsistemas principais: unidade de sensoriamento, núcleo computacional (processador), armazenamento, transceptor e fonte de energia (LOUREIRO et al., 2003; RUIZ; NOGUEIRA; LOUREIRO, 2003).

Unidade de sensoriamento: geralmente composta por sensores/atuadores e pelo CAD.

Núcleo computacional: é responsável pela execução dos protocolos de comunicação e dos algoritmos de processamento de dados, do controle dos sensores/atuadores;

Memória: armazena o micro-kernel, as aplicações e dados resultantes de sensoriamento;

Transceptor: para interconectar o nó com a rede. Os principais tipos de transceptores são: rádio frequência (RF), infravermelho e óptico;

Fonte de energia: provê energia para o nó.

3.1.2 Arquitetura de uma RSSF

Uma RSSF possui três componentes organizacionais principais: a infraestrutura, a pilha de protocolos e a aplicação (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002).

A infraestrutura: consiste nos nós da rede e no seu estado atual de instalação no ambiente. O estado de instalação da rede diz respeito à localização dos sensores no espaço físico e à densidade da rede.

A pilha de protocolos: composta pelas seguintes camadas: aplicação, transporte, rede, enlace de dados e física. A camada de aplicação é responsável por emitir consultas, também chamadas de interesses, que descrevem as características dos fenômenos que o usuário deseja analisar. Dependendo da tarefa de sensoriamento, diferentes tipos de *software* de aplicação podem ser construídos e usados para interagir com a RSSF. A camada de transporte é responsável por manter o fluxo de dados entre a origem e o destino, se a aplicação assim necessitar. A camada de rede é responsável pelo roteamento dos dados fornecidos pela camada de transporte, buscando eficiência quanto ao gasto de energia. A camada de enlace é

responsável pela multiplexação dos dados, detecção dos quadros, acesso ao meio e controle de erro. A camada física abrange as técnicas de transmissão, recepção e modulação utilizadas na rede, as quais devem ser simples, porém robustas.

3.1.3 Métodos de acesso ao meio para RSSFs

A subcamada de controle de acesso ao meio (MAC), que pertence à camada de enlace de dados, é responsável pela transmissão de pacotes. Além disso, valida os *frames* recebidos e verifica se há erros na transmissão. Também é responsável das funções de fragmentação de pacotes, do controle de fluxo, da taxa de transmissão e das funções de controle de energia relacionadas com a gestão da bateria.

Existem dois mecanismos de controle de acesso em uma RSSF, os baseados em protocolos de arbitragem e os baseados em protocolos de contenda. O primeiro grupo estabelece um controlador, capaz de coordenar os períodos de envio entre nós. Os protocolos de contenda assumem um meio livre, mas em que podem ocorrer interferências devido a colisões entre envios de nós distintos. Existem diferentes técnicas para conseguir implementar essas duas formas diferentes de acesso ao meio.

a) Para os baseados em protocolos de arbitragem.

Conta-se com duas técnicas de controle de acesso ao meio: FDMA e TDMA.

A técnica de FDMA (*Frequency Division Multiple Access* – Acesso ao meio por divisão de frequência) divide a largura de banda disponível em cada canal, permitindo o acesso imediato quando um desses canais está livre, mas como resultado, a largura de banda é limitada.

A técnica de TDMA (*Time Division Multiple Access* – Acesso ao meio por divisão do tempo) entende que toda a largura banda dos meios de comunicação devem estar disponíveis, para enviar/receber, exclusivamente para o nó que será usado, porém durante um curto período de tempo.

b) Para os baseados em protocolos de contenda.

Conta com três técnicas: CSMA, CSMA/CD e CSMA/CA.

CSMA (*Carrier Sense Multiple Access* – Acesso múltiplo com sensoriamento da portadora): busca ao máximo evitar a colisão de *frames* (pacotes da camada de enlace) em redes com múltiplo acesso ao meio.

CSMA-CD (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* – Acesso múltiplo com sensoriamento da portadora e detecção de colisão): parte do pressuposto que a estação pode "ouvir" suas próprias transmissões e verificar se elas estão corretas ou se está havendo alguma colisão, isto é, outra estação transmitindo simultaneamente. Em caso de sucesso, a estação prossegue com a transmissão até o final da mensagem, caso contrário, a transmissão é interrompida logo após a detecção da colisão e a mensagem deve ser retransmitida.

CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* – Acesso múltiplo com sensoriamento da portadora e anulação/prevenção de colisão): possui um grau de ordenação maior que o seu antecessor (CSMA/CD) e possui também mais parâmetros restritivos, o que contribui para a redução da ocorrência de colisões em uma rede. Antes de transmitir efetivamente um pacote, a estação avisa sobre a transmissão e o tempo requerido para realizar a tarefa. Dessa forma, as estações não tentarão que transmitir, porque entendem que o canal está sendo usado por outra máquina.

3.1.4 Tecnologias padrões para RSSFs

Os padrões mais conhecidos são aplicados às redes LAN (*Local Area Network* – Rede de área local) e às redes PAN (*Personal Area Network* – Rede de área pessoal).

a) **Padrão para redes LAN**: IEEE 802.11g

O IEEE 802.11g é um protocolo padronizado que visa estabelecer regras para redes locais sem fio (“Wi-Fi” ou wireless). As taxas de transmissão são de até 54 Mbps dentro dos padrões da IEEE. É um padrão desenvolvido para transmissões via radiofrequência.

b) Padrões para redes PAN: IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.1 (BLUETOOTH IEEE, 2002) é um padrão desenvolvido para interligação sem fio de eletrodomésticos. O padrão opera na faixa de 2.4 GHz da banda de radiofrequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*); a comunicação dos dispositivos obedece a uma hierarquia mestre-escravo, chamada piconet.

O IEEE 802.15.4 (ZIGBEE IEEE, 2003) é um padrão que especifica a camada física e efetua o controle de acesso para redes sem fio pessoais de baixas taxas de transmissão. É a base para as especificações ZigBee, ISA100.11a, WirelessHART, e MiWi. A estrutura básica

concebe uma distância média de 10 metros para comunicações com uma taxa de transferência de 250 kbit/s.

Com relação aos padrões de comunicação sem fio de curto alcance, similares ao ZigBee, pode-se apreciar, na Tabela 1, as principais diferenças entre eles.

Tabela 1 – Comparação entre as principais tecnologias sem fio.

	WiFi IEEE 802.11g	**Bluethooth IEEE 802.15.1**	**ZigBee IEEE 802.15.4**
Frequência	2,4 GHz	2,4 GHz	868/915 MHz; 2,4 GHz
Velocidade	54 Mbps	1 Mbps	250 kbps
Largura de banda	22 MHz	1 MHz	2 MHz
Canais RF	14	79	16
Alcance	50 – 100 m	10 m	10 – 100 m
Max data *payload*	2312 Bytes	339 Bytes	102 Bytes
Consumo nominal: Tx	15 – 20 dBm	0 – 10 dBm	-25 – 0 dBm
Máximo nº de nós	2007	8	> 65 000
Latência (link time)	3 s.	10 s.	30 ms.
Duração da bateria	12 – 48 horas	1 semana	100 – 1000 dias
Complexidade	Complexo	Muito complexo	Simples
Custo por terminal	Alto	Médio	Baixo
Aplicação principal	WLAN	WPAN	Controle e monitoramento
Segurança	SSID	64 bits, 128 bits	AES 128 bits
Memória necessária	1 MB +	250 KB +	4 KB – 32 KB
Destaques	Velocidade e flexibilidade	Custos e perfis de aplicação	Confiabilidade, baixo consumo e baixo custo

Fonte: (LEE; SU; SHEN, 2007).

3.2 O PADRÃO ZIGBEE

O padrão ZigBee é desenvolvido pela ZigBee Alliance, que tem centenas de empresas associadas, desde a indústria de semicondutores e desenvolvedores de *software* até fabricantes de equipamentos e instaladores. ZigBee é um padrão que define um conjunto de protocolos de comunicação para transmissão de dados sem fio, que tem com o objetivo criar redes de baixo custo e baixo consumo para comunicação de dispositivos alimentados por baterias, com autonomia de anos de uso; com uma taxa máxima de transmissão de dados de 250 Kbps. Esse padrão possui todas as vantagens e características físicas do padrão IEEE 802.15.4, que somadas às funcionalidades de rede, pode operar nas bandas não licenciadas de 2,40–2,484 GHz (Global), 902–928 MHz (América) e 868,0–868,6 MHz (Europa) (FARAHANI, 2008; ZIGBEE ALLIANCE, 2008).

Resumindo, o padrão ZigBee foi criado e projetado para transmitir dados através de ambientes de radiofrequência hostis, geralmente encontrados em aplicações industriais e comerciais com as seguintes características:

- Baixo consumo de energia elétrica;
- Suporte a diversas topologias de rede: Estrela (*Star*), Malha (*Mesh*) e Árvore (*Tree*);
- Espalhamento espectral em sequência direta (DSSS: *Direct Sequence Spread Spectrum*);
- Capacidade de até 65.000 nós em uma rede;
- Encriptação de dados AES 128-bit, que garante segurança na comunicação;
- Prevenção de colisão de pacotes de dados;
- Tentativas de retransmissão e confirmação de recebimento de pacotes de dados.

3.2.1 Arquitetura da pilha ZigBee

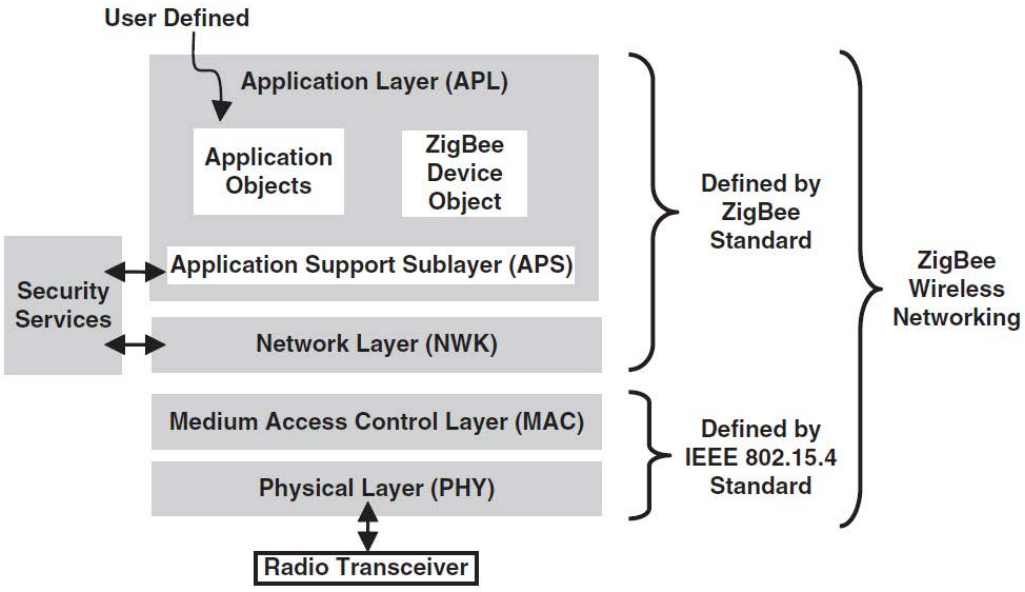
A pilha do padrão ZigBee é composta por camadas conforme o modelo de referência de interconexão de sistemas abertos (OSI), representado na Figura 3. Cada camada realiza um conjunto determinado de serviços para a camada imediata superior. O ZigBee é construído sobre as camadas acesso ao meio (MAC) e física (PHY) do padrão IEEE 802.15.4-2003.

a) Camada física (PHY)

É responsável pela transmissão das unidades de dados através de ondas de rádio. A PHY utiliza a modulação DSSS, que incorpora em cada bit de dado um padrão de redundância e os

espalha pela largura de banda utilizada. Essa redundância permite que o dado seja identificado como pertencente a um determinado nó e facilita a detecção de erros.

Figura 3 – Estrutura da pilha ZigBee.



Fonte: (FARAHANI, 2008).

b) Camada de acesso ao meio (MAC)

É responsável pelo processo do encapsulamento dos dados vindo das camadas superiores preparando-os para serem transmitidos.

O padrão ZigBee define a camada de rede e uma estrutura para a camada de aplicação. Sobre a camada de rede está a camada de aplicação, que é constituída pelos objetos de aplicação ZigBee. A definição dos objetos de dispositivo ZigBee (ZDO) é de responsabilidade de quem emprega o protocolo, com exceção de um objeto especial, definido pelo padrão. Esse objeto é responsável por definir o papel do dispositivo na rede (coordenador, roteador ou dispositivo final), bem como gerenciar as tarefas a ela relacionadas (início da rede, associação, busca de rotas, etc.). Cada objeto acessa as camadas inferiores do protocolo através dos pontos de acesso de serviço (SAP). Assim, a estrutura de aplicações consiste de uma subcamada de suporte à aplicação (APS) e do objeto ZDO. Objetos de aplicações definidas pelo desenvolvedor utilizam a estrutura de aplicação e compartilham a APS e os serviços de segurança com o ZDO.

c) A camada de rede (NWK)

Define a topologia da rede e suporta as seguintes topologias: estrela, árvore e malha (ilustradas na Figura 4).

d) Subcamada de suporte às aplicações (APS)

Fornece uma interface entre a camada de rede (NWK) e a camada de aplicação (APL), através de um conjunto geral de serviços que são usados pelo ZDO e os objetos definidos pelo fabricante.

3.2.2 Dispositivos de uma rede ZigBee

Os dispositivos de comunicação RF (Rádio Frequência) que utilizam a tecnologia ZigBee podem ser de dois tipos: Dispositivo de Função Completa (FFD: *Full Function Device*) ou Dispositivo de Função Reduzida (RFD: *Reduced Function Device*).

FFD. É mais complexo, consome mais energia, e pode se comunicar com qualquer membro da rede. Possui todas as funções que o protocolo ZigBee permite e, por isso, pode ser configurado como coordenador para gerenciar a rede.

RFD. Somente pode se comunicar com FFDs e sempre é utilizado como dispositivo final em qualquer topologia de rede ZigBee. É mais simples por não apresentar todas as funções do protocolo e consome menos energia.

Os FFDs podem ser configurados para operar como coordenador, roteador ou dispositivo final (*end device*), enquanto os RFDs somente podem atuar como *end device*.

Coordenador ZigBee (ZC). É o único FFD capaz de realizar a função de todos os dispositivos e é responsável pela formação de uma rede ZigBee, fato que lhe confere presença obrigatória em todas as redes. Para formar uma rede, o coordenador estabelece um canal de operação e um número lógico que, em seguida, pode permitir que roteadores e dispositivos finais se integrem. Após a formação da rede, o coordenador funciona como um roteador, podendo participar no redirecionamento de pacotes de dados, além de ser uma fonte ou destino de pacotes de dados.

Roteador ZigBee (ZR). É um nó FFD que cria e/ou mantém as informações da rede e a utiliza para determinar a melhor rota para um pacote de dados. Os roteadores podem participar no redirecionamento de pacotes de dados e devem se integrar à rede antes de permitir que outros roteadores e dispositivos finais se integrem a ele.

Dispositivo final ZigBee (ZED). É classificado como um RFD, possui funções limitadas e deve sempre interagir com seu nó pai (coordenador ou roteador) na rede, para receber ou transmitir dados. Pode ser uma fonte ou destino de dados, porém sem a capacidade de redirecionamento de informações. Costuma ser utilizado como nós sensores e/ou atuadores,

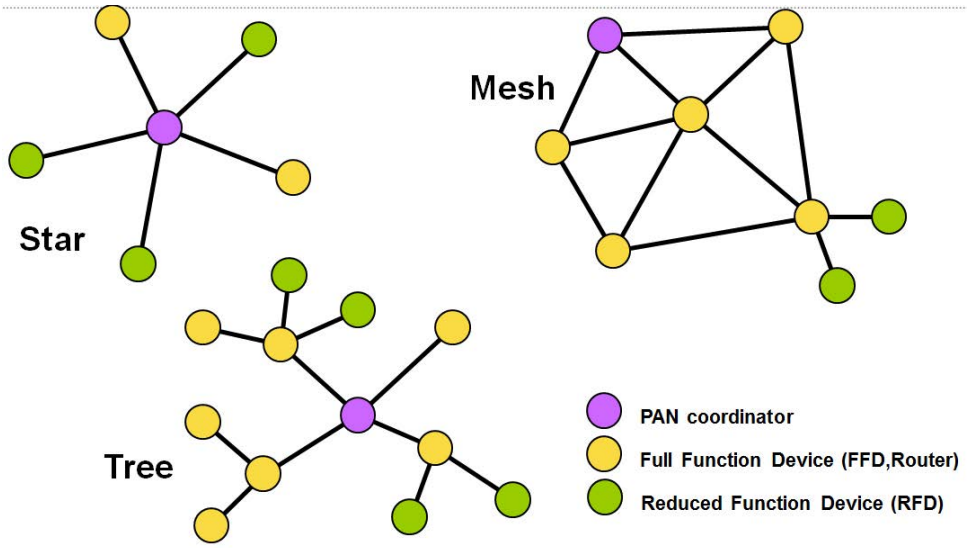
pois consome menos energia que as outras configurações, principalmente porque poder ser parametrizado para permanecer no estado "*sleep*" por longos períodos.

3.2.3 Topologias de uma rede ZigBee

Na Figura 4, ilustra-se o modelo conceitual de comunicação entre os nós de uma rede ZigBee para as topologias Estrela (*Star*), Malha (*Mesh*) e Árvore (*Tree*).

Nas topologias Árvore e Malha, o coordenador realiza a inicialização da rede, mas a mesma só pode ser expandida através de dispositivos roteadores ZigBee.

Figura 4 – Topologias de uma rede ZigBee.



Fonte: (ZIGBEE ALLIANCE, 2012).

Topologia Estrela. É a topologia mais simples de ser implantada e é composta de um ZC, e quantos ZED forem precisos. Esse tipo de rede deve ser instalado em locais com poucos obstáculos à transmissão e recepção dos sinais, como por exemplo, em uma sala sem muitas paredes ou locais abertos.

Topologia Malha. A rede pode se ajustar automaticamente, tanto na sua formação como na entrada ou saída de dispositivos da rede. A rede se auto organiza para otimizar o tráfego de dados. Com vários caminhos possíveis para a comunicação entre os nós, esse tipo de rede pode abranger, em extensão, uma larga área geográfica. A topologia malha permite comunicação completa ponto-a-ponto (P2P).

Topologia Árvore. Semelhante à topologia de malha, uma rede em árvore tem uma hierarquia maior, sendo que o ZC assume o papel de nó mestre para a troca de informação entre os ZR e ZED. Nessa topologia, os ZR retransmitem dados e mensagens de controle utilizando uma estratégia de roteamento hierárquica.

3.2.4 Formação da rede ZigBee

A formação de uma nova rede ZigBee, que pode ser classificada como uma PAN, consiste de um ZC e um ou mais ZR e/ou ZED. A rede é iniciada através de uma primitiva da camada de rede que é restrita ao ZC e que não pertence a nenhuma outra rede. Para iniciar uma rede, o ZC procura por um conjunto de canais de frequência; quando esta procura se completa, os canais são ordenados em ordem decrescente de níveis de energia (os canais de níveis mais baixos são descartados). Em seguida, o ZC procura, em cada canal, por dispositivos ou redes ZigBee. Baseado nesse resultado, o ZC escolhe o melhor canal para criar uma nova rede, dando preferência para canais nos quais não foram encontradas outras redes. Então, o ZC define o identificador de rede (PAN ID) que será atribuído a todo dispositivo que ingressar na rede. Finalmente, o ZC permite que outros dispositivos ingressem na rede.

Como parte do processo de ingressar em uma rede, cada dispositivo recebe um endereço de rede lógico de 16 bits. Em redes ZigBee, os endereços de rede são atribuídos por um ZC ou por um ZR, usando um algoritmo de árvore estruturado.

Quando um ZR é inicializado pela primeira vez, ele localiza e se junta a uma rede ZigBee. Para fazer isso, emite um comando de requisição denominado 802.15.4 *beacon request* em múltiplos canais, para localizar as redes mais próximas. Os ZR e ZC próximos que já se integraram a uma rede respondem à requisição com outro *beacon request*, indicando em qual canal e PAN ID estão operando. O ZR escuta todos os canais aguardando uma resposta; se uma rede válida é encontrada, emite uma requisição de integração (*joining request*) para o dispositivo que respondeu à sua solicitação. Se a integração for inicializada, o roteador irá receber uma confirmação de integração.

Após o ZR ser integrado à rede, ele pode se comunicar com outros nós da rede e permitir que outros dispositivos se integrem. Essa junção estabelece uma relação pai/filho entre dois nós da rede. O nó que permite a integração é o pai e o nó que é incorporado é denominado filho.

Os ZEDs seguem o mesmo processo dos roteadores para se integrar a uma rede. Uma vez que um ZED se integrou com sucesso a uma rede, ele pode comunicar-se com outros ZEDs da

rede. No entanto, devido ao fato que os ZEDs finais não podem redirecionar dados, eles devem sempre se comunicar diretamente com seus pais.

No mais alto nível da estrutura da rede (no ZC) está definida uma entidade conhecida como *stack profile*. O *stack profile* é um conjunto de parâmetros que inclui definições da profundidade máxima da rede, o número máximo de filhos roteadores em uma profundidade e o número máximo de filhos (dispositivos finais) que podem comunicar-se com um roteador individual. Esses parâmetros determinam a forma da árvore da rede. Por exemplo, a profundidade da rede determina o número máximo de saltos entre qualquer dispositivo e o ZC.

O algoritmo de roteamento ZigBee utiliza uma métrica que calcula o custo do caminho, para comparação de rota, durante a descoberta e manutenção de rotas. Para computar essa métrica, um custo de enlace é associado a cada enlace no caminho entre fonte e destino, e esses valores são somados para produzir o custo do caminho inteiro. Esse procedimento de descoberta de rota é baseado no protocolo de roteamento AODV e é utilizado caso o roteador não esteja diretamente ligado ao dispositivo de destino, mas possua capacidade de roteamento.

3.2.5 Endereçamento de dispositivos

O padrão 802.15.4, no qual o protocolo ZigBee é baseado, tem os seguintes tipos de endereço:

a) Endereço de rede de 16 bits

Cada dispositivo possui um endereço de 16 bits que o identifica dentro de uma rede IEEE802.15.4. Esse tipo de endereço é atribuído a um nó quando se integra à rede e é único na rede. Entretanto, podem se alterar devido às seguintes condições:

- Se um ZED não consegue se comunicar com o seu pai, ele deve deixar a rede e se reintegrar para encontrar um novo pai;
- Se o dispositivo é alterado de função, de ZR para ZED ou vice-versa, o dispositivo deve deixar a rede e se reintegrar como um novo dispositivo.

b) Endereço estendido de 64 bits

Cada nó também possui um endereço de 64 bits permanente, o qual é um número de série do dispositivo. Esse endereço de 64 bits pode ser utilizado para descobrir o endereço de rede do destino.

3.2.6 Modos de transmissão

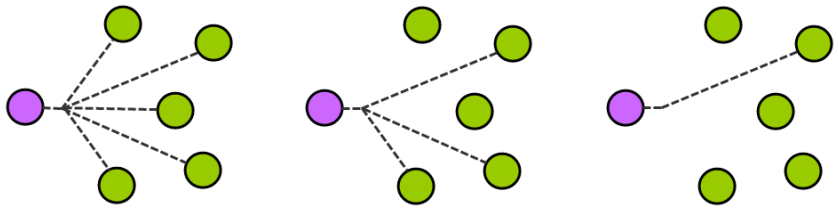
Quando um dado é enviado ao módulo RF (radiofrequência) que implementa o protocolo ZigBee, esse módulo sai do modo ocioso (*Idle Mode*) para iniciar a transmissão de dados. O endereço de destino determina qual nó receberá a informação.

Toda mensagem pode ser enviada para todos os dispositivos da rede por meio de uma transmissão *broadcast* ou enviado a um destino específico através de uma transmissão *unicast*. Na Figura 5 são ilustrados os modos de transmissão.

Transmissão Broadcast. A mensagem é propagada por toda a rede de modo que todos os dispositivos recebem. Por cada transmissão *broadcast* os módulos precisam reservar espaço na memória (*buffer*) para salvar uma cópia da mensagem e retransmiti-la quando necessário.

Transmissão Multicast. A mensagem é enviada para um grupo de dispositivos. O ID de um grupo é usado para distinguir dispositivos que fazem parte de um grupo dado.

Figura 5 – Modos de transmissão.



Fonte: (ZIGBEE ALLIANCE, 2012).

Transmissão Unicast. As mensagens são endereçadas especificando o endereço de 16 bits do módulo destino. Porém, como somente o endereço de 64 bits é permanente, os módulos ZigBee realizam um procedimento para descobrir o endereço de rede chamado *Network Address Discovery*. Assim que o endereço 16 bits do destino é descoberto, a transmissão *unicast* ocorre normalmente.

3.2.7 Modos de operação

O ZC pode operar a rede com recurso a uma estrutura designada por *super-frame*. Quando ela estiver presente, os modos de operação são designados por *beaconing*, ou *non-beaconing*.

Modo *beaconing*. Nesse modo, o coordenador da rede transmite periodicamente um frame de sinalização (*beacon*) que é utilizado pelos dispositivos para a sincronização do envio

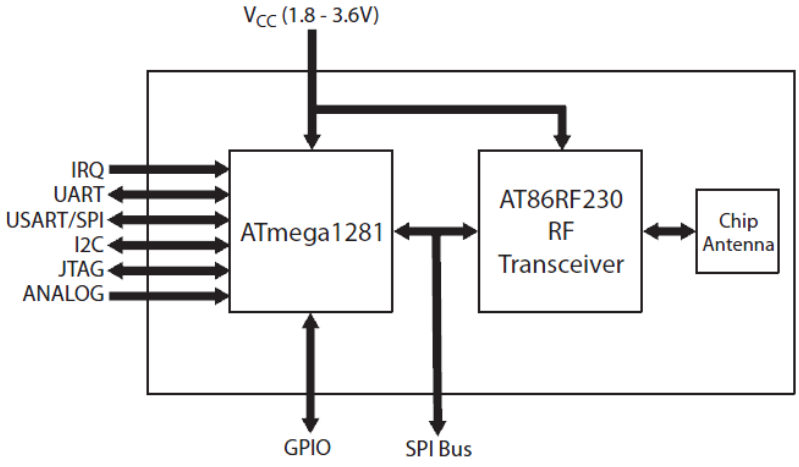
e recebimento das mensagens. Já os outros nós da Rede só precisam estar ativos no momento da sinalização, mas esses dispositivos devem ser configurados para detectar a sinalização, pois no modo *beaconing*, a maioria dos dispositivos permanecem no estado de *sleep*. Nesse modo, o coordenador opera sobre baterias e assim o consumo de energia é o mínimo possível.

Modo *non-beaconing*. Este modo requer ao coordenador sempre "acordado", fazendo com que haja um maior consumo energético. Nesse modo, qualquer nó pode se comunicar com o coordenador a qualquer momento.

3.2.8 O módulo ZigBit ATZB-24-A2

A implementação da RSSF do projeto em estudo foi feita usando módulos ZigBit ATZB-24-A2 da ATMEL (antiga MeshNetics). O módulo ZigBit é de baixa potência, alta sensibilidade e compatível com IEEE 802.15.4/ZigBee de 2,4 GHz, possui um encapsulamento que contém um microcontrolador ATmega1281 da Atmel (ATMEL, 2012) e o transceiver de radiofrequência AT 86RF230 da Atmel (ATMEL, 2009) com antena dupla integrada (ATMEL, 2013). O modelo esquemático do módulo é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo esquemático do módulo ATZB-24-A2.



Fonte: (ATMEL, 2013).

A seguir, suas principais características:

- Tamanho compacto: 24×13,5×2,0 mm;
- Alta sensibilidade na Rx: -101 dBm;
- Até 3 dBm de potência de saída;
- Baixo consumo de energia: <6 mA (modo suspensão), 19 mA (Rx), 18 mA (Tx);

- Memória: 128 KB de memória *flash*, 8 KB de RAM, 4 KB EEPROM;
- Portas seriais: UART, USART, I2C, 1-Wire;
- Banda ISM 2,4 GHz;
- BitCloud *software* integrado, incluindo gerenciador de comandos AT.

De acordo com o fabricante, o módulo pode se comunicar com o computador através de uma interface de comunicação de dados serial UART ou USART. Esse microcontrolador dispõe de 25 terminais GPIO, 4 terminais CAD, e dois terminais IRQ, tornando-o assim muito versátil e robusto. Com essas características pode-se perceber que o módulo ZigBit se destaca de outros módulos com microcontroladores integrados a dispositivos sem fio.

3.3 SISTEMA DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

No início da década de 1990, o Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM: *Global System for Mobile Communications*) desencadeou uma mudança sem precedentes na forma como as pessoas se comunicam umas com as outras. Enquanto os primeiros desenhos de GSM datam de meados da década de 1980, GSM ainda é a tecnologia sem fio mais utilizada, com mais de 4 bilhões de assinantes no mundo todo (TRIPATHI; REED, 2014). Isso foi em grande parte realizado pelas constantes melhoras em todas as áreas de tecnologia de telecomunicações e a consequente redução de preços para os equipamentos de infraestrutura e dispositivos móveis. Nesta seção, são apresentados os conceitos relevantes relacionados com arquitetura da rede GSM, que constitui a base para a transferência de dados por comutação de pacotes, chamado GPRS e, finalmente, um resumo das características principais do módulo Telit GM862-GPS.

3.3.1 A rede GSM

O GSM é visto como um sistema de telefonia celular de segunda geração (2G), uma vez que o sinal e os canais de voz são digitais. Desenvolvido pela *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI), o GSM é o antecessor das tecnologias GPRS e da tecnologia 3G. Utiliza frequências diferentes para assegurar o modo duplex (FDD: *Frequency Division Duplex*) e combina técnicas de divisão na frequência (FDMA: *Frequency Division Multiple Access*) e divisão no tempo (TDMA: *Time Division Multiple Access*) para permitir o acesso simultâneo a múltiplos utilizadores. O GSM opera em várias bandas de frequências não

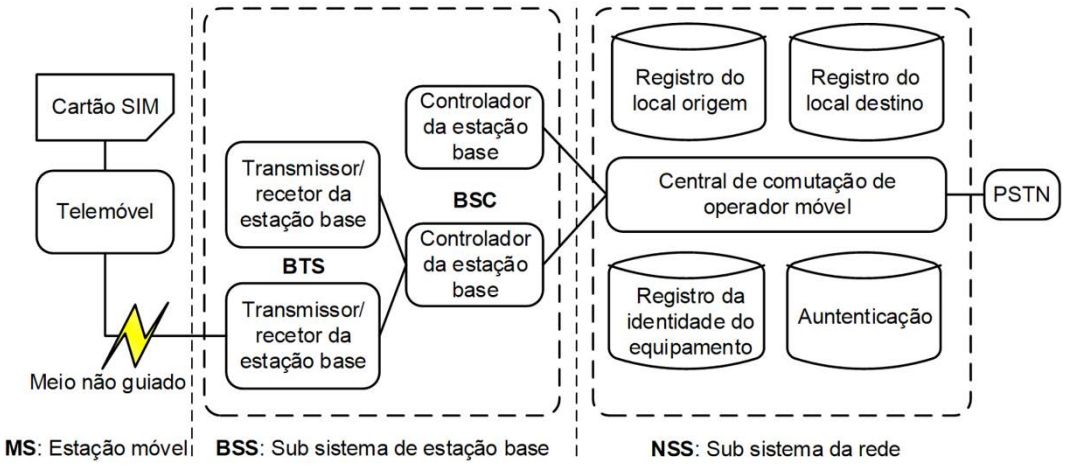
licenciadas, sendo as principais: 900 MHz e/ou 1800 MHz (usados em Europa, Ásia e África) e 1900 MHz (usado em América).

Para os consumidores, o GSM chegou com uma grande vantagem: serviços novos com baixo custo. Por exemplo, a possibilidade de troca de mensagens de texto (SMS: *Short Message Service*) foi originalmente desenvolvida para o GSM. O uso de cartões SIM para identificar a operadora de telecomunicações, permite aos utilizadores se moverem sem restrições entre redes GSM de diferentes operadoras. A integração de voz e dados, a segurança e o maior número de serviços, constituem um grande número de facilidades provenientes do GSM.

3.3.2 Arquitetura da rede GSM

Uma rede GSM é basicamente constituída por três subsistemas: estação móvel; subsistema de estação base e o subsistema de rede ou nó, como ilustrado na Figura 7. Existem adicionalmente centros de operação estabelecidos pelas operadoras, de forma que possam monitorar o estado da rede.

Figura 7 – Arquitetura básica de uma rede GSM.



Fonte: (SANS INSTITUTE, 2001).

Nas redes atuais, a infraestrutura pode ser subdividida em cinco blocos principais:

1. Estação Móvel (MS: *Mobile Station*);
2. Rede Radioelétrica (BSS: *Base Station Sub-system*);
3. Rede Core e Comutação (NSS: *Network and Switching Sub-system*);
4. Rede Core GPRS (GPRS-CN: *General Packet Service Core Network*);
5. Operação e Manutenção (OMSS: *Operation Sub-system*).

3.3.3 A tecnologia GPRS

É a tecnologia que aumenta a taxa de transferência de dados nas redes GSM existentes. O GPRS combina o acesso móvel a serviços baseados no Protocolo IP, que utilizando a transmissão de pacotes de dados, faz uso eficiente do espectro e permite alta velocidade na transmissão de dados. Como uma extensão da rede GSM, ele também oferece serviços como: manipulação de arquivos, mensagens multimídia, conexão WAP; fornecendo aos usuários maior largura de banda e SMS de menor custo, tornando possível e rentável permanecer constantemente ligado, bem como enviar e receber dados de texto, gráficos e vídeo.

No GPRS, a informação é dividida em pacotes relacionados entre si, antes de ser transmitida e remontada no destinatário, significando que os recursos de rádio serão utilizados apenas quando os utilizadores estiverem a enviar ou a receber dados.

Os dispositivos capazes de utilizar os serviços GPRS são denominados Modems, podendo utilizar os serviços GSM e GPRS simultaneamente (Classe A), os dois serviços de forma não simultânea (Classe B), ou somente o serviço GPRS (Classe C).

3.3.4 Arquitetura da rede GPRS

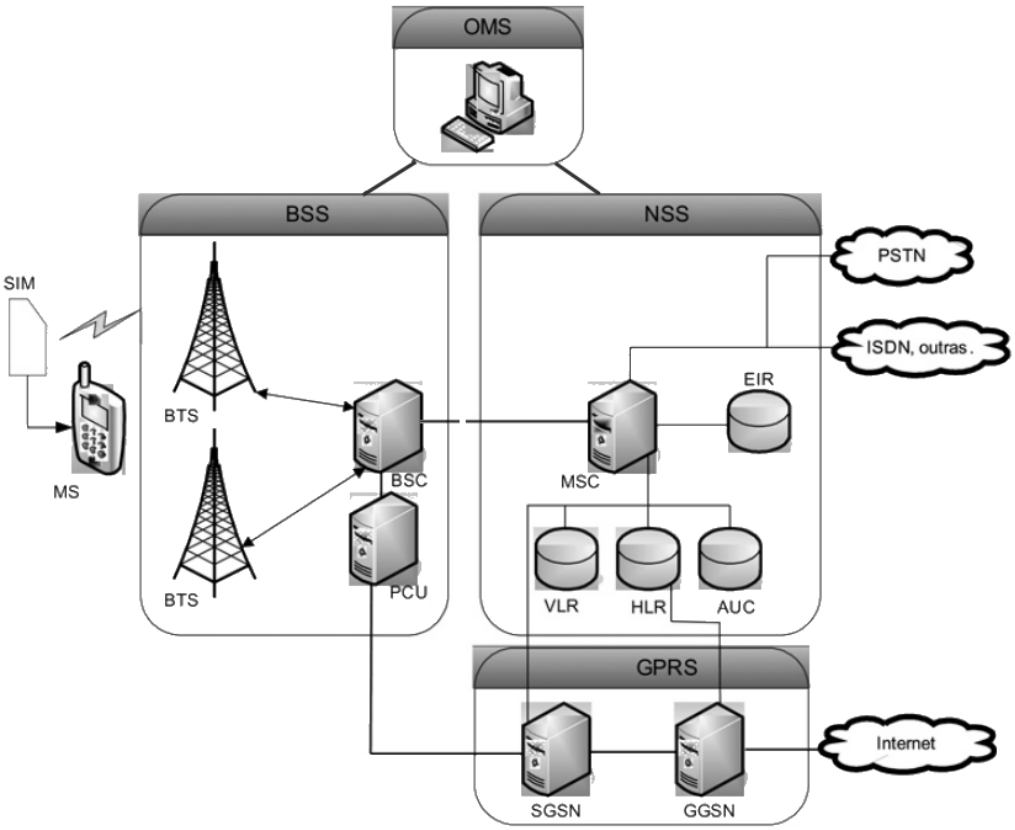
A arquitetura GPRS utiliza a mesma infraestrutura básica utilizada nas redes GSM, na qual inclui novos elementos de rede e interfaces e modifica alguns componentes já existentes. Essas alterações tornam possível a transmissão de dados a uma taxa de 9,6 até 171 Kbps. As principais modificações são indicadas a seguir:

- Estação móvel (MS). Nova MS, que permanece compatível com todos os serviços existentes;
- Estação transceptor base (BTS). Atualização de *software* nas BTSs existentes;
- Controlador de estação base (BSC). Atualização de *software* e instalação de *hardware* novo, chamado de unidade de controle de pacote (PCU: *Packet Control Unit*), que direciona o tráfego de dados para a rede GPRS;
- SGSN e GGSN. Novos elementos de rede, chamados servidor do nó de suporte GPRS (SGSN: *Serving GPRS Support Node*) e *Gateway* do nó para suporte GPRS (GGSN: *Gateway GPRS Support Node*);
- VLR, HLR, AuC, EIR e todos elementos de base de dados. Atualização do *software* para fornecer as funções oferecidas pelo GPRS.

A rede GPRS tem alguns elementos extras em relação a GSM, tal como são ilustrados na Figura 8. Dentre eles podem-se destacar os seguintes:

- Unidade de Pacote de Controle (PCU: *Packet Control Unit*). Encarregado de organizar e empacotar os dados provenientes dos BSCs e enviá-los para o SGSN;
- Servidor do nó de suporte GPRS (SGSN: *Serving GPRS Support Node*). É responsável por mediar o acesso dos usuários à rede GSM, por guardar informações de localização e segurança, tarifação, entre outros;
- Gateway do nó de suporte GPRS (GGSN: *Gateway GPRS Support Node*). É responsável pelas funções de mapeamento de endereços de rede e assinante, da qualidade de serviço GPRS, e pela manutenção das informações de roteamento;
- Nome do ponto de acesso (APN: *Access Point Name*). É um identificador de serviços de rede, usado para identificar quais protocolos e serviços o usuário poderá acessar;
- Tradutor de endereços de rede (NAT: *Network address translator*). Tem como principal função atribuir endereços IP temporários a todos os MS's.

Figura 8 – Arquitetura rede GSM + GPRS.

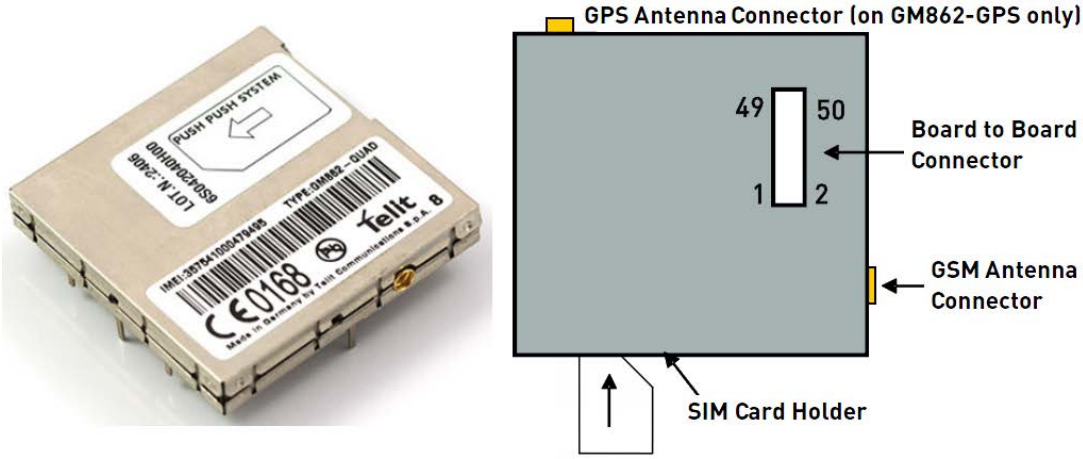


Fonte: (PIROTI; ZUCCOLOTTO, 2009).

3.3.5 O módulo Telit GM862-GPS

O módulo GM862-GPS combina o acesso aos serviços de comunicação digital, através de um modem GSM/GPRS Quad-Band e um receptor GPS integrado. Esse módulo, que é mostrado na Figura 9, possui funcionalidades que podem ser aplicáveis a sistemas automotivos, gerência de frotas, telemetria, controle e sistemas de segurança em geral (TELIT, 2011).

Figura 9 – Módulo Telit GM862-GPS.



Fonte: (TELIT, 2011).

O módulo GM862-GPS permite integrar dispositivos que têm a capacidade de comunicação de voz e dados utilizando a rede de telefonia celular GSM. Através desse módulo é possível conseguir várias formas de comunicação como, por exemplo, envio de mensagens de texto (SMS), ligações de voz e de dados, e acesso a redes de dados de comutação de pacotes, como internet através do serviço GPRS (PSD). O módulo pode ser usado em qualquer parte do mundo devido ao suporte para as quatro bandas de frequência de GSM (850, 900, 1800 e 1900 MHz).

A seguir, destacam-se suas principais características:

- Modem GSM Quad-Band com receptor GPRS de 20 canais;
- Receptor GPS com tecnologia SiRF;
- Suporte para SIM integrado;
- Recursos Telit: busca automática de frequências GSM (com ou sem cartão SIM);
- Possui Stack TCP/IP embebido;
- Interpretador de scripts Pyhton;

- Suporta os protocolos SMTP e FTP a través de comandos AT;
- Interface serie: Modem serial port e GPS serial port;
- Conector de antena MMCX/M;
- Conector 50-pin Molex.

O interpretador interno de scripts Python, permite a gravação dos códigos desenvolvidos diretamente na linguagem utilizada pelo usuário. Para integrar esse interpretador, o módulo possui internamente uma vasta variedade de bibliotecas de funções, concentrando dessa forma, funcionalidades específicas para cada objetivo, os quais permitem uma grande legibilidade dos scripts desenvolvidos. A seguir, uma lista de bibliotecas e suas respectivas funcionalidades:

a) MDM: Interpretador de comandos AT para o modem interno;
b) SER: Interpretador de comandos pela porta serial, podendo ser utilizada para leitura de dispositivos externos ou para rastreamento e eliminação de erros;
c) GPIO: Responsável pelo gerenciamento direto dos pinos de entrada e saída de uso geral;
d) MOD: Para funções de propósito geral. Por exemplo: configurar o modo *sleep*;
e) IIC: utilizada para criar e gerenciar portas de comunicação usando o protocolo I2C;
f) SPI: Para criar e gerenciar portas de comunicação usando o protocolo SPI;
g) GPS: Dedicada a utilização das funções do controlador de GPS integrado no módulo.

Capítulo 4 PROPOSTA DE UM SISTEMA DE WSHM

O desenvolvimento e implementação de RSSF para diversas aplicações do mundo real como no SHM, no monitoramento ambiental, na automação de processos industriais e no monitoramento de sismos, tornou-se possível devido aos avanços da tecnologia das comunicações sem fio e da tecnologia dos sensores. Esse tipo de rede é rentável e atraente para uma ampla gama de situações de missão crítica; razões que ajudaram a ganhar popularidade significativa em comparação com outros tipos de redes.

No âmbito do SHM, as redes de sensores sem fio fazem com que os sistemas de monitoramento se tornem mais factíveis, mais econômicos e mais eficientes do que os sistemas tradicionais com fio, pois são mais fáceis de serem instalados, podem ser implantados em arquiteturas flexíveis e reconfiguráveis, pelo baixo custo e menor tamanho.

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um sistema de WSHM que utiliza duas tecnologias de RSSFs, no qual os nós sensores são gerenciados remotamente afim de detectar danos em estruturas. O *hardware* e o *software* integrado foram implementados e alguns resultados são apresentados.

4.1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas de SHM baseados na técnica da EMI, os transdutores piezelétricos são usados principalmente para a detecção local de danos. Portanto, a inspeção de estruturas civis, mecânicas e aeroespaciais, entre outras, é realizada através de sensores colocados em várias zonas ou locais sobre a estrutura, principalmente em lugares de difícil acesso. Assim, quando o tamanho do sistema de monitoramento cresce (aumento do número de sensores ou atuadores e sua distribuição na estrutura), a instalação de fios adicionais pode causar aumentos significativos no tempo e no custo de instalação. Como resultado disso, os sistemas com fios tendem a apresentar uma baixa densidade espacial de sensores através das redes, o que tem motivado a comunidade de SHM a procurar métodos alternativos aos sistemas tradicionais com fio, que possam permitir uma densa implantação de sensores e maior acessibilidade (PECKENS et al., 2014).

Pentaris, Stonham e Makris (2013) apresentaram uma revisão do estado da arte e os desafios dos sistemas de WSHM, comparando os pontos-chave dos sistemas de SHM com fio

e sem fio. Além disso, foram apresentados em detalhes os resultados da inspeção de dois prédios usando um sistema de SHM com fio, destacando suas vantagens e desvantagens técnicas.

Em comparação com seus homólogos naturais (isto é, os sistemas SHM com fio), as RSSFs mantêm a promessa de revolucionar a detecção de danos para uma ampla gama de aplicações, devido a sua confiabilidade, sincronização de tempo, precisão, flexibilidade, custo-benefício, processamento local de dados, e facilidade de implantação. Assim, as RSSFs têm sido amplamente exploradas para serem usadas em aplicações de SHM (ARAUJO et al., 2012; FARRAR; PARK; FARINHOLT, 2009; FARRAR; PARK; TODD, 2011; LYNCH; LOH, 2006; SAZONOV; KRISHNAMURTHY; SCHILLING, 2010; TANNER et al., 2003; ZHOU; YI, 2013).

Taylor et al. (2010) apresentaram o desenvolvimento de um *hardware* compacto que funciona como nó sensor sem fio, usado apenas para coletar dados de aceleração e impedância elétrica. O nó sensor incorpora um chip que resolve as medições da impedância elétrica, até 100 kHz, que após, são usadas para detectar dano estrutural.

Existem implementações práticas de redes de sensores aplicadas a sistemas de SHM realizadas por diferentes pesquisadores. Para o monitoramento da escavação durante a construção da estação de trânsito em Singapura, por exemplo, fios de entrada/saída muito longos, de até 400 m, foram usados para conectar os sensores com o instrumento de monitoramento (analisador de impedância elétrica) (ANNAMDAS; YANG, 2012). Os autores mostraram que as assinaturas de admitância elétrica são influenciadas pelo comprimento das linhas de entrada/saída e, por conseguinte, a posição dos picos principais e suas magnitudes mudam com o comprimento do fio e podem reduzir a precisão dos resultados. Numerosos estudos conduzem efetivamente a superar esses desafios em uma variedade de sistemas de infraestrutura, como pontes, que tiveram várias implantações bem sucedidas usando RSSF (KURATA et al., 2013; PECKENS et al., 2014; TORFS et al., 2013).

No entanto, alguns inconvenientes como a instabilidade, o consumo de energia e a largura de banda insuficiente, são problemas chave ao projetar as RSSFs. Para superar esses problemas, as RSSF baseadas na tecnologia ZigBee (IEEE 802.15.4) estão disponíveis. Quando comparada com algumas redes sem fio convencionais de área pessoal (WPANs), tais como Bluetooth (IEEE 802.15.1) ou identificação por radiofrequência (RFID), a interface de rádio ZigBee apresenta algumas vantagens como baixo consumo de energia, confiabilidade e diferentes topologias de aplicação (ARAUJO et al., 2012; KRISHNAMURTHY; SAZONOV, 2008; ZIGBEE ALLIANCE, 2008). Outras características das RSSFs baseadas na tecnologia ZigBee

aplicadas ao SHM são discutidas em (CHEN HONGYAN et al., 2012; HARMS; SHAH; et al., 2009; NANDA et al., 2012; TENNINA et al., 2013; WANG et al., 2012).

Harms, Banks, et al. (2009) apresentaram uma RSSF composta por uma estação de base (SmartBrick) que utiliza nós sensores adicionais para medir periodicamente dados de vibração, inclinação, umidade e tensão mecânica de uma estrutura. Os nós sensores usam ZigBee para transmitir seus dados para a estação base, que, por sua vez, utiliza a rede de telefonia celular GSM para fornecer comunicação de longo alcance e suporte para controle remoto. Porém, os nós sensores não têm a capacidade para avaliar se houve mudanças no estado da estrutura. O consumo de corrente do transceptor ZigBee usado pelos nós sensores foi de 34 mA funcionando com 3 V.

Assim, as RSSFs já estão encontrando uma variedade de aplicações para sistemas distribuídos com e sem segurança crítica. Esses sistemas exigem procedimentos de manutenção completos para corrigir problemas, detectar danos na estrutura e tomar medidas de prevenção para evitar problemas futuros. Na indústria aeronáutica é particularmente crítico porque esses procedimentos representam enormes custos impostos aos fabricantes e operadores da estrutura, por estar sujeito a exigentes requisitos em matéria de segurança e desempenho da aeronave. Isso se traduz em testes completos durante as fases de desenvolvimento e monitoramento periódico dos sistemas da aeronave durante seu tempo de vida operacional.

Nas aeronaves comerciais e militares, os sistemas com e sem segurança crítica são conectados usando fios e, por conseguinte, eles são complexos e de percurso difícil. O Airbus A380, por exemplo, tem mais de 530 km de cabos constituídos por cerca de 98.000 fios e 40.000 conectores (HEINEN, 2006). Além disso, as condições ambientais adversas podem impor restrições físicas no cabeado de fios. Assim, alguns dos benefícios potenciais do uso das RSSF em sistemas de aeronaves incluem a redução de peso, facilidade de manutenção e um aumento da capacidade de monitoramento. Os benefícios diretos para as companhias aéreas estão em termos de receitas adicionais, bem como, menores custos operacionais e de manutenção.

Existe certificação para sistemas de segurança não critica, incluindo para algumas RSSFs, no entanto, esses sistemas tipicamente operam em um espectro não licenciado. Portanto, existem alguns desafios técnicos significativos para a implementação bem sucedida de RSSFs. Regras específicas para sistemas sem fio de aeronaves não existem e há uma necessidade de desenvolver uma regulamentação específica para essas novas aplicações de RSSF (YEDAVALLI; BELAPURKAR, 2011). Embora a implantação de RSSFs em uma aeronave é tecnicamente viável e rentável, ainda há muito a fazer em relação às exigências de segurança

que um sistema incorporado deve cumprir antes de ser implantado. A seguir, algumas aplicações de RSSFs para SHM em aeronaves propostas recentemente.

Arms et al. (2009) descrevem o desenvolvimento de um sistema para ser usado no WSHM de aeronaves da marinha. O sistema proposto combina microeletrônica com sensores, captação e gerenciamento de energia, sincronização de tempo, e distribuição de dados baseado na web. Os sensores sem fio incluem *strain gauges*, acelerômetros e termopares. Os sensores cabeados incluem giroscópios, acelerômetros e magnetômetros. A comunicação por rádio entre os nós sensores e as estações base é realizada usando o padrão IEEE 802.15.4 na banda de 2,4 GHz.

Arms et al. (2011) apresentam uma rede de sensores com fio e sem fio para SHM de helicópteros. Todos os nós sensores foram testados usando a norma MIL-STD-461F para o controle das características de emissão e suscetibilidade de interferência eletromagnética e voo qualificado. A intensidade do sinal dos transceptores sem fio 802.15.4 foram testadas com sucesso dentro de um helicóptero Sikorsky MH-60S. O sistema visa ser autônomo coletando dados de *strain gauges*, sensores de torque, termopares, acelerômetros, magnetômetros e sensores de velocidade angular e, quando equipado com enlaces para redes de telefonia celular e/ou via satélite, transmite os dados para um servidor remoto.

Yedavalli e Belapurkar (2011) discutem algumas aplicações de RSSFs em sistemas de aeronaves, tais como controle distribuído para monitoramento da integridade de motores, controle de voo e SHM. Apresentam uma breve descrição de cada sistema junto com uma discussão sobre os desafios tecnológicos e das futuras direções de pesquisa para aplicação de RSSF em sistemas de aeronaves.

Martins et al. (2012) propuseram uma arquitetura para um sistema de SHM remoto baseado em medições da impedância. O sistema proposto representa uma aplicação do método da impedância ampliada para SHM de aeronaves. Como estudo de caso, realizaram, a temperatura ambiente, o SHM de um painel de fuselagem (janela de aeronave) através de múltiplos transdutores de PZT.

Dragomirescu et al. (2013) apresentam uma arquitetura de RSSF para SHM de aeronaves. O consumo de energia de cada parte do sistema foi o principal fator para projetar e dimensionar a RSSF de banda larga. Todo o sistema de medição para WSHM de uma aeronave foi implementado e testado em uma maqueta de avião G500.

Losada et al. (2014) apresentam os princípios de design para implementar com sucesso uma RSSF em uma aeronave. Propuseram um nó sensor equipado com acelerômetro, sensor de temperatura, humidade e *strain gauge*. As comunicações sem fios são baseadas nos padrões Zigbee e WiFi operando na faixa de frequência de 2,4 GHz. No entanto advertem que o

problema da coexistência e interferência com outros aplicativos ou serviços que utilizam as mesmas bandas é uma questão que deve ser cuidadosamente estudada antes da implantação no sistema.

Wilson e Atkinson (2014) apresentam um estudo das oportunidades de pesquisa para desenvolver novos sensores sem fio aplicados a sistemas de monitoramento de integridade estrutural de veículos aeronáuticos. Discutem as potenciais aplicações para diversos sensores sem fio (com suas próprias exigências e questões) de modo que possam ser operados sob ambientes aeronáuticos extremos e, em alguns casos, colocados dentro de estruturas metálicas fechadas: tais como o interior de asas.

Resumindo, alguns dos trabalhos acima mencionados apresentam um *gateway* para enlaçar nós sensores sem fio com unidades de controle através de redes de longo alcance, mas nenhum desses sistemas apresenta um nó sensor com capacidade de avaliar *online* o estado de integridade estrutural e, menos ainda, incorporando métodos para compensar os efeitos da temperatura; sendo apenas usados para coletar dados de impedância elétrica e/ou outros.

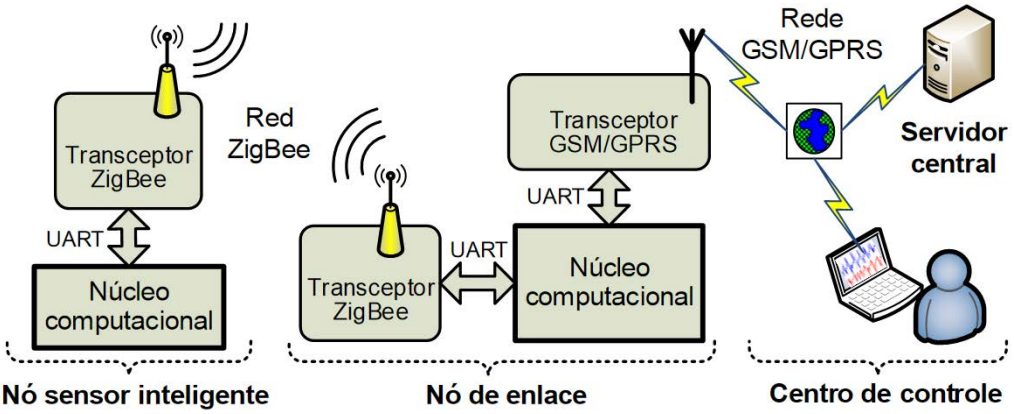
Assim, o estudo apresentado neste capítulo propõe um sistema de WSHM, baseado no princípio da EMI. O sistema proposto consiste de uma RSSF escalável e de baixa potência, composta por nós sensores, um nó de enlace e um centro de monitoramento remoto. O nó de enlace é usado como coordenador de uma rede ZigBee composta por múltiplos nós sensores, e como um *gateway* para integrar a rede ZigBee com o centro de monitoramento remoto via uma rede GSM/GPRS e um servidor HTTP. A rede GSM/GPRS fornece a capacidade de comunicação de longo alcance usando uma rede celular GSM e permite que o sistema de SHM possa ser usado virtualmente desde qualquer lugar do mundo.

Embora as tecnologias das redes ZigBee e GSM/GPRS sejam robustas e maduras, em relação aos trabalhos existentes atualmente na literatura, o sistema de WSHM proposto nesta Tese é original e como um todo destaca-se por apresentar o desenvolvimento e implementação de um NSI, núcleo de um SHM, para avaliar *online* o estado de integridade de uma estrutura, inclusive quando a estrutura está exposta a variações de temperatura ambiente. O NSI está preparado para: coletar e armazenar as assinaturas de tensão *rms* de transdutores piezelétricos; realizar a compensação *online* dessas assinaturas devido ao efeito da variação de temperatura; analisar as assinaturas através do cálculo de índices de dano a fim de determinar se existem, ou não, mudanças na resposta dinâmica da estrutura; e, no caso de dano ser detectado, enviar os dados para um centro de controle, para análise (CORTEZ; VIEIRA FILHO; BAPTISTA, 2013, 2014, 2015).

4.2 HARDWARE DO SISTEMA DE WSHM PROPOSTO

O protótipo do sistema de WSHM proposto incorpora um projeto de *hardware* e *software* integrado para implementar uma RSSF. Como ilustrado na Figura 10, o sistema é composto por três módulos funcionais: (1) o nó sensor inteligente (NSI), (2) o nó de enlace e, (3) o centro de controle remoto ou centro de monitoramento remoto (nó *host* e servidor).

Figura 10 – Diagrama funcional do sistema de WSHM proposto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O sistema proposto é controlado pelo centro de controle ou monitoramento remoto (notebook ou desktop), que se comunica com o nó de enlace (*gateway*) através de uma rede GSM/GPRS. O *gateway* interliga a comunicação entre o centro de monitoramento remoto e múltiplos NSIs. Implementa-se uma simples rede ZigBee de topologia em estrela, sendo o nó de enlace o coordenador da rede que conecta múltiplos NSIs como dispositivos finais. O esquema de endereçamento da rede ZigBee é capaz de suportar mais de 65.000 NSIs por rede. Os NSIs são os responsáveis pela coleta, armazenamento e análise de dados de múltiplos sensores a fim de detectar dano estrutural. Nos casos em que há alterações na resposta dinâmica da estrutura, é realizada a transferência de dados para o servidor central através de nó de enlace, para armazenamento permanente ou análise detalhada.

O servidor central é um servidor HTTP que incorpora um interprete PHP e um gerenciador de base de dados. O centro de monitoramento, através de uma interface gráfica de fácil utilização, acessa o servidor central para enviar palavras de controle aos NSIs ou para obter e analisar os dados coletados pelos NSIs.

A seguir, são descritas as características básicas de *hardware* e *software* dos componentes principais do sistema de WSHM proposto.

4.2.1 Hardware do NSI

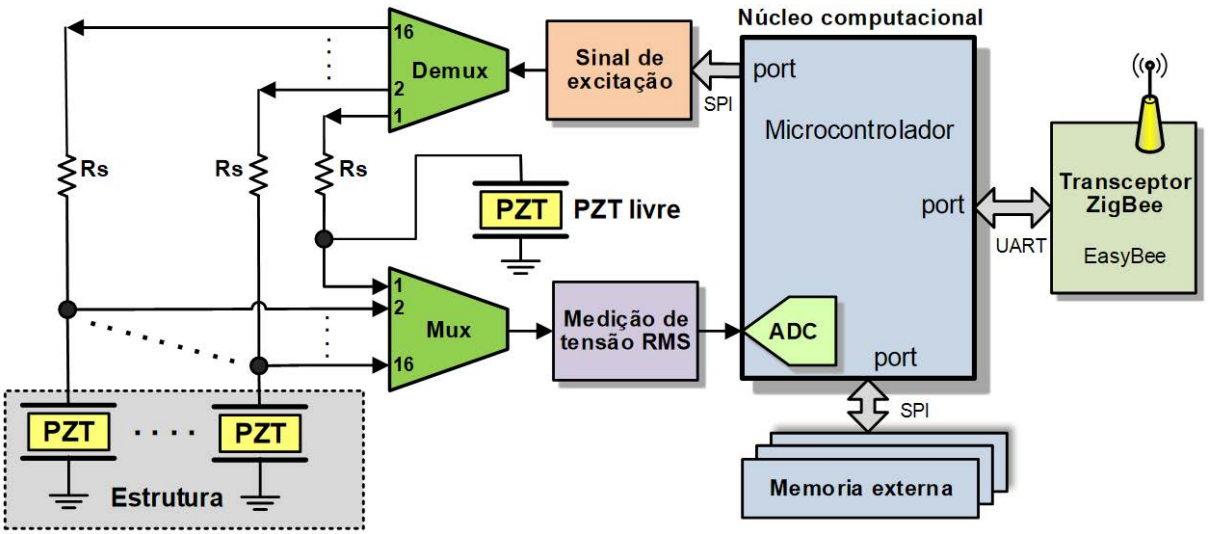
O NSI representa o bloco de construção essencial do protótipo de WSHM, em que cada NSI é projetado para coletar dados do transdutor piezelétrico para realizar análise de engenharia e para se comunicar com outra unidade. Através dos canais de comunicação sem fio, essas unidades individuais formam uma RSSF. Esta seção descreve o projeto de *hardware* e *software* do protótipo de NSI para aplicações em detecção de danos em estruturas.

Cada NSI representa um nó portátil e autônomo dentro do sistema de WSHM para fazer aquisição e análise das medições do transdutor piezelétrico. Como apresentado no esquema da Figura 11, o projeto do NSI consiste de quatro unidades funcionais: (1) sinal excitação, (2) medição de tensão *rms*, (3) núcleo computacional, e (4) transceptor ZigBee.

O módulo *sinal de excitação* proporciona uma onda senoidal sintetizada que é amplificada e filtrada antes de ser aplicada aos transdutores piezelétricos. Esse módulo é composto por um dispositivo Sintetizador Digital Direto (DDS), usado para gerar o sinal senoidal, e um filtro passa-baixas Butterworth (LPF) com ganho de tensão, usado como um condicionador de sinal. O demux (demultiplexador) é usado apenas para selecionar o transdutor que será excitado em uma determinada varredura e deve ser um transdutor por vez.

O módulo de medição é, basicamente, um circuito retificador de precisão usado para realizar a conversão de AC-DC do sinal de resposta do transdutor, cuja entrada depende de um mux (multiplexador). Esse módulo fornece na sua saída a tensão *rms* de resposta do transdutor, para cada uma das frequências de excitação geradas pelo dispositivo DDS.

Figura 11 – Esquema funcional do NSI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O núcleo computacional é responsável por configurar e controlar a varredura de frequência, selecionando um transdutor para aplicar o sinal de excitação e, para cada ponto de frequência, convertendo a tensão *rms* analógica para um formato digital. As tensões *rms* digitalizadas são, então, armazenadas em uma memória externa e usadas para acomodação local de dados, para análise e posterior retransmissão para o centro de monitoramento remoto, se for necessário. Através de uma interface UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), o núcleo computacional se comunica com o transceptor ZigBee, que por sua vez fornece uma conexão sem fio entre o NSI e o nó de enlace.

Nesta seção apresenta-se apenas um resumo das principais características do projeto de *hardware* melhorado do NSI. Os pormenores do desenvolvimento do projeto de *hardware* para detecção de danos baseada na análise das tensões *rms* de resposta do transdutor, foram descritos em (CORTEZ, 2012). O circuito de medição de tensão *rms* é similar ao circuito de conversão *AC-DC* de banda larga, apresentado em (FRANCO, 2002), Seção 9.4.

a) Núcleo computacional do NSI

Um microcontrolador é utilizado para coordenar todas as partes do *hardware* do NSI e fornece a capacidade para aquisição e interrogação local de dados. O microcontrolador PIC escolhido neste projeto é o PIC18F2553 da Microchip Technology; tem baixo custo e seu consumo de energia fica entorno de 70 mW em modo ativo e apenas 0,5 mW em modo *sleep*. O PIC fornece 32 KB de memória *flash*; capacidade que é suficiente para armazenar o *firmware* (sistema operacional embarcado) e alguns algoritmos computacionais, como os usados para calcular os índices RMSD e CCDM. A memória estática de acesso aleatório (SRAM) de 2 kB, integrado no PIC é insuficiente para armazenar e analisar os dados dos transdutores; portanto, o microcontrolador é conectado a uma memória externa modelo 25LC1024 (de 128 kB) da Microchip Technology. Esta memória externa é suficiente para armazenar uma extensa quantidade de dados, como os dados que podem ser coletados por um NSI durante a uma varredura de frequências na faixa de 5–250 kHz, com incrementos de 4 Hz.

Para coordenar o funcionamento do NSI, foi desenvolvido o *firmware* do PIC na linguagem assembly. O PIC foi programado para realizar as seguintes tarefas principais: (1) recebe, do nó de enlace, os parâmetros de configuração do DDS através da rede ZigBee; (2) configura os parâmetros do DDS e controla a varredura de frequência do sinal de excitação via interface de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*); (3) usando um CAD embarcado de 12 bits, realiza a aquisição de dados correspondentes às tensões *rms* do transdutor, que é

fornecida pelo módulo de medição; e (4) armazena os dados na memória externa via interface SPI. Quando a varredura de frequência é completada, o microcontrolador executa os algoritmos computacionais de engenharia, como: analisar as assinaturas de tensão *rms* do transdutor; realizar a compensação devido aos efeitos da variação de temperatura ambiente; avaliar os índices CCDM e RMSD e diagnosticar dano na estrutura; e se for necessário, transmitir os dados para o servidor central via o nó de enlace.

Na coleta de dados, para cada passo de frequência e após o gerador mudar a frequência do sinal, espera-se um tempo de 10 ms para o circuito de medição chegar ao estado de regime permanente e, então, a partir desse momento são realizadas 20 medições de tensões DC, que correspondem a tensões *rms* e apenas o valor médio é armazenada na memória externa. Também é importante notar que a taxa de amostragem do CAD, incorporado no PIC, é de 50 kS/s; no entanto, a aquisição de dados não é limitada pela taxa de amostragem porque as tensões *rms* são valores contínuos (valores DC), como mencionado anteriormente.

b) Módulo transceptor ZigBee

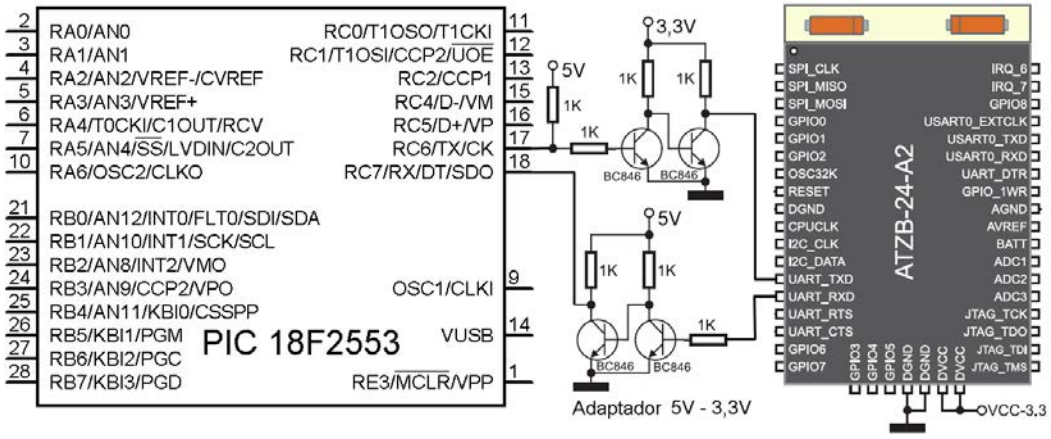
Em algumas aplicações, a distância de comunicação pode ser superior a várias centenas de metros. No entanto, distâncias longas de comunicação geralmente requerem um maior consumo de energia do transceptor sem fio. Neste estudo, a unidade de comunicação sem fio usada é o módulo EasyBee da MikroElektronika, que foi escolhido por oferecer uma adequada compensação e equilíbrio entre o baixo consumo de energia, perto de 320 mW em modo TX (transmissor) ou RX (receptor) e 30 µW em modo *sleep*, e comunicação de média distância para aplicações em SHM. O módulo EasyBee, composto principalmente pelo transceptor ZigBit ATZB-24-A2 da Atmel e compatível com IEEE 802.15.4/ZigBee; pode ser utilizado no mundo inteiro funcionando na não licenciada banda de frequência industrial, científico e médico (ISM: *Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz (ATMEL, 2013). O núcleo computacional gerencia o módulo EasyBee usando comandos AT via interface UART definido para 19,2 kbps (MESHNETICS, 2008).

Esse módulo é capaz de estabelecer uma comunicação a dezenas de metros (até 100 m), utilizando um transceptor 802.15.4 de 2,4 GHz. Segundo suas especificações, o transceptor ZigBit drena perto de 18 mA quando transmite dados e perto de 19 mA quando recebe dados. Neste trabalho, a sequência de dados úteis, dentro de uma trama de dados, é composta de 92 dígitos decimais correspondentes às tensões *rms* de 23 pontos de frequência (cada valor de

tensão *rms* é representado com 4 dígitos decimais), exceto na última trama em que apenas os dados restantes são enviados.

As interfaces UART do PIC e do transceptor ZigBit operam com diferentes níveis de tensão, de forma que para estabelecer comunicação entre o PIC e o transceptor foi necessário usar um adaptador de níveis de tensão de 5V (usado pelo PIC) para 3,3V (usado pelo transceptor), tal como é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Interface UART: PIC18F2553 e transceptor ZigBit ATZB-24-A2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A taxa de transmissão usada para enviar os dados desde o NSI para o módulo de enlace é de 19,2 kbps, que garante resultados consistentes e confiáveis. Usando essa taxa de transferência, o bloco de dados correspondentes a uma varredura de 4096 pontos de frequência é transmitido em um tempo estimado de 8 s.

c) Protótipo do NSI

Antes de apresentar o protótipo final, na Tabela 2 é apresentado um resumo das configurações básicas do *hardware* do NSI e na Figura 13 mostram-se os modelos de circuito impresso do NSI com exceção do módulo transceptor.

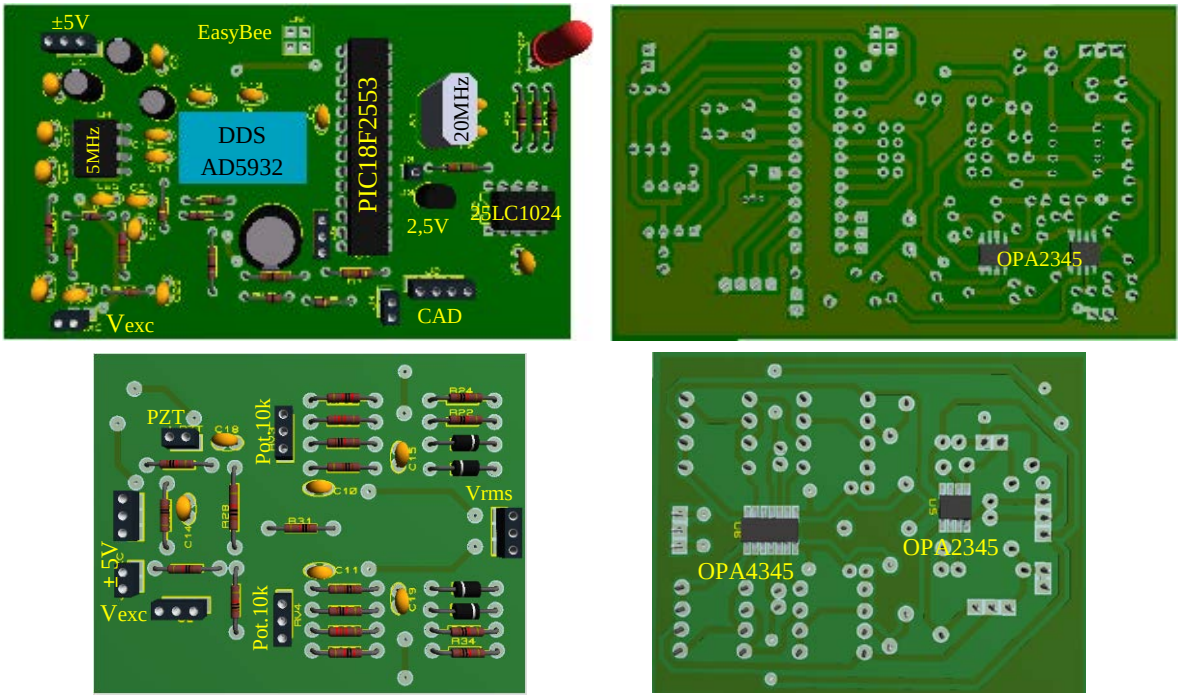
Finalmente, na Figura 14 mostra-se uma fotografia do protótipo do NSI. Entretanto, deve-se notar que, como os circuitos impressos são de uma só face, os amplificadores operacionais de montagem superficial (TSSOP) usados foram soldados no lado das trilhas.

Tabela 2 – Parâmetros básicos do *hardware* do NSI.

Parâmetro do projeto	**Especificação**
Núcleo computacional	
Microcontrolador	PIC18F2553: Arquitetura RISC de 8-bit, 20 MHz.
Memória interna	*Flash*: 32 kB; RAM: 2 kB
Memória de dados	EEPROM: 25LC1024 (128 KB)
Precisão e taxa de amostragem	CAD: 12-bit, 50 kS/s, Vref = 2,5V
Módulo de sinal de excitação	
Gerador de sinal	DDS AD5932, Clock = 5MHz
Filtro passa-baixos	Butterworth
Amplificador operacional	TSSOP: OPA2345, OPA4345
Faixa de frequência	5 – 250 kHz
Amplitude de tensão	2,1 V.
Módulo de medição	
Conversor AC-DC	Circuito retificador de precisão
Transceptor ZigBee	
Configuração	ZED: dispositivo final ZigBee
Frequência de operação	Banda ISM 2,4 GHz
Taxa de transferência de dados	UART: 19,2 kbps
Alcance de comunicação	100 m
Consumo de energia	<6 mA (modo suspensão), 19 mA (Rx), 18 mA (Tx)

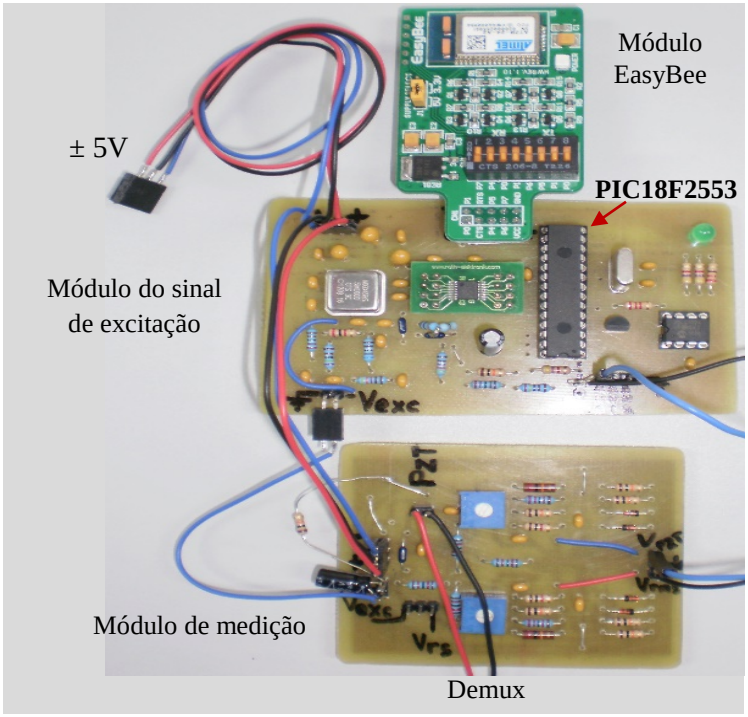
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 13 – Modelo de circuito impresso: (a: acima) do núcleo computacional + módulo do sinal de excitação, (b: abaixo) do módulo de medição.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 14 – Protótipo do *hardware* do NSI.

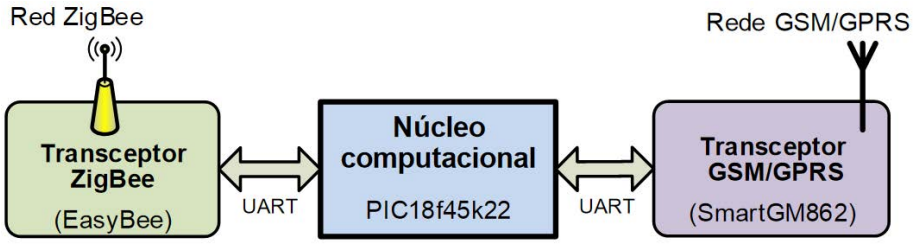


Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.2.2 Hardware do nó de enlace

O nó de enlace é utilizado como coordenador da rede ZigBee e como *gateway* entre o servidor central e os NSIs. Como ilustrado na Figura 15, o nó de enlace está dotado de dois transceptores sem fio, que são usados para integrar a rede ZigBee com a rede GSM/GPRS a fim de melhorar a comunicação de médio alcance dos NSIs, o que permite acesso e suporte para monitoramento remoto via Internet de qualquer lugar do mundo.

Figura 15 – Diagrama funcional do de enlace.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O projeto do nó de enlace é composto por três unidades funcionais: (1) transceptor ZigBee, (2) núcleo computacional, e (3) modem GSM/GPRS sem fio. Por meio de uma interface UART, o núcleo computacional se comunica com o transceptor ZigBee, que por sua vez fornece uma conexão sem fios entre o nó de enlace e os NSIs. Usando uma outra interface UART, o núcleo computacional se comunica com o transceptor GSM/GPRS, que fornece uma conexão sem fios entre o módulo e o centro de monitoramento remoto.

a) Núcleo computacional do nó de enlace

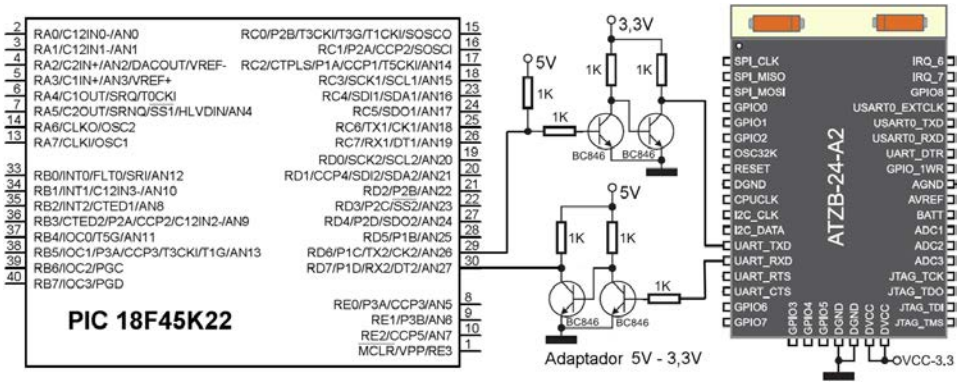
O PIC escolhido como núcleo computacional do nó de enlace é o PIC18F45K22 da Microchip Technology. Esse PIC fornece 32 KB de memória *flash* para o *firmware*, uma SRAM de 1536 bytes, e duas interfaces UART para comunicação através dos dois transceptores sem fio. A UART1 é para se comunicar com o transceptor GSM/GPRS e a interface UART2 para se comunicar com o transceptor ZigBee.

Para coordenar o comportamento do nó de enlace, também nesse caso foi desenvolvido o *firmware* do PIC na linguagem assembly. As tarefas principais deste nó são: retransmitir os parâmetros de controle para os NSIs e retransmitir os dados de SHM para o servidor central.

b) Módulo transceptor ZigBee

O módulo EasyBee, usado pelo nó de enlace, foi configurado como coordenador da rede ZigBee para operar na banda ISM de 2,4 GHz. Como ilustrado na Figura 16, também neste caso foi preciso utilizar um adaptador de níveis de tensão, de 5V para 3,3V. Neste caso, a taxa de transmissão usada para comunicar o PIC com o transceptor ZigBee é 19,2 kbps.

Figura 16 – Interface UART2: PIC18F45K22 e transceptor ZigBit ATZB-24-A2.



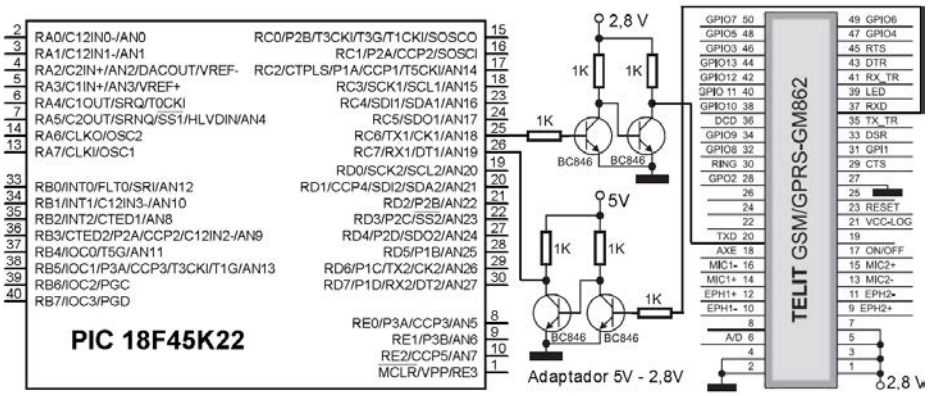
Fonte: Elaboração do próprio autor.

c) Módulo transceptor GSM/GPRS

O nó de enlace utiliza o módulo transceptor GSM/GPRS para se comunicar com o servidor central, que neste caso consiste do módulo SmartGM862 da MikroElektronika. Esse módulo é composto principalmente de um transceptor quad-band GM862-GPS da Telit, que tem suporte para operar nas não licenciadas bandas de frequência ISM (850, 900, 1800 e 1900 MHz) (TELIT, 2011). O módulo SmartGM862 fornece a capacidade de comunicação de longo alcance via uma rede celular GSM. O núcleo computacional gerencia o módulo SmartGM862 usando comandos AT via interface UART definido para 38,4 kbps. Uma descrição detalhada dos comandos AT utilizados encontra-se em (TELIT, 2012).

Como ilustrado na Figura 17, para estabelecer comunicação entre o núcleo computacional e o transceptor sem fio, é preciso utilizar um adaptador de níveis de tensão de 5V (usado pelo PIC) para 2,8V (usado pelo transceptor).

Figura 17 – Interface UART1: PIC18F2553 e transceptor GM862-GPS.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

d) Módulo de enlace integrado

Os módulos funcionais do nó de enlace foram descritos acima. Um resumo da configuração básica do *hardware* é apresentado na Tabela 3.

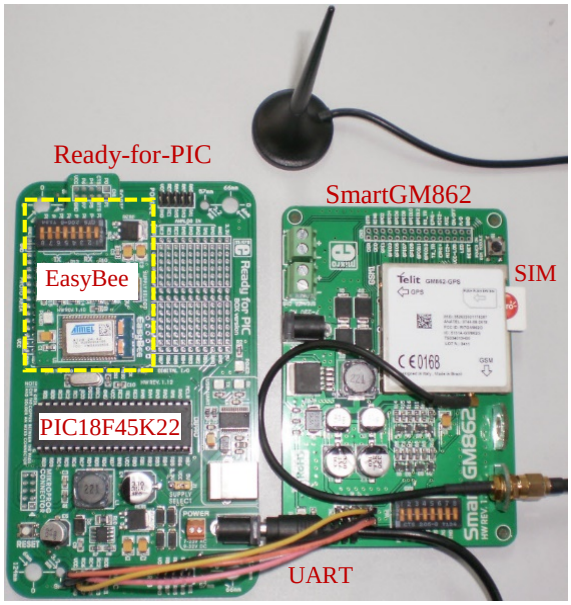
Tabela 3 – Parâmetros básicos do *hardware* do nó de enlace.

Parâmetro do projeto	Especificação
Núcleo computacional	
Microcontrolador	PIC 18F45K22: Arquitetura RISC de 8-bit, 32 MHz.
Memória *flash* interna	32 KB
RAM interna	1536 B
Consumo de energia	6 mA (ativo), 14 µA (*standby*)
Interfaces UART	UART1: 38,4 kbps; UART2: 19,2 kbps
Transceptor ZigBee	
Configuração	ZC: coordenador ZigBee
Frequência de operação	Banda ISM 2,4 GHz
Taxa de transferência de dados	UART: 19,2 kbps
Faixa de comunicação	100 m
Consumo de energia	<6 mA (modo suspensão), 19 mA (Rx), 18 mA (Tx)
Transceptor GSM/GPRS	
Frequência de operação	Banda 1900 MHz
Taxa de transferência de dados	UART: 38,4 kbps

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para implementar a unidade de enlace como um todo, usaram-se as seguintes placas de desenvolvimento fabricadas pela empresa MikroEletronika: (1) Ready-for-PIC; (2) EasyBee; e (3) SmartGM862. A placa Ready-for-PIC é usada para implementar o módulo do núcleo computacional. A placa EasyBee corresponde ao módulo transceptor ZigBee. A placa SmartGM862O corresponde ao módulo transceptor GSM/GPRS. As interfaces UART de ambos módulos transceptores têm incorporados os correspondentes adaptadores de tensão. Todos os módulos têm os conectores apropriados para serem interligados. Na Figura 18 mostra-se uma fotografia do protótipo de *hardware* da unidade de enlace.

Figura 18 – Protótipo de *hardware* da unidade de enlace.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3 SOFTWARE DO SISTEMA DE WSHM PROPOSTO

Como mencionado anteriormente, o sistema de WSHM consta de um centro de monitoramento remoto (notebook ou PC), um servidor central (que inclui uma base de dados apto a armazenar comandos de controle e os dados de SHM), um nó de enlace e múltiplos NSIs. No centro de monitoramento são emitidos os comandos necessários para que um ou mais NSIs possam realizar as tarefas de aquisição e análise de dados e, se for solicitado ou dano tem sido detectado, os NSIs enviam os dados para o servidor central, para análise posterior. O nó de enlace é o canal de comunicação entre o servidor central e os NSIs.

O *software* escrito para o sistema de WSHM é dividido em três partes: (1) *software* de computador para o centro de monitoramento remoto, (2) *firmware* para o nó de enlace e (3) *firmware* para o NSI. Considerando que o centro de monitoramento remoto e os NSIs devem se comunicar frequentemente, foram desenvolvidas sub-rotinas para permitir uma completa integração e coordenação das comunicações. Diagramas de estado são construídos para descrever em detalhe o fluxo dos programas usados para a transferência de informação. O objetivo do diagrama de estado é codificar uma sequência sincronizada de ações, tanto para o nó de enlace como para o NSI, de modo que todos os potenciais cenários (ou estados) comumente encontrados em um canal sem fio confiável possam ser tratados de forma eficiente.

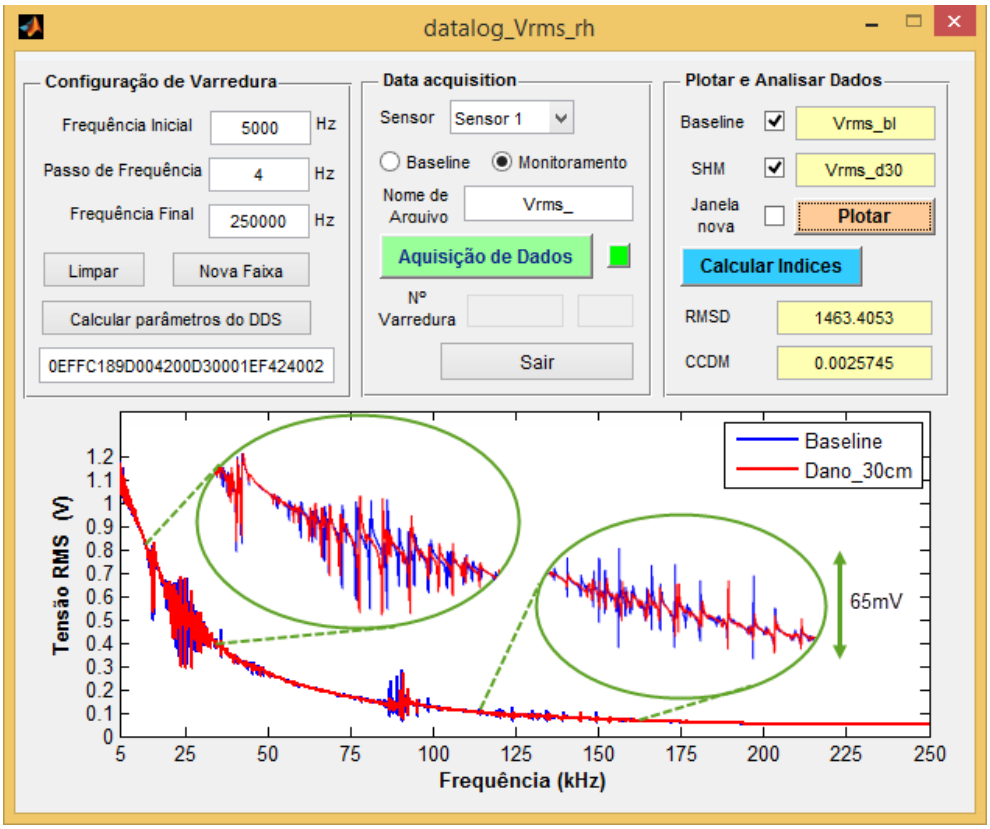
4.3.1 Software de computador para o centro de monitoramento remoto

A comunicação é sempre iniciada no centro de monitoramento remoto. Na Figura 19 é mostrada uma interface de simples utilização, desenvolvida em Matlab, para ser usada no centro de monitoramento remoto. Basicamente, o usuário deve primeiro definir os valores da varredura de frequência nas caixas de texto "Frequência Inicial", "Passo de Frequência", " Frequência Final" e selecionar o número do sensor e o tipo de aquisição. No servidor central, é estabelecida uma área de *swap* utilizada para armazenamento temporário dos comandos de controle, parâmetros de configuração e dados, que é composta de tabelas implementadas em um banco de dados. A interface tem uma caixa de texto para colocar o nome de um arquivo que é usado para salvar os dados de uma aquisição.

Em uma seção da tela é possível traçar, em um gráfico, as assinaturas *baseline* e as assinaturas de monitoramento (correspondentes às tensões *rms* atualizadas), sendo traçado por *default* um gráfico com os dados da última aquisição.

Para traçar e/ou analisar dados armazenados em arquivos, deve-se especificar os nomes correspondentes nas caixas de texto identificados como "*Baseline*" e "SHM". Utilizando os dados desses arquivos e para a faixa de frequência especificada nas mesmas caixas de texto, "Frequência Inicial" e " Frequência Final", pode ser plotado um gráfico comparativo das assinaturas e podem ser calculados os índices de dano métrico, RMSD e CCDM. Essa interface apresenta a aparência que foi desenvolvida para analisar um experimento específico, mas, no entanto, pode ser utilizada para outras estruturas e com outros tipos de danos, desde que sejam especificados os nomes corretos dos arquivos de dados (arquivos com extensão .mat).

Figura 19 – Interface do centro de monitoramento remoto de fácil utilização.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

4.3.2 Firmware do NSI

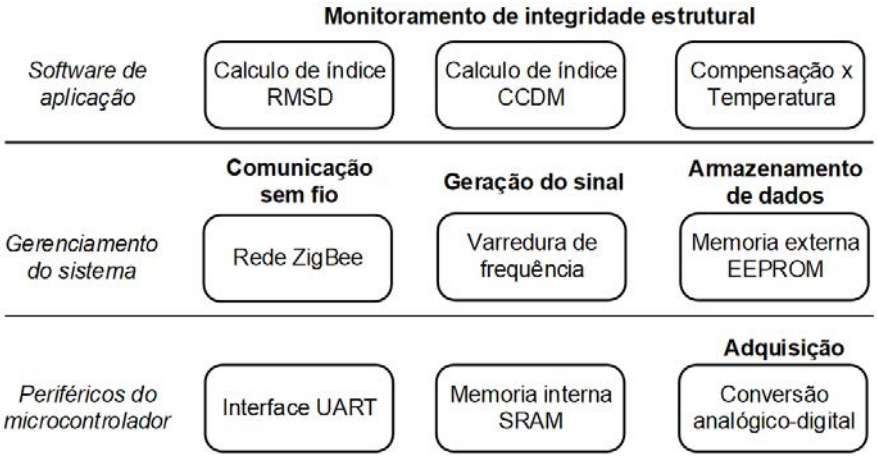
Visando implementar as diversas funcionalidades do NSI, foi desenvolvido o *firmware* do seu núcleo computacional (o PIC18F2553). O *firmware* foi escrito na linguagem assembly usando a ferramenta gratuita de desenvolvimento IDE Mplab da Microchip Technology. Após ser compilado é carregado na memória *flash* do PIC.

O *firmware* do NSI segue uma estrutura de três camadas, como mostrado na Figura 20. No nível mais baixo estão os módulos de *software* que gerenciam os periféricos incorporados no PIC. Na camada do meio estão os módulos de *software* que gerenciam funções em nível de sistema. Os módulos de *software* de aplicação para o SHM são implementados na camada de nível superior.

No Capítulo 5 descreve-se o *software* de aplicação encarregado da compensação dos efeitos da variação de temperatura. Na Subseção 4.3.4 descrevem-se os protocolos de comunicação sem fio para o NSI e nó de enlace. A seguir, um resumo dos comandos AT é

apresentado, apenas para mostrar os comandos básicos usados para configurar os módulos de comunicação sem fio e como proceder para realizar um envio de dados. Maiores detalhes dos comandos AT podem ser encontrados em (MESHNETICS, 2008).

Figura 20 – Arquitetura de *software* para o núcleo computacional do NSI.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

a) Preparando o NSI como ZED para networking na rede ZigBee

O transceptor de um NSI deve ser configurado para funcionar como dispositivo final ZigBee (ZED). Nesse caso é necessário executar, sequencialmente, os seguintes comandos AT:

Comando	Descrição
“AT+WAUTONET=0 z”	Desativar networking automático;
“ATX”	Define o nó para transmitir eventos e dados;
“AT+GSN=2”	Define o endereço MAC para o NSI;
“AT+WPANID=1620”	Define o PAN ID do NSI;
“AT+WCHMASK=100000”	Define a máscara nó canal;
“AT+WROLE=1 +WSRC=55”	Define a função de ZED com endereço lógico 55;
“AT+WAUTONET=1 z”	Habilita networking automático.

Cada um dos comandos antes mencionados deve ser enviado em forma de sequência de caracteres e finalizados com o código 0x0D (CR: *Car Return*). Por cada comando executado, deve-se esperar a sequência “OK” como resposta, o que indica que o comando foi executado com sucesso. Essa configuração é armazenada em memória permanente do módulo. Portanto, esse processo deve ser realizado uma vez só, ou quando for preciso mudar sua função.

Para configurar outros NSIs é necessário que os endereços MAC e endereços lógicos sejam diferentes dos que já foram usados.

b) Envio de dados entre nós de uma rede ZigBee

Para enviar dados através da rede ZigBee, o núcleo computacional do nó emissor deve executar, sequencialmente, os seguintes comandos AT:

Comando	Descrição
“ATD <endereço_destino>”,<CR>	exemplo: “ATD 55”,13
“DATA:<sequencia_de_dados>”,<CR>	até 92 caracteres úteis.

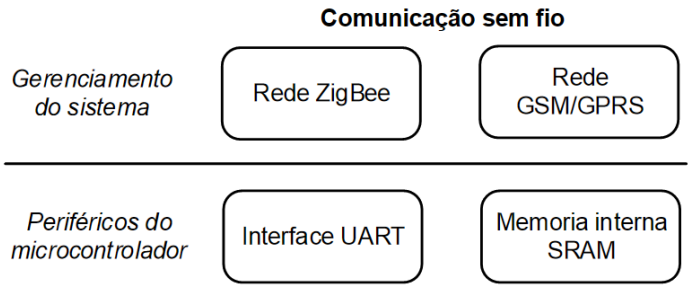
Uma transmissão de dados em modo broadcasting pode ser feita usando o comando “ATDU” no lugar de do comando “ATD”; nesse caso não se especificam os endereços.

4.3.3 Firmware do nó de enlace

A fim de implementar as diversas funcionalidades do nó de enlace, foi desenvolvido o *firmware* do seu núcleo computacional (PIC18F45K22). Esse *firmware* também foi escrito na linguagem assembly e carregado na memória *flash* do PIC.

O *firmware* do nó de enlace segue uma estrutura de duas camadas, como mostrado na Figura 21. Na camada inferior estão os módulos de *software* que gerenciam os periféricos incorporados no PIC. A camada superior é composta pelos módulos de *software* que gerenciam as comunicações sem fio.

Figura 21 – Arquitetura de *software* para o núcleo computacional do nó de enlace.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

a) Preparando o nó de enlace como ZC para networking na rede ZigBee

O transceptor do nó de enlace deve ser configurado para funcionar como coordenador ZigBee (ZC). Portanto, desde o núcleo computacional são enviados sequencialmente, via interface UART, os seguintes comandos AT:

Comando	Descrição
“AT+WAUTONET=0 z”	Desativar networking automático
“ATX”	Define o nó para transmitir eventos e dados
“AT+GSN=1”	Define o endereço MAC para o NSI
“AT+WPANID=1620”	Define o PAN ID do NSI
“AT+WCHMASK=100000”	Define a máscara nó canal
“AT+WROLE=0 +WSRC=0”	Define a função de ZC com endereço lógico 0
“AT+WAUTONET=1 z”	Habilita networking automático

b) Comunicação básica do nó de enlace com o servidor central via rede GSM/GPRS

Para estabelecer comunicação com o servidor central (servidor HTTP), o núcleo computacional deve enviar, via interface UART, os seguintes comandos AT:

Comando	Descrição
AT	Verifica se módulo se encontra ativo.
AT+CPIN?	Verifica o status do cartão SIM.
+CPIN: READY	Cartão SIM está pronto
AT+IPR=115200	Configura a taxa de transmissão do modem GSM
AT+cgdcont=1,“IP”, “operadora.com.br”,”0.0.0.0”,0,0	Realiza conexão com internet
AT#USERID = "operadora"	Ingressa usuário (definido pela operadora)
AT#PASSW = "senha"	Ingressa senha (definido pela operadora)
AT#GPRS=1	Pedido de conexão à rede GPRS
+IP: 177.173.199.19	Sucesso na conexão (IP da operadora)
AT#SKTD=0,80,” 187.45.244.146”,0,0	Conexão com o servidor web (IP do servidor)
CONNECT	Sucesso na conexão

c) Envio de dados ao servidor central usando o método POST

O método de requisição POST do protocolo HTTP permite que o servidor web aceite uma quantia arbitrária de dados anexados no corpo de uma mensagem de requisição enviada para armazenamento. Normalmente é usado quando se faz o upload de um arquivo ou envia-se um formulário web completo. Um campo de cabeçalho na requisição POST normalmente indica o tipo de mídia da Internet que será anexada no corpo da mensagem.

Após conseguir sucesso na conexão com o servidor Web, tanto para enviar dados ao servidor como para receber dados do servidor, o núcleo computacional deve enviar uma sequência de caracteres via interface UART.

A sequência usada para ler os parâmetros de configuração do DDS, desde a base de dados, instalada no servidor, é a seguinte:

```
"POST /sistema/gprs.php HTTP/1.1",13, 10, "Host: IP_host", 13, 10
"Connection: keep-alive", 13, 10
"Content-Type:  application/x-www-form-urlencoded", 13, 10
"Content-Length:19", 13, 10, 13, 10
"nome=Ler_bd&qtd=3", 13, 10
```

O parâmetro IP_host, exemplo 187.45.244.146, corresponde ao IP do servidor HTTP. No arquivo de nome gprs.php, normalmente se encontram inclusos os comandos que coletam informação desde a base de dados instalada no servidor, neste caso os dados que correspondem a uma varredura de frequência para um sensor especifico.

O núcleo computacional recebe como resposta uma sequência com o formato seguinte: "ESC:*n*:*xx*:<parâmetros_DDS>". Sendo, ESC um identificador, *n* o modo de monitoramento (0: não existe pedido, 1: modo SHM e 2: *baseline*) e *xx* o número que identifica um NSI específico. O campo <parâmetros_DDS> deve ser preenchido por um código hexadecimal composto de 28 caracteres e usado para definir uma varredura de frequência no DDS.

A sequência usada para enviar os dados dos sensores para o servidor central é a seguinte:

```
"POST /sistema/gprs.php HTTP/1.1",13, 10, "Host: IP_host", 13, 10
"Connection: keep-alive", 13, 10
"Content-Type:  application/x-www-form-urlencoded", 13, 10
"Content-Length:Num", 13, 10, 13, 10
"nome=Var&qtd=", 13, 10
dado1:dado2:dado3:.....:dadoN
13, 10, 13, 10
```

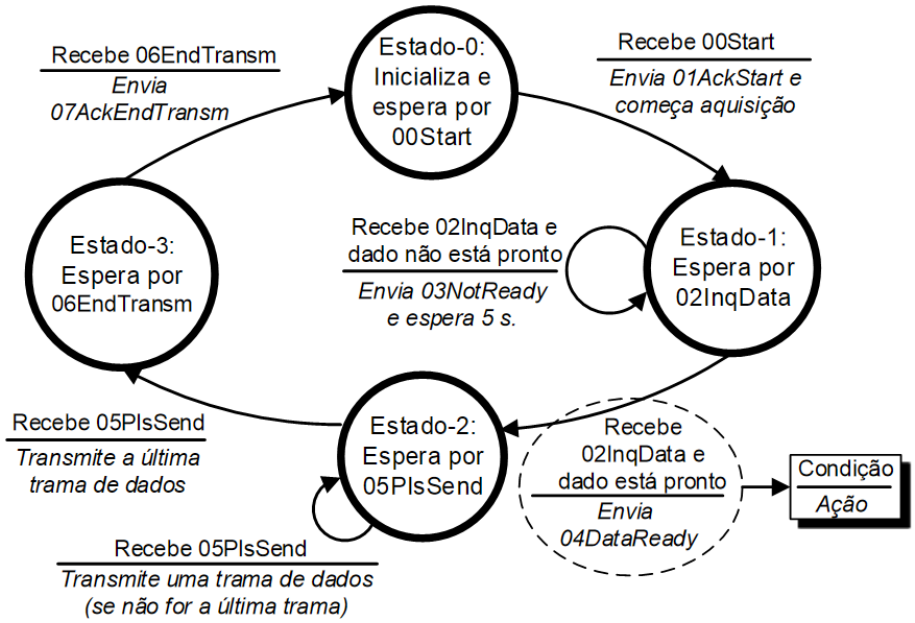
O parâmetro Num especifica o comprimento do corpo da mensagem, em número decimal de octetos. O parâmetro Var especifica um nome que pode ajudar a identificar o tipo de dados a serem enviados. Lembrando que um dado é composto por quatro casas decimais, usa-se o “:” como identificador de separação entre dado e dado, o que ajuda muito na separação dos dados

no destino. No arquivo de nome gprs.php, também deve-se incluir os comandos necessários para separar os dados e enviá-las para uma tabela da base de dados.

4.3.4 Protocolos de comunicação sem fio para o NSI e nó de enlace

Em muitos procedimentos ou sistemas de identificação de danos, os dados coletados individualmente mediante diferentes sensores devem ser sincronizados no tempo. Um sistema de aquisição de dados robusto deve ser suficientemente confiável e capaz de recuperar-se de eventuais falhas de comunicação encontradas. O projeto do protocolo de comunicação entre o nó de enlace e um NSI usa o conceito de máquina de estado, como uma forma de garantir a confiabilidade do canal de comunicação. Uma máquina de estado finito consiste de um conjunto de estados e das transições definidas entre esses estados. Em qualquer instante de tempo, a máquina de estado pode estar apenas em um dos estados possíveis, ou em trânsito entre os dois estados, em resposta a diferentes eventos.

Figura 22 – Diagrama de estado para comunicação sem fio do NSI.



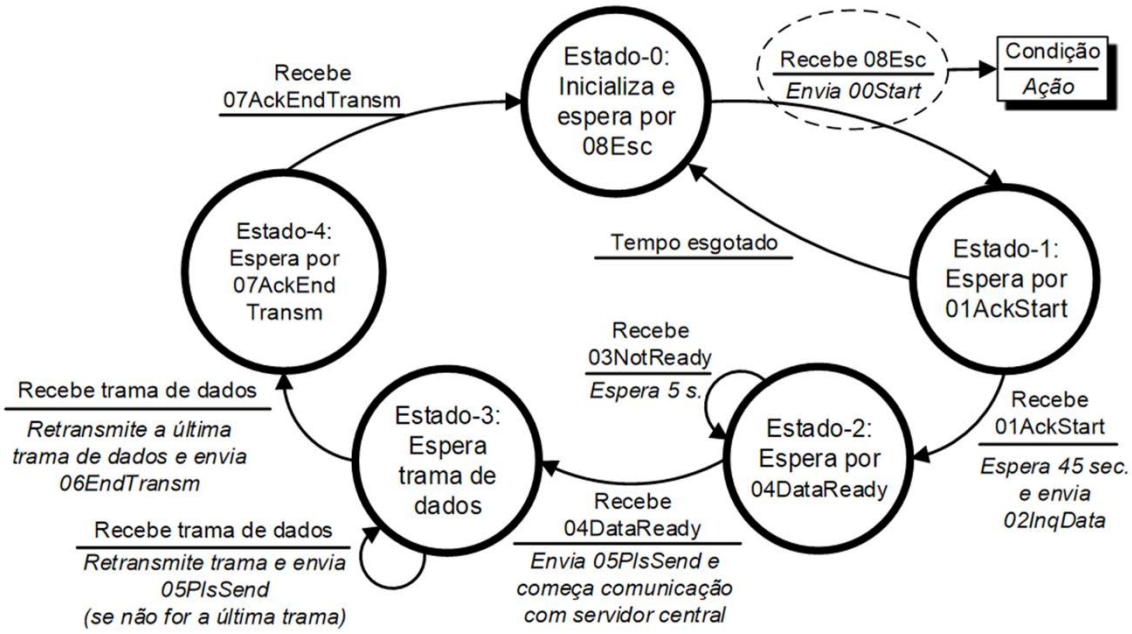
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 22 e 23, mostram-se os diagramas de estado simplificados para os *software* de comunicação sem fio do NSI e do nó de enlace, respectivamente. Cada diagrama de estado descreve o fluxo do programa para realizar os procedimentos apropriados de sincronização na transferência de dados. Nesses diagramas de estado, cada círculo com linha grossa significa um

estado possível; as linhas com setas representam as transições de estado. Como mostrado nas legendas para cada transição de estado, o texto normal acima da linha horizontal especifica o evento/condição sob a qual a transição deve acontecer, e o texto em itálico abaixo da linha horizontal especifica o serviço/ação a ser executada durante a transição.

Quando um NSI é ligado ou ativado após do *sleep*, a unidade começa no "Estado-0" e fica aguardando o *beacon* '00Start', ver Figura 22. O *beacon* '00Start' é transmitido desde o nó de enlace junto com os parâmetros da varredura. Assim que o NSI receber '00Start', ele envia '01AckStart' para o nó de enlace, em seguida, começar a aquisição de dados, salvando-as na sua memória externa e transita para o "Estado-1". Se estando no "Estado-1", o NSI receber "02InqData" e a aquisição de dados não estiver pronta, ele envia "03NotReady" para o nó de enlace e permanece no "Estado-1". Se a aquisição de dados foi completada, o NSI envia "04DataReady" para o nó de enlace e imediatamente transita para o "Estado-2". Estando no "Estado-2", o NSI transmite para o nó de enlace os dados armazenados na memória externa; sempre que o NSI receber "05PlsSend", ele envia uma trama de dados para o nó de enlace. Quando a última trama de dados é transmitida, o NSI muda para o "Estado-3". Estando no "Estado-3", se o NSI receber "06EndTransm", ele envia "07AckEndTransm" para o nó de enlace e retorna para o "Estado-0" ou vai para o *sleep*.

Figura 23 – Diagrama de estado para comunicação sem fio do nó de enlace.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por sua vez, quando o nó de enlace é ligado, ele começa no "Estado-0", ver Figura 23. O *beacon* '08Esc' é obtido pelo nó de enlace desde o servidor central, junto com os parâmetros da varredura. O *beacon* "08Esc" determina se os NSIs irão começar a aquisição. Assim que o nó de enlace receber "08Esc", ele envia "00Start" para o correspondente NSI e transita para o "Estado-1". Estando no "Estado-1" e dentro de um intervalo de 5s, o nó de enlace espera receber "01AckStart" desde o NSI. No caso de não receber "01AckStart", e o tempo limite de 5s for esgotado, o nó de enlace recomeça no "Estado-0". Se receber "01AckStart", em seguida, o nó de enlace aguarda o tempo estimado para aquisição de dados em uma varredura completa, neste caso de 45s, antes de enviar "02InqData" para o NSI e transitar para o "Estado-2". Se estando no " Estado-2", o nó de enlace receber "04DataReady", ele transita para o "Estado-3" e inicia a comunicação com o servidor remoto; no caso contrário, se o nó de enlace receber "03NotReady", ele espera um tempo de 5s e volta para o "Estado-2". Estando no "Estado-3", o nó de enlace retransmite para o servidor central todos as tramas de dados recebidos do NSI. Quando a última trama de dados é retransmitida para o servidor central, o nó de enlace envia "06EndTransm" para o NSI e transita para o "Estado-4". Finalmente, estando no "Estado-4", se o nó de enlace receber "07AckEndTransm", ele recomeça no "Estado-0".

4.4 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

Visando avaliar o desempenho do sistema proposto, alguns testes foram realizados utilizando como espécime uma placa de alumínio (estrutura monitorada) de 500×30×2 mm^3 com massa de 86,72 g, como mostrado na Figura 24. Um transdutor circular de PZT, modelo 7BB–27–4 da Murata, com diâmetro de 19,7 mm e espessura de 0,24 mm foi colado em uma das extremidades da placa utilizando cola a base de cianoacrilato. Dano estrutural foi induzido na estrutura colocando uma carga (pequena porca de aço de 3,16 g) a diferentes distâncias do transdutor piezelétrico. A carga representa 3,64% do peso da placa de alumínio. Esse método é geralmente utilizado na literatura e tem a vantagem de não causar danos permanentes no espécime sob teste.

Neste estudo, um NSI foi instalado com a estrutura monitorada a uma distância máxima de 35 m do nó de enlace, pois a comunicação sem fio do módulo transceptor foi realizada usando sua antena interna. Além do gerenciamento dos NSIs, o processamento das assinaturas de tensão *rms* e o cálculo dos índices de dano foram realizadas em um *notebook* usando a interface de *software* mostrada na Figura 19.

Figura 24 – Estrutura/PZT e porca de aço.



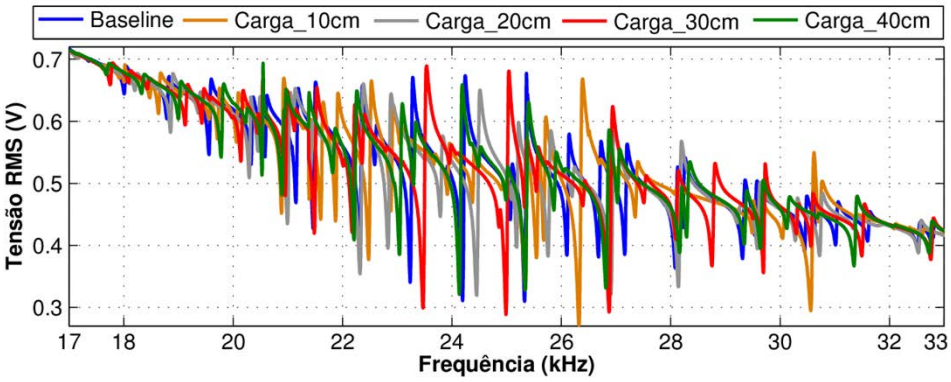
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como mencionado anteriormente, a assinatura *baseline* representa as medições de tensão *rms* no transdutor para a estrutura na condição íntegra (sem carga) e as assinaturas de monitoramento representam as medições de tensão *rms* no transdutor para a estrutura na condição "danificada".

Primeiramente, a assinatura *baseline* foi registrada, depois, novas assinaturas de monitoramento foram obtidas mediante a colocação da carga a distâncias de 10, 20, 30 e 40 cm do transdutor piezelétrico. Os índices RMSD e CCDM foram calculados utilizando as Equações (13) e (14) para as faixas de frequência de 17–33 kHz e 120–140 kHz com passos de 4 Hz. As faixas de frequências para calcular os índices de dano foram determinadas experimentalmente, considerando que nessas faixas os índices de dano oferecem uma melhor sensibilidade para a detecção de danos. No entanto, diferentes faixas podem ser obtidos para outros tipos de estruturas, transdutores ou danos. Além disso, deve-se notar que o sistema proposto permite analisar a estrutura para frequências desde 5 kHz até 250 kHz. O monitoramento de dano para frequências mais altas pode ser realizado utilizando um projeto apropriado.

Para a estrutura usada neste estudo, foi observado experimentalmente que a faixa de frequência de 17–33 kHz é a faixa que oferece maior sensibilidade para a detecção de danos. Esse fato pode ser observado na ilustração apresentada na Figura 19. Então, para observar maiores detalhes dessa faixa, as diferentes assinaturas são mostradas na Figura 25.

Figura 25 – Assinaturas de tensão *rms* para a faixa de frequência de 17–33 kHz.

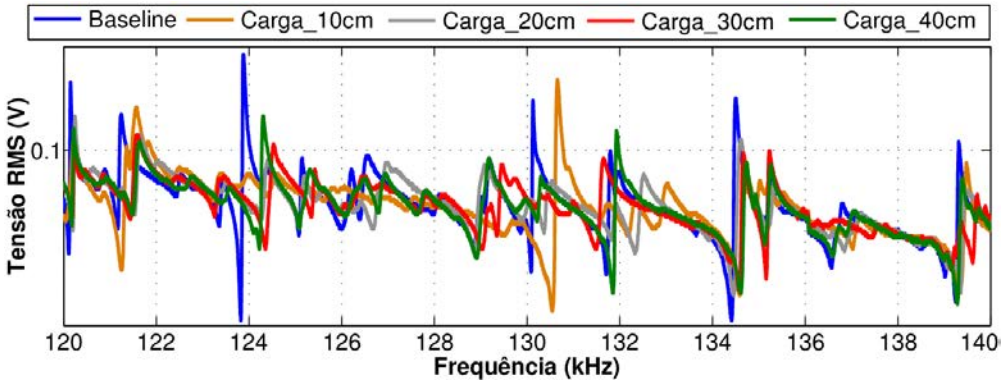


Fonte: Elaboração do próprio autor.

É comprovado que a mesma faixa de frequência é sensível para o SHM se outros danos foram induzidos, colocando cargas de diferente forma, tamanho e peso (2, 4, 6 e 8 gramas).

Por outro lado, a fim de mostrar a boa resolução do sistema de aquisição, na Figura 26 são apresentadas as diferentes assinaturas para a faixa de frequência de 120–140 kHz, mesmo parecendo que essas assinaturas têm variações muito pequenas, segundo a ilustração apresentada na Figura 19.

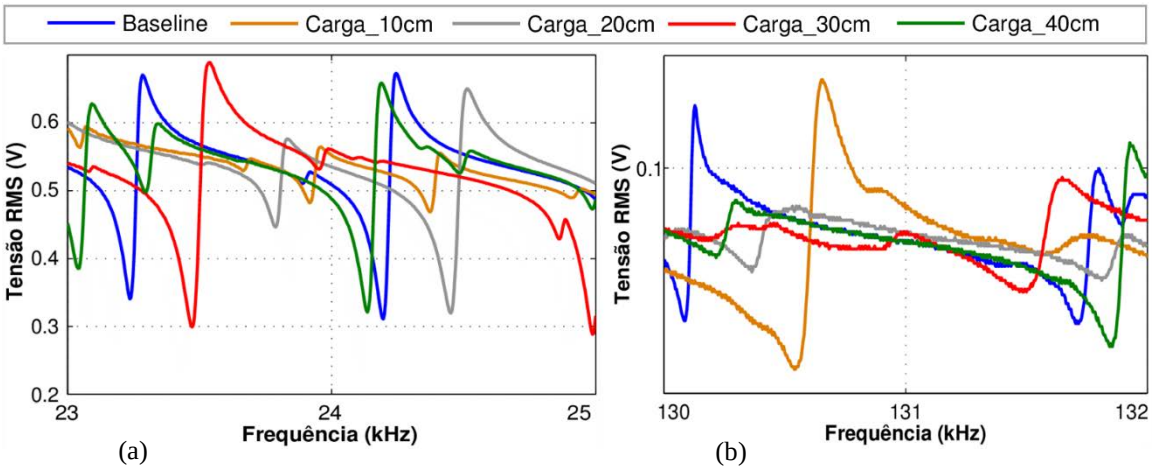
Figura 26 – Assinaturas de tensão *rms* para a faixa de frequência de 120–140 kHz.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Assim, na Figura 27 mostram-se as diferentes assinaturas obtidas, porém apenas para duas faixas estreitas, que são: (1) 23–25 kHz e (2) 130–132 kHz. O uso de faixas estreitas é para permitir uma boa comparação entre as assinaturas.

Figura 27 – Assinaturas de tensão *rms* para (a) faixa de frequências baixas e (b) faixa de frequências altas.



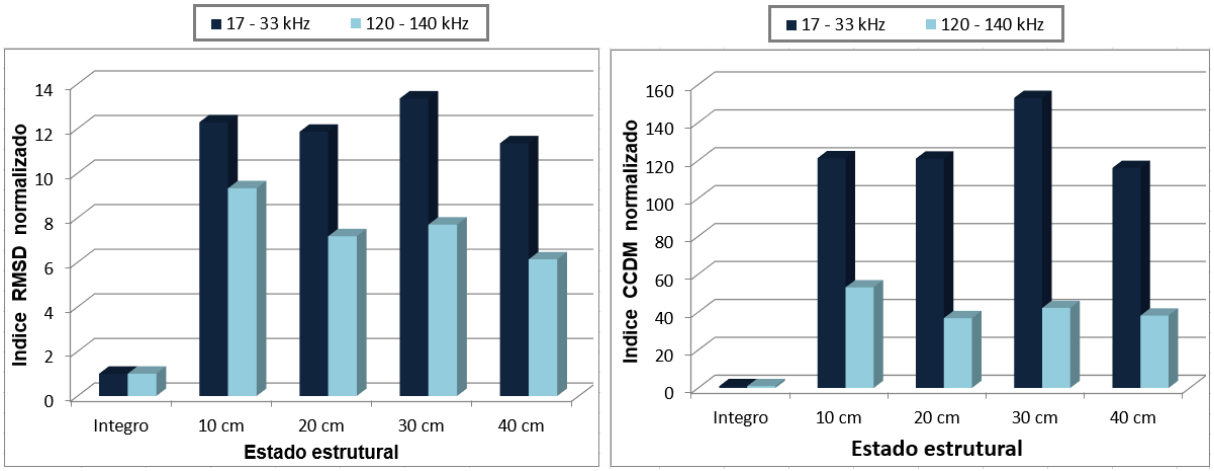
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 27, observa-se que a presença de cargas causa variação substancial nas assinaturas de tensão *rms*, particularmente quando a carga é localizada a distâncias de 30 e 10 cm do transdutor piezelétrico, para as faixas de frequências baixas e frequências altas, respectivamente. Esses resultados confirmam que a tensão *rms* é sensível e, portanto, viável para detectar danos em estruturas.

Usando a interface de *software* descrita na Seção 4.3.1, o NSI foi gerenciado com sucesso através da RSSF. A transferência de comandos e dados foram realizados dentro dos intervalos de tempo previstos, comprovando que os algoritmos de comunicação sem fio implementados, descritos na Seção 4.3.4, funcionam satisfatoriamente. De fato, foram realizados vários testes comprovatórios para cada um dos casos analisados, verificando que existe repetitividade nas medições e que as assinaturas de tensão *rms* obtidas através da RSSF são similares às obtidas em (CORTEZ; VIEIRA FILHO; BAPTISTA, 2013).

Uma comparação quantitativa, ou mais exata, é possível através dos índices de dano. Na Figura 28 apresentam-se os índices (a) RMSD e (b) CCDM calculados para as faixas de frequência de 17–33 kHz e 120–140 kHz. Ambos os índices foram normalizados considerando o valor de 1,00 para a estrutura em estado íntegro.

Figura 28 – Índices (a) RMSD e (b) CCDM obtidos para as condições de estrutura íntegra e com danos localizados às distâncias de 10, 20, 30, e 40 cm do transdutor piezelétrico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O índice CCDM proporcionou melhores resultados. Quando comparados com a condição de estrutura íntegra, os valores dos índices CCDM obtidos para a estrutura com dano induzido são 120 vezes maiores para a faixa de frequências baixas e perto de 40 vezes maiores para a faixa de frequências altas. Particularmente, quando a carga é localizada a distâncias de 30 e

10 cm do transdutor piezelétrico, as proporções são de 153 vezes (para a faixa de frequências baixas) e 53 vezes (para a faixa de frequências altas), respectivamente. Por outro lado, os valores obtidos para o índice RMSD foram menores. As proporções entre a condição de estrutura danificada e estrutura íntegra estão entre 11,4 e 13,4 para a faixa de frequências baixas e entre 6,1 e 9,3 para a faixa de frequências altas.

Em ambas as faixas de frequência analisadas, é possível estabelecer um limiar, acima do qual, uma estrutura sujeita a dano pode ser considerada danificada. A escolha do limiar dependerá de diversos fatores, entre eles o tipo de estrutura e o tipo de dano a ser detectado. No caso da estrutura em estudo, um exemplo prático para estabelecer o valor do limiar pode ser baseado nos valores obtidos dos índices; para o índice RMSD esse valor pode ser 5 e para o índice CCDM esse valor pode ser 30. Mudanças na estrutura que provocam maiores valores dos índices, podem ser indicadores que existe dano na estrutura. Portanto, os resultados experimentais indicam conclusivamente que o sistema sem fio proposto é viável para detectar danos estruturais.

Embora os índices de dano sejam mais baixos para a faixa de frequências altas, isso não indica uma deficiência do sistema proposto, pois a medições sempre foram verificadas por testes de repetitividade. De acordo com o estudo apresentado por Baptista e Vieira Filho (2010), espera-se que os índices diminuam à medida que a frequência aumenta. Por outro lado, é difícil observar uma tendência nos valores dos índices, ainda que as cargas fossem as mesmas e colocadas apenas em diferentes lugares, uma vez que a mudança na resposta dinâmica da estrutura é distinta em cada caso e a colagem do transdutor em cada lugar da estrutura é diferente.

4.5 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste capítulo foi apresentar o desenvolvimento e a implementação de um novo sistema integrado de RSSF para SHM, no qual os algoritmos de comunicação e detecção de dano foram devidamente integrados com os transdutores, microcontroladores e transceptores sem fio, disponíveis no mercado.

Em relação aos trabalhos existentes atualmente na literatura, este trabalho apresenta as seguintes contribuições: a primeira é o desenvolvimento e implementação de um sistema de WSHM como um todo, com capacidade para escalar um grande número de nós que podem ser gerenciados de qualquer parte do mundo, sendo possível monitorar estruturas reais de grande

porte. A segunda é o desenvolvimento de um novo método para identificar mudança estrutural (detecção de dano), que consiste na análise das assinaturas de tensão *rms* de transdutores piezelétricos. Esse método não depende da taxa de amostragem de conversores analógico-digitais e, portanto, sistemas com *hardware* e *software* mais simples podem desenvolvidos. A terceira contribuição é o desenvolvimento e implementação de um NSI para avaliar *online* o estado de integridade de uma estrutura, inclusive quando a estrutura está exposta a variações de temperatura ambiente. O NSI está preparado para: coletar e armazenar as assinaturas de tensão *rms* de transdutores piezelétricos; realizar a compensação *online* dessas assinaturas devido aos efeitos da variação de temperatura; analisar as assinaturas através do cálculo de índices de dano para de determinar se existem, ou não, mudanças na resposta dinâmica da estrutura; e no caso de dano ser detectado, enviar os dados para um centro de controle, para posterior e melhor análise

Embora até aqui o NSI indique ser uma ferramenta promissora para detecção de danos em estruturas e com suporte para ser gerenciado remotamente, os resultados analisados neste capítulo foram obtidos com dados coletados a temperatura ambiente, sem considerar sua variação. Porém, em aplicações práticas, as variações nas assinaturas das tensões *rms* podem ter outras causas além do dano como, por exemplo, as mudanças nas condições ambientais, principalmente da temperatura. No próximo capítulo, apresenta-se um método para compensar os efeitos devido à variação da temperatura ambiente que foi desenvolvido e implementado como uma função adicional do NSI.

Capítulo 5 COMPENSAÇÃO PARA OS EFEITOS DA TEMPERATURA

Em aplicações práticas, os sistemas de SHM baseados na técnica da EMI se encontram expostos a mudanças de variáveis ambientais, principalmente da temperatura, apresentando um desafio para avaliar a veracidade dos danos detectados através de modelagens estatísticas das assinaturas de tensão *rms* ou assinaturas de impedância elétrica. Neste capítulo é descrito um método de compensação aplicado para minimizar os efeitos das variações de temperatura sobre as assinaturas de tensão *rms* de transdutores piezelétricos. O método foi implementado e incorporado no NSI, como uma aplicação para evitar a falsa detecção de dano. Foram realizados testes experimentais, colocando a estrutura monitorada em uma câmara ambiental com temperatura controlada na faixa de 0–60°C. Os resultados indicam que o método reduz significativamente os falsos positivos provocados pela variação de temperatura.

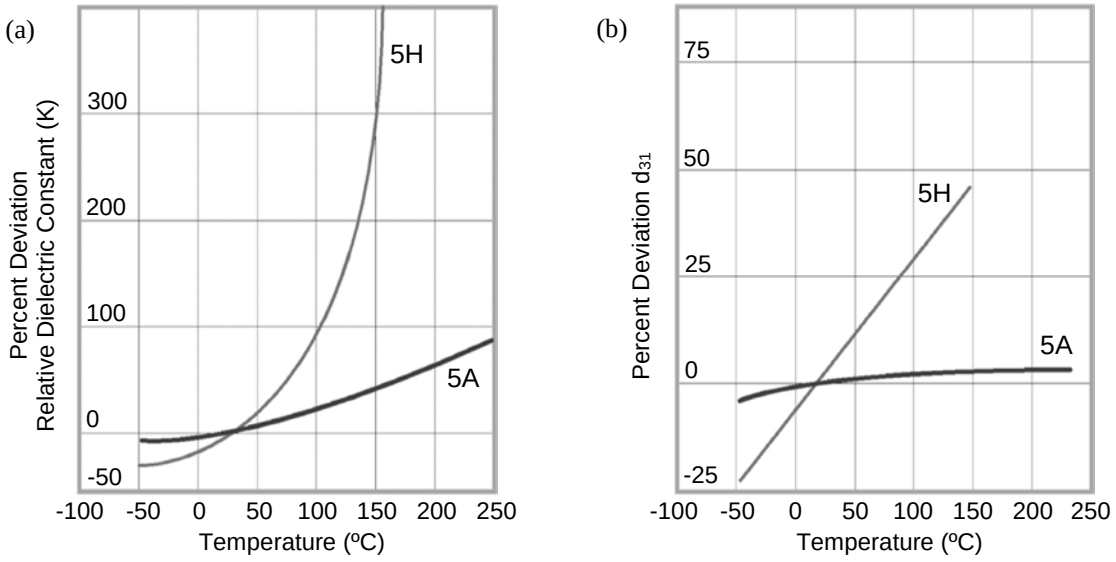
5.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de SHM baseados na técnica da EMI utilizam o acoplamento eletromecânico de materiais piezelétricos para detectar mudanças adversas e danos mecânicos em materiais e estruturas. Os materiais piezelétricos, geralmente, exibem propriedades de resposta dinâmicas em alta frequência, as quais são utilizadas na detecção de danos incipientes (PARK et al., 1999). Por outro lado, sabe-se que o tamanho do dano mensurável em uma estrutura geralmente é inversamente proporcional à faixa de frequências do sinal de excitação (FARRAR; WORDEN, 2013). Assim, esses tipos de sistemas de SHM apresentam elevada sensibilidade a alterações na estrutura e, portanto, são muito sensíveis a variáveis exógenas, tais como a temperatura, que afeta desde as propriedades do transdutor, até a deformação na estrutura.

Vários estudos têm mostrado que as diferentes propriedades (elásticas, dielétricas, piezelétricas e piroelétricas) das cerâmicas piezelétricas de PZT são influenciadas de forma distinta pelas variações de temperatura, dependendo da composição a da técnica de produção. Além disso, o módulo de Young e o coeficiente de Poisson variam levemente com a temperatura, induzindo mudanças nas frequências naturais de um material ou estrutura, em particular, nas frequências de ressonância estruturais (BASTANI et al., 2011; BERLINCOURT; CURRAN; JAFFE, 1964; BUETHE; ECKSTEIN; FRITZEN, 2014; HOOKER, 1998; LEE; SARAVANOS, 1997; LI et al., 2010; SABAT et al., 2006; SHERRIT et al., 1999).

Exemplos da influência da temperatura sobre algumas propriedades de cerâmicas piezelétricas típicas são mostrados na Figura 29. Pode-se notar que um aumento da temperatura conduz a um aumento significativo das constantes dielétrica e de acoplamento piezoeléctrico para a piezo-cerâmica PSI-5H. Na piezo-cerâmica PSI-5A, essas propriedades são menos sensíveis à temperatura do que na PSI-5H, mas ainda apresentam uma importante dependência da temperatura. Assim, qualquer mudança na temperatura irá causar um desvio nas assinaturas tensão *rms* devido às alterações nas propriedades das cerâmicas piezelétricas.

Figura 29 – Típica influência da temperatura sobre algumas propriedades das piezo-cerâmicas PSI-5A e PSI-5H: (a) constante dielétrica, (b) constante piezelétrica relativa.



Fonte: (PIEZO SYSTEMS, 2011).

Embora as propriedades das ondas, de sensores e atuadores piezelétricos tenham sido estudadas extensivamente, o efeito da variação de temperatura é menos compreendido. Assim, técnicas de identificação de danos que considerem os efeitos da variação de temperatura são necessárias. Se esses efeitos não são considerados na fase de processamento de sinais de um sistema de SHM, a análise de assinaturas de tensão *rms* ou assinaturas de impedância elétrica podem resultar em falsas indicações de dano.

Portanto, as técnicas de detecção de dano não são aceitas em aplicações práticas, a menos que as condições ambientais e operacionais são explicitamente consideradas. Então, vários métodos foram sugeridos para compensar as medições de impedância elétrica devido às variações de temperatura.

Krishnamurthy; Lalande e Rogers (1996) estudaram experimentalmente os efeitos da temperatura. O estudo mostrou que a variação de temperatura desloca a magnitude da

impedância elétrica e que um aumento de temperatura leva a uma diminuição na grandeza da impedância. Os autores apresentaram um método para eliminar os efeitos da temperatura sobre um sensor tipo PZT PSI-5A, mas que não elimina os efeitos da temperatura que afeta a estrutura. Também concluíram que a variação do parâmetro d_{3x} não afeta a impedância, enquanto que as variações de impedância estrutural deslocam horizontalmente os picos de ressonância da impedância elétrica.

Park et al. (1999) mostraram que as frequências de ressonância da impedância são desviadas com a temperatura. Usando um parâmetro de desvio de frequência, propuseram realinhar a assinatura de impedância *baseline* registrada a uma temperatura de referência com as assinaturas *baseline* registradas a outras temperaturas. Para obter um parâmetro que corrige o desvio de frequência usaram uma métrica RMSD modificada. Por sua parte, Bhalla e Soh (2003) também investigaram a influência da temperatura sobre as assinaturas de impedância elétrica. De acordo com os resultados apresentados por ambas as pesquisas, a resistência elétrica, isto é, a parte real da impedância, é mais sensível para a detecção de danos estruturais e menos susceptível aos efeitos da temperatura.

Koo et al. (2009) estudaram os efeitos da variação de temperatura nas medições da magnitude de impedância elétrica e sobre o deslocamento de frequência. Propuseram uma técnica de compensação baseada nos coeficientes de correlação cruzada para minimizar os efeitos da temperatura sobre as medições de impedância elétrica, estabelecendo que o desvio ótimo de frequência corresponde ao caso em que o coeficiente de correlação é máximo. Também mostraram que a relação entre a frequência de ressonância e a temperatura é linear para múltiplas ressonâncias sobre a faixa de temperatura estudada.

Park et al. (1999) e Koo et al. (2009) sugeriram que o desvio de frequência é o fator dominante a considerar para compensar os efeitos da temperatura nas medições de impedância.

Baptista, Vieira Filho e Inman (2011) apresentaram um sistema de SHM baseado na EMI para monitorar uma estrutura em tempo real. Utilizam os coeficientes de correlação para compensar os efeitos da temperatura apenas sobre a parte real da impedância elétrica.

Konchuba (2011) propôs alguns ajustes em dois métodos existentes para compensar os efeitos da temperatura na detecção de danos. O primeiro refere-se ao método do desvio de frequência e o segundo foi o método do momento central. Mediante a utilização de momentos estatísticos investigou um método para criar uma *baseline* de impedância elétrica independente da temperatura, porém esse método é altamente dependente da forma e condições de contorno.

Wang et al. (2013) apresentaram um método de compensação de temperatura que combina a seleção de uma *baseline* ótima com um método de filtragem baseado em uma rede

neural tipo ADLINE (*Adaptive Linear Neuron*). As assinaturas *baseline* foram obtidas para cada temperatura sob teste e um método baseado em mínimos quadrados permite escolher posteriores valores de *baseline*.

Baptista et al. (2014) apresentaram um estudo experimental sobre o efeito da variação de temperatura sobre medições de impedância elétrica e implementaram um método de compensação baseado nos coeficientes de correlação para determinar o valor efetivo do deslocamento de frequência.

Resumindo, as alterações na resposta dinâmica de uma estrutura sob os efeitos variação da temperatura implicam alterações na aquisição das assinaturas de tensão *rms* ou impedância elétrica, sendo as principais: deslocamento das frequências naturais da estrutura (considerado o principal efeito), variação na amplitude da tensão *rms* ou impedância elétrica do PZT, e variação na largura de banda ao redor da frequência de ressonância.

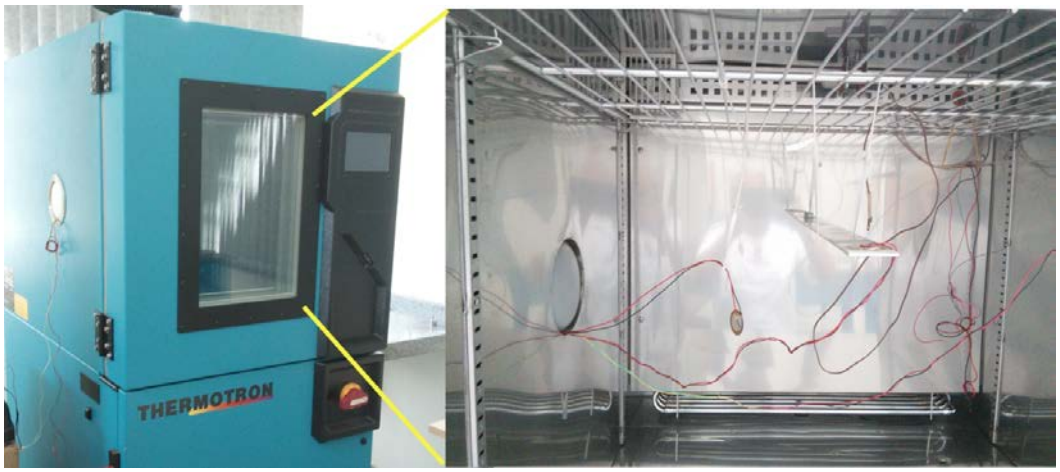
Na próxima seção é apresentado o procedimento experimental para coletar os dados das assinaturas de tensão *rms* em função da temperatura.

5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As caraterísticas da estrutura e do transdutor piezelétrico utilizadas nesta seção são as mesmas que se encontram descritas na Seção 4.4 e ilustradas na Figura 24. Essa placa de alumínio simples foi escolhida porque o foco deste trabalho está nos aspectos de processamento de sinais da compensação de temperatura e não na dependência estrutural dos processos térmicos subjacentes. Também foi simulado um dano localizado a 30 cm do transdutor usando como carga a mesma porca de aço de 3,16 g.

Para realizar a aquisição de dados das assinaturas de tensão *rms*, o acoplamento Estrutura/PZT, chamado aqui corpo de prova, é colocado dentro de uma câmara climática modelo SM-8-8200 da THERMOTRON (fotografia da Figura 30). A câmara climática utiliza uma termopar que, para neste estudo, foi colocado perto do copo de prova. Os dados foram coletados estabelecendo o valor da temperatura em intervalos determinados de tempo, dentro da faixa de 0°C até 60ºC com incrementos de 5ºC, sendo executados vários ciclos de teste. Tanto a estrutura como o PZT solto foram pendurados com elásticos, apresentando o estado livre-livre para minimizar os efeitos de amortecimento e/ou rigidez. A câmara climática foi cedida pelo laboratório de "Controle e Sistemas Inteligentes" do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – Ilha Solteira.

Figura 30 – Fotografia da câmara climática modelo SM-8-8200 da Thermotron.

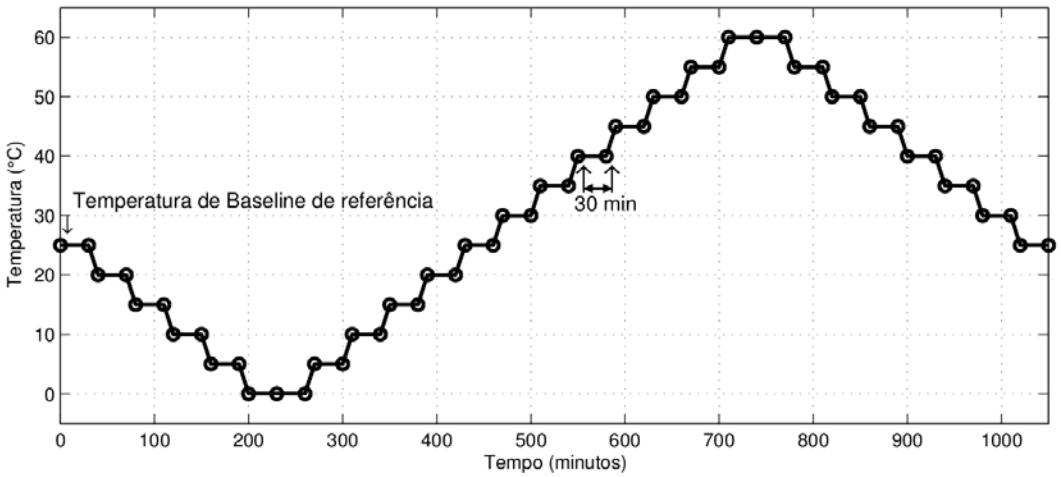


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2.1 Corpo de prova sob carregamento de temperatura

Em cada medição de temperatura, a câmara climática é deixada durante 30 minutos até chegar ao estado estacionário e o corpo de prova assimilar essa temperatura e, em seguida, a tensão *rms* é medida. Após a medição da tensão *rms*, a temperatura da câmara é mudada para o próximo passo à taxa 0,5ºC por minuto. Como mostrado na Figura 31, o teste começou à temperatura ambiente de 25ºC, aqui referida como "temperatura nominal", e diminui gradativamente com um passo de 5ºC, até chegar a 0ºC. Em seguida, aumenta gradativamente de 0ºC para 60ºC e, finalmente, diminui de 60ºC para 25ºC. Concluídas as medições, a câmara é deixada em repouso por um longo período de tempo. Esse processo foi repetido três vezes.

Figura 31 – Função de carregamento de temperatura usado na câmara climática.



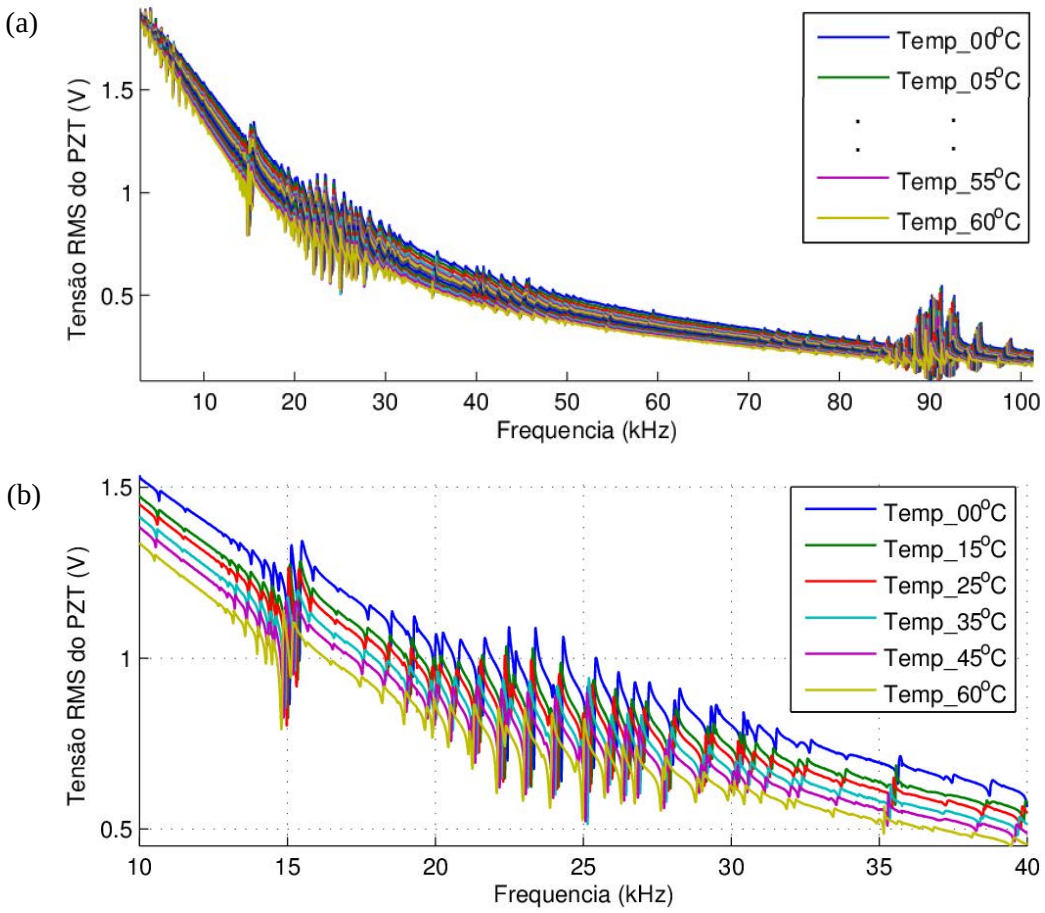
Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.2.2 Aquisição dos dados de tensão RMS

O NSI foi usado para realizar a aquisição de dados das assinaturas de tensão *rms* do transdutor piezelétrico. Um *software* de PC foi usado para gerenciar a RSSF apenas no âmbito da rede ZigBee. Esse *software* se comunica com o nó de enlace via interface USB, sem alterar suas funções de comunicação através da rede ZigBee e foi condicionado apenas para realizar a aquisição de dados usando a câmara climática.

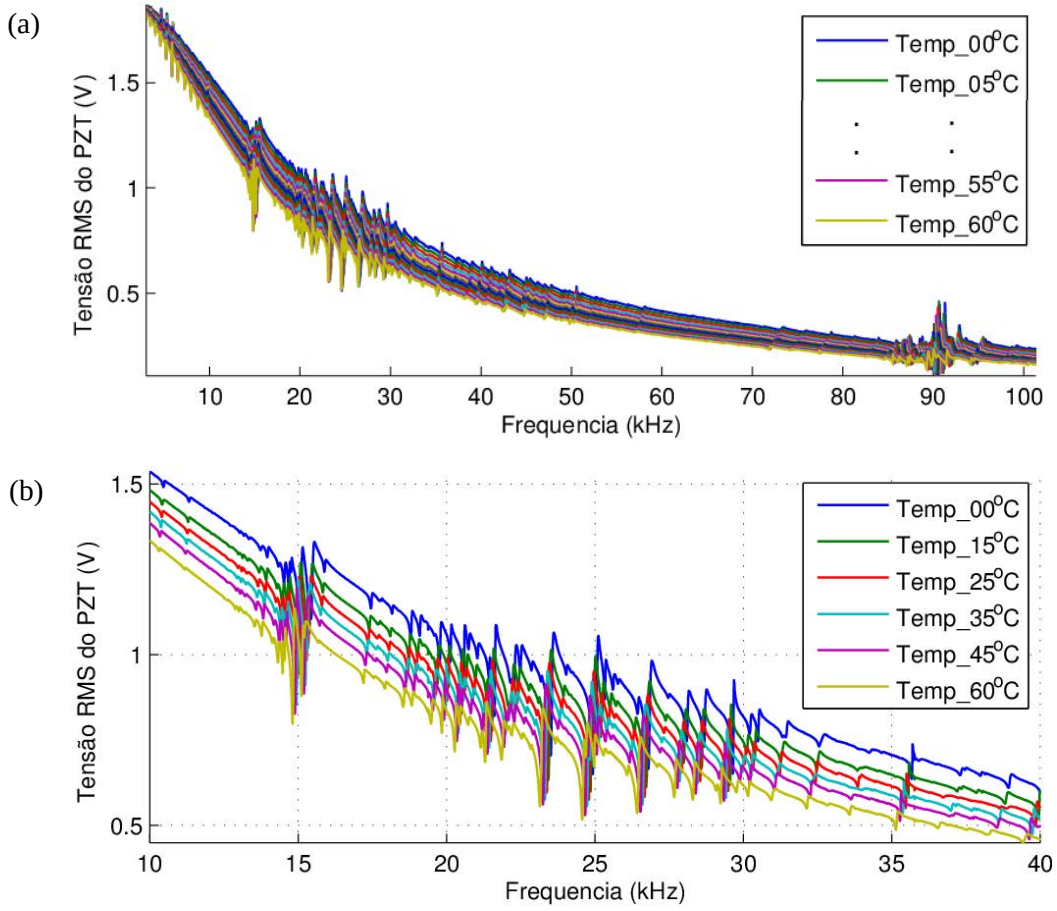
Nas Figuras 32–34, são mostrados os gráficos dos dados correspondentes às assinaturas de tensão *rms*: *baseline*, de monitoramento com carga localizada a 30 cm do transdutor e do PZT solto. Na parte superior, para todas as temperaturas compreendidas nos testes na faixa de frequência de 3–100 kHz. Na parte inferior, apenas para algumas temperaturas na faixa de frequência de 10–40 kHz; neste caso a faixa é mais estreita, porém ilustra maiores detalhes.

Figura 32 – Assinaturas *baseline*: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz.



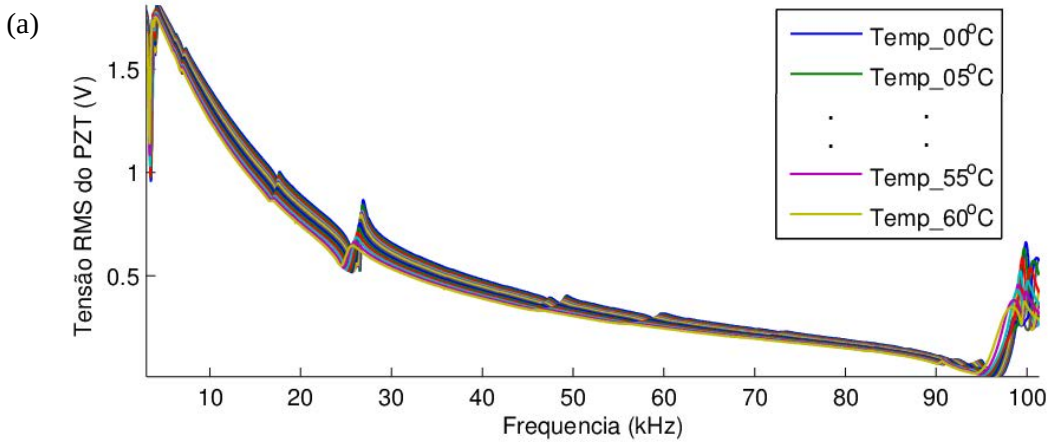
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 33 – Assinaturas com carga localizada a 30 cm: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz.

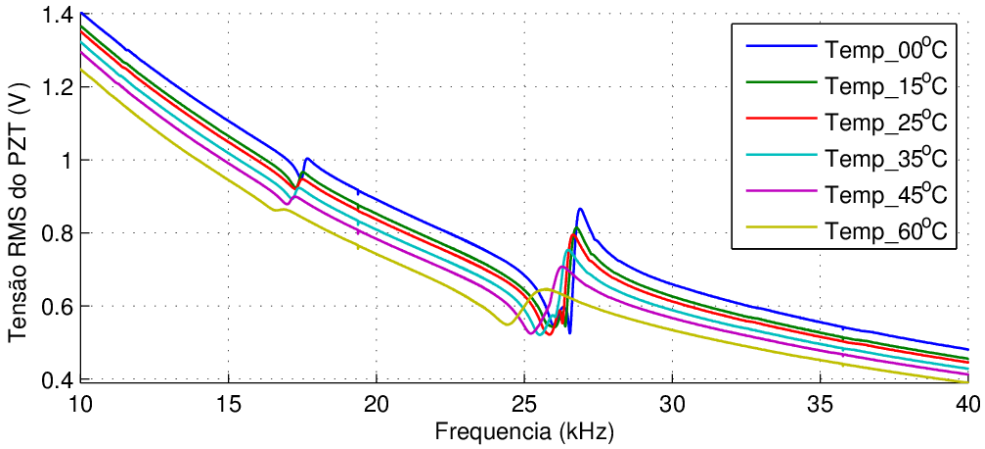


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 34 – Assinaturas do PZT solto: (a) na faixa de 3–100 kHz, (b) na faixa de 10–40 kHz.



(b)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.3 COMPENSAÇÃO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

As variações de temperatura ambiente podem provocar deformações térmicas em um material ou estrutura. Essas deformações provocam mudanças nas assinaturas de tensão *rms* ou impedância elétrica do PZT. Se tais assinaturas não são compensadas, o modelo estatístico para a detecção de danos pode produzir resultados incorretos. No entanto, as assinaturas *baseline* de uma estrutura de engenharia real só podem ser adquiridas durante uma época do ano. Durante esse tempo, a temperatura pode ser apenas um pequeno subconjunto das temperaturas experimentadas pela estrutura através das restantes estações.

Assim, ter um registro de assinaturas *baseline* a qualquer temperatura *Tx*, permite avaliar a mudança estrutural, quando comparadas com as assinaturas atualizadas obtidas a *Tx,* pois as mudanças detectadas só dependeriam do dano e não do efeito da temperatura. Mas, nem sempre isso é possível, sendo necessários métodos alternativos para que, a partir de uma assinatura baseline à temperatura conhecida, possam ser obtidas novas assinaturas (assinaturas compensadas) que serão utilizadas como referência para detectar dano a outras temperaturas.

Nesse contexto, tal como alguns pesquisadores têm mostrado, o desvio das frequências de ressonância é o efeito dominante devido a variações de temperatura. Os métodos de compensação baseados no cálculo do desvio de frequência procuram determinar os valores desses desvios para cada temperatura de monitoramento.

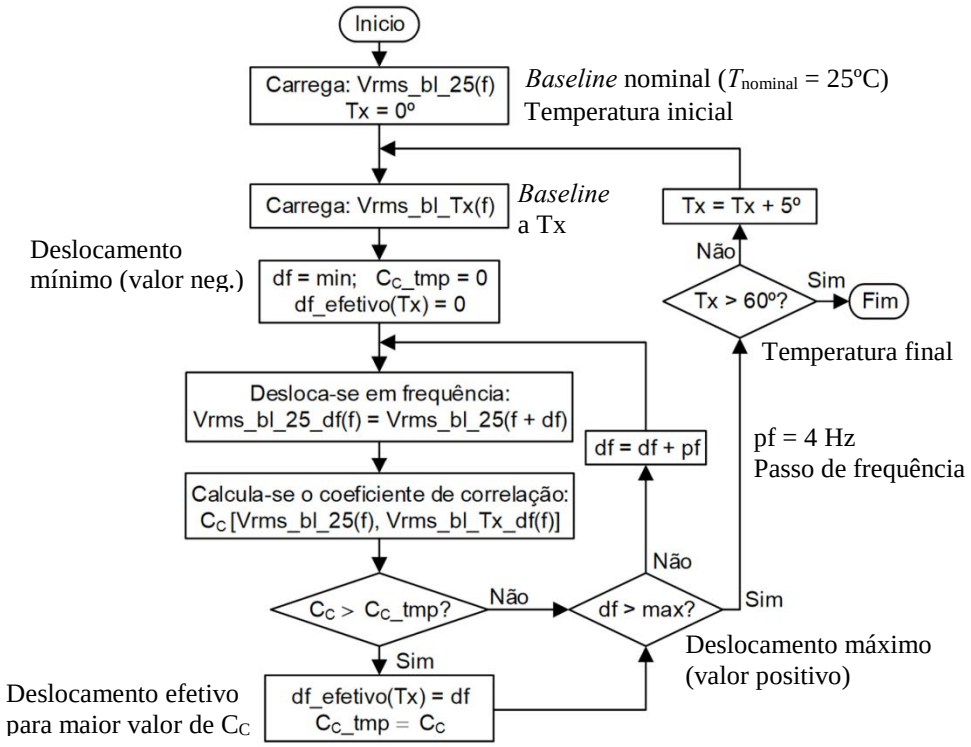
A seguir, descrevem-se os algoritmos para obter o valor efetivo do desvio de frequência, calculado quando as assinaturas *baseline* nominal e *baseline* de monitoramento apresentem maior correlação, ou seja, quando o coeficiente de correlação, C_C , tem seu máximo valor, sendo

que a assinatura *baseline* nominal corresponde à temperatura nominal. Em resumo, o método de desvio de frequência pode ser descrito através dos seguintes algoritmos:

5.3.1 Algoritmo para a etapa de pré-monitoramento

1) Coletar os dados das assinaturas *baseline*, como FRF's, para diferentes temperaturas dentro da faixa que se pretende monitorar;
2) Estabelecer a temperatura de referência, que será considerada como temperatura nominal ($T_{nominal}$ = 25ºC). A assinatura *baseline* obtida nessa temperatura é conhecida como "assinatura *baseline* nominal";
3) Determinar o valor efetivo de deslocamento de frequência. Este processo é detalhado no fluxograma da Figura 35. Para cada temperatura *Tx*, a variável *df_efetivo*(*Tx*) ficará com o valor efetivo do deslocamento de frequência (Δf), que corresponde ao máximo valor do C_C obtido entre as assinaturas *baseline* a *Tx* e *baseline* nominal deslocada em frequência;
4) Determinar a relação para $\Delta f = F(\Delta T)$. Sendo $\Delta T = Tx - T_{nominal} = Tx - 25ºC$.

Figura 35 – Fluxograma para determinar o valor efetivo de deslocamento de frequência.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

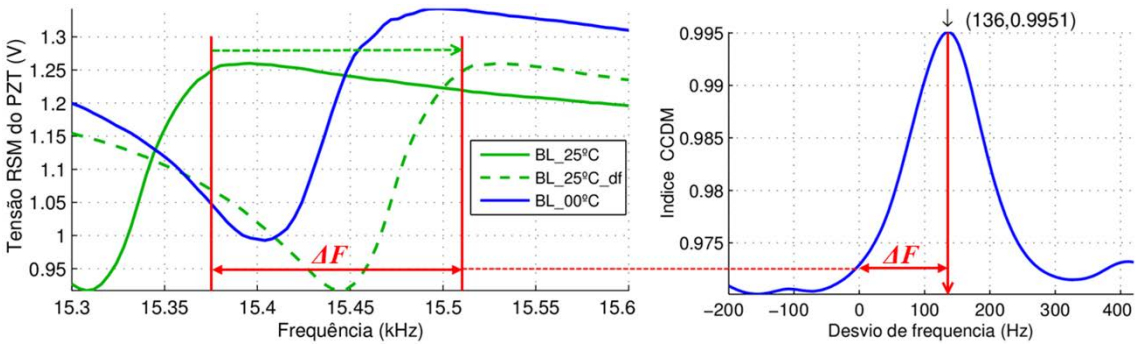
5.3.2 Algoritmo para a etapa de SHM

5) Coletar os dados da assinatura de monitoramento e medir a temperatura atual (T);
6) Obter o valor médio das tensões da assinatura do passo (5): *vm_shm*;
7) Obter $\Delta T = T - T_{\text{nominal}}$;
8) Usando (7) e a relação obtida no passo (4), calcular Δf;
9) Aplicar Δf para deslocar em frequência a assinatura *baseline* nominal;
10) Obter o valor médio das tensões da assinatura *baseline* deslocada: *vm_bl_df*;
11) Calcular o valor do offset de tensões: *V_offset* = *vm_bl_df* – *vm_shm*;
12) Assinatura *baseline* compensada = assinatura *baseline* deslocada – *V_offset*;
13) Usando os registros de dados obtidos nos passos (5) e (12), calcular os índices de dano para determinar se houve qualquer alteração ou mudança estrutural.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

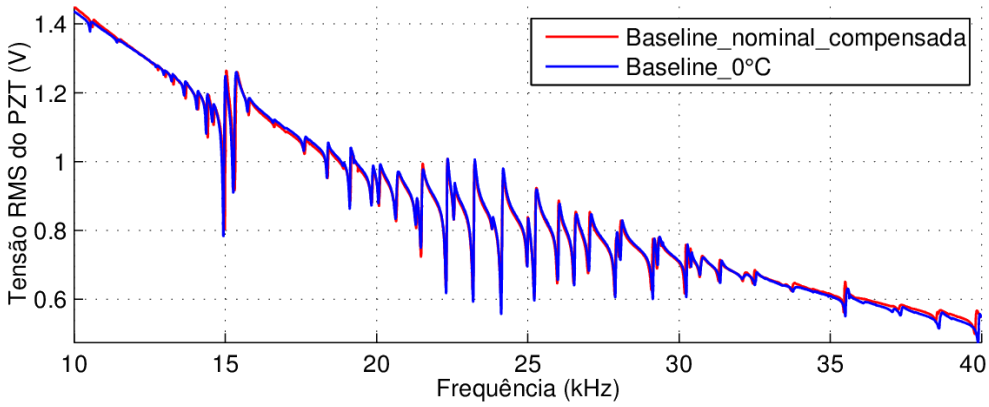
Na Figura 36 ilustra-se a aplicação do método de compensação descrito na Seção 5.3.1. Na parte esquerda é mostrado que a assinatura *baseline* nominal deve-se deslocar em frequência pelo valor de 136 Hz, de modo que se analisada com a assinatura *baseline* obtida a 0ºC, dê como resultado o máximo valor de C_C. Portanto, aplicando o algoritmo da Seção 5.3.2, a assinatura *baseline* nominal foi compensada para a temperatura de 0ºC, deslocando em frequência, em 136 Hz. Na Figura 37 são traçados os novos registros de dados aos quais se referem os itens (7) e (12) do mesmo algoritmo.

Figura 36 – Cálculo do deslocamento efetivo para a assinatura de monitoramento a 0ºC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

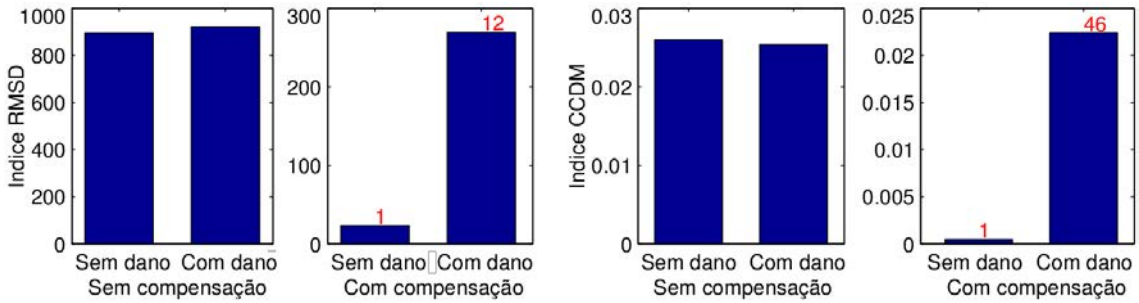
Figura 37 – Assinaturas *baseline* nominal compensado para 0ºC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para avaliar a efetividade do método de compensação, os índices de dano RMSD e CCDM foram calculados usando as Equações (13) e (14), respectivamente, antes e depois da compensação. Os resultados evidenciam que estando a estrutura exposta apenas a uma variação de temperatura, os índices de dano deram uma indicação que existe dano (falso positivo), pois os valores dos índices são quase comparáveis com os valores dos índices no caso de dano existir (dano simulado com carga localizada a 30 cm). Como mostrado na Figura 38, após ser aplicado o método de compensação, existe uma diferença evidente entre os índices de dano, sendo possível estabelecer um limiar a partir do qual pode ser considerado que existe dano estrutural.

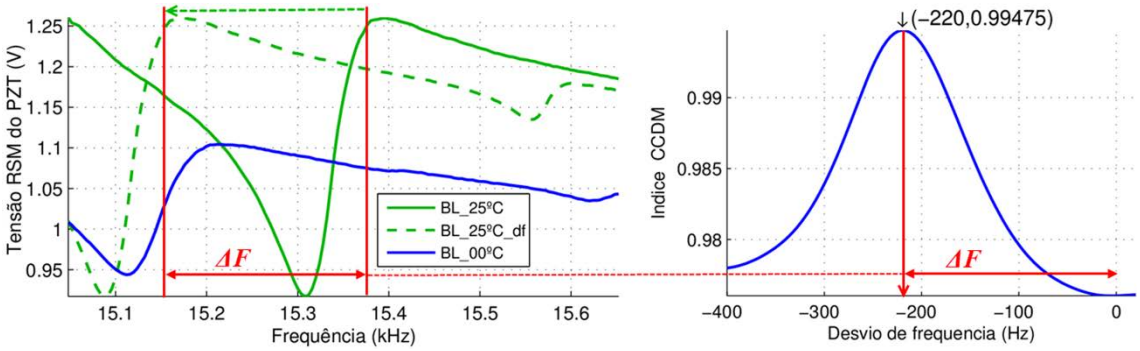
Figura 38 – Índices RMSD e CCDM antes e depois de aplicar o método de compensação a 0ºC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 39 ilustra-se uma outra aplicação do método de compensação descrito na Seção 5.3.1. Na parte esquerda é mostrado que a assinatura *baseline* nominal deve-se deslocar em frequência pelo valor de -220 Hz, de modo que se analisada com a assinatura *baseline* obtida a 60ºC, dê como resultado o máximo valor do C_C.

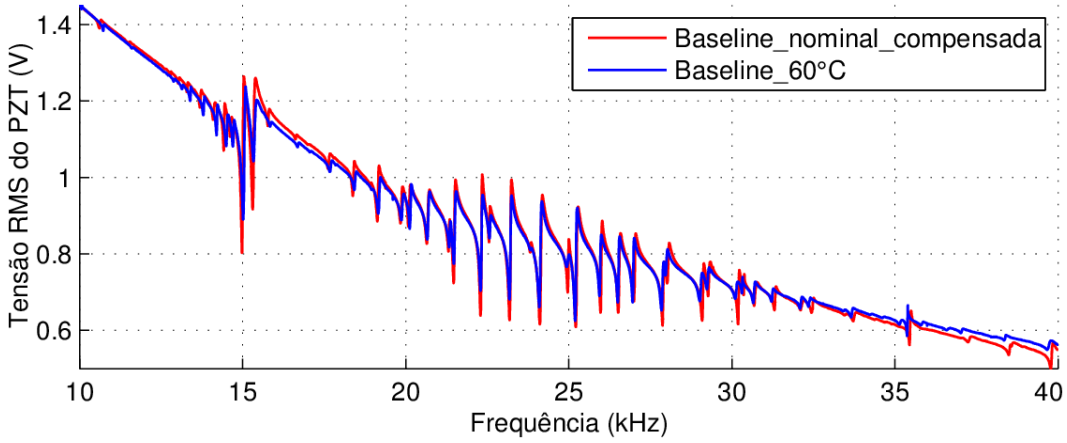
Figura 39 – Cálculo do deslocamento efetivo para a assinatura de monitoramento a 60ºC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Similar ao caso anterior, aplicando o algoritmo da Seção 5.3.2, a assinatura *baseline* nominal foi compensada para a temperatura de 60ºC, deslocando em frequência, em -220 Hz. Na Figura 40 são traçados os novos registros de dados aos quais se referem os itens (7) e (12) do mesmo algoritmo.

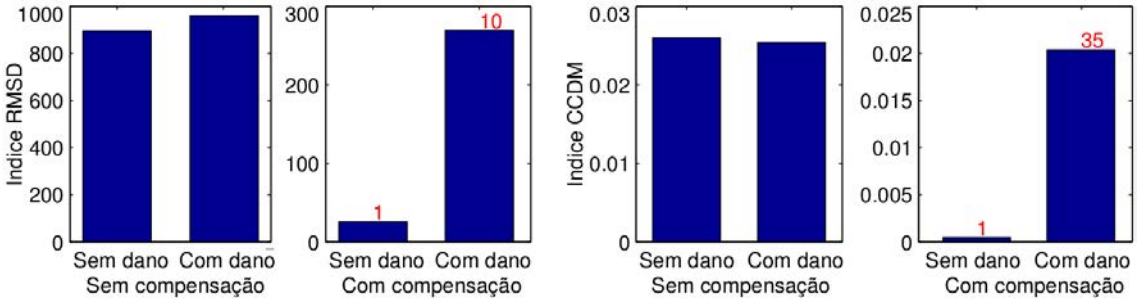
Figura 40 – Assinaturas *baseline* nominal compensado para 60ºC.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os valores dos índices de dano, mostrados na Figura 41, mais uma vez corroboram que o método de compensação permite reduzir o efeito da temperatura e evitar as falsas indicações de dano.

Figura 41 – Índices RMSD e CCDM antes e depois de aplicar o método de compensação a 60ºC.

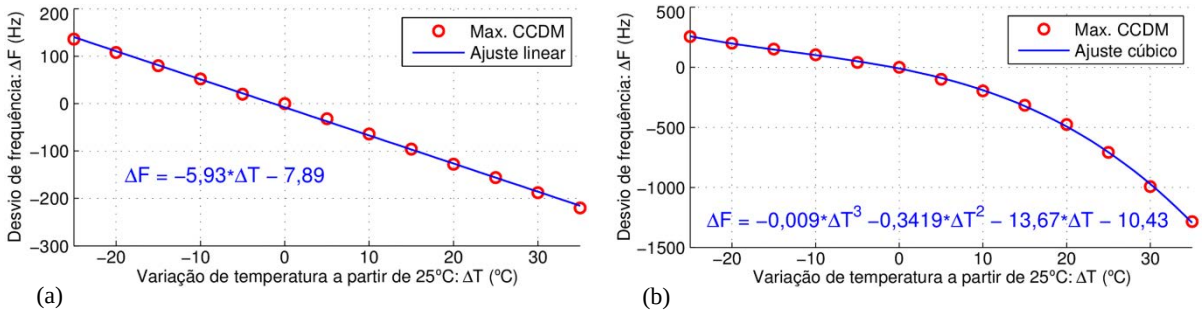


Fonte: Elaboração do próprio autor.

5.4.1 Caracterização do valor efetivo de deslocamento de frequência

A fim de caracterizar o deslocamento de frequência em função da temperatura, utilizando os mesmos algoritmos de compensação, foram obtidos os valores efetivos do deslocamento de frequência para cada uma das temperaturas nas quais as assinaturas foram coletadas. No gráfico da Figura 42(a), um modelo linear caracteriza o deslocamento de frequência para a assinatura *baseline* nominal. No gráfico da Figura 42(b), um modelo cúbico caracteriza o deslocamento de frequência para a assinatura do PZT solto.

Figura 42 – Modelos para estimar Δf: (a) na assinatura *baseline* nominal, (b) na assinatura do PZT solto.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através do modelo linear $\Delta f(\Delta T)$ é possível concluir que o problema da compensação da assinatura *baseline* nominal devido à variação de temperatura é resolvido. Com esse parâmetro linear, o algoritmo de detecção de danos só precisa conhecer a temperatura em que o sinal de tensão *rms* é coletado, para calcular o ΔT da temperatura nominal. Então, utilizando o modelo da Equação (17), Δf pode ser calculado.

$$\Delta F = -5,93 \times \Delta T - 7,89 \tag{17}$$

sendo $\Delta T = T - 25^{o} C$.

A coleta de dados das assinaturas do PZT solto, foram incorporadas incialmente no intuito de encontrar alguma informação que ajude a melhorar o método de compensação da temperatura e por enquanto que não foi possível, mas esses dados poderiam ser uteis para pesquisas posteriores. No entanto, o PZT solto pode ser utilizado como sensor de temperatura.

Como alternativa, foram usados os modelos da Figura 42 para estabelecer uma relação entre o deslocamento de frequência da assinatura do PZT solto (*Δf*) e o deslocamento da assinatura *baseline* nominal (*Δf*_BL_nom). Essa relação é representada na Equação (18).

$$\Delta F_\text{BL_nom} = (1,6904 \times 10^{-07}) \times \Delta f^{3} + 0,00042173 \times \Delta f^{2} + 0.43768 \times \Delta f + 2,0282 \tag{18}$$

Para uma dada temperatura, sem conhecê-la de fato, monitorando apenas os picos de ressonância de um PZT solto, pode-se obter *Δf,* e usando a Equação (17) é possível obter o valor efetivo do deslocamento usado para compensar a assinatura *baseline* nominal.

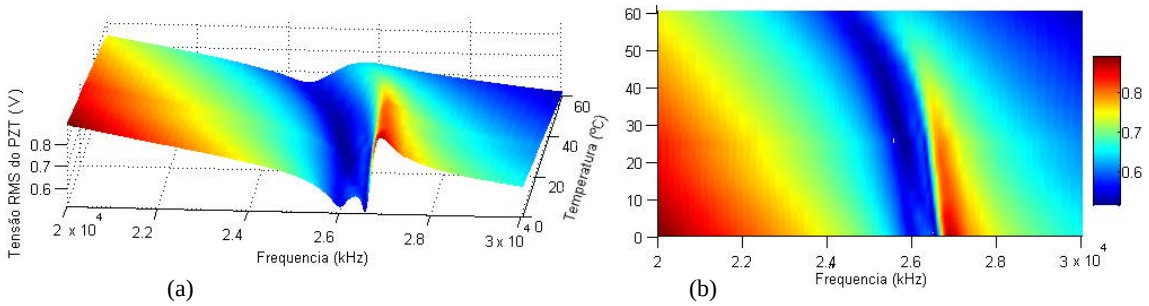
5.4.2 Características do efeito da variação de temperatura

Analisando os gráficos das assinaturas do PZT solto (Figura 43) e das assinaturas *baseline* (Figura 44), para as faixas de frequência de 20–30 kHz e 22–25 kHz, respectivamente, é possível verificar as seguintes alterações nas assinaturas de tensão *rms*:

- Com um aumento na temperatura, as características de ressonância da FRF das assinaturas de tensão *rms* se desviam para frequências mais baixas e sua largura de banda aumenta;
- Um aumento na temperatura provoca um deslocamento em frequência para a esquerda da assinatura da tensão *rms*. De maneira similar, uma diminuição na temperatura provoca um deslocamento para a direita;
- São também observados deslocamentos verticais na amplitude da tensão *rms,* isto é, o valor médio da tensão *rms* decrementa em amplitude. Um aumento de temperatura provoca uma diminuição na amplitude da tensão *rms*;
- Nas assinaturas do PZT solto, observa-se uma clara não linearidade na variação de suas frequências naturais em relação à variação da temperatura;
- Nas assinaturas *baseline* da estrutura monitorada, existe uma tendência linear na variação de suas frequências naturais em relação à variação da temperatura;

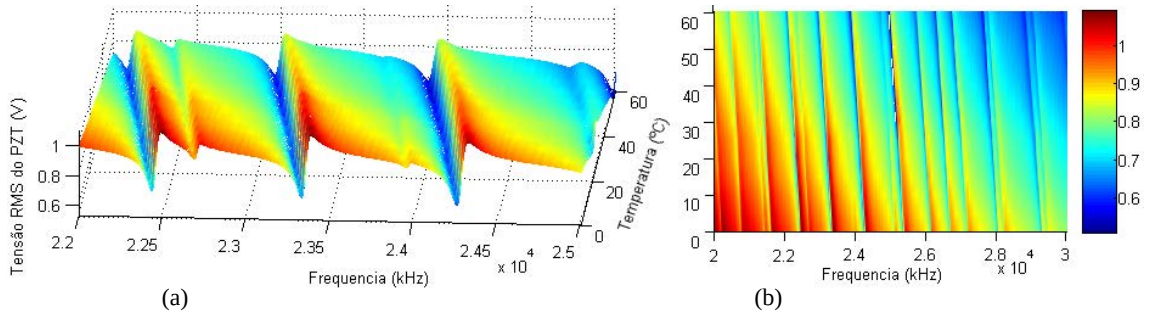
Assim, com base nos resultados experimentais mostrados nas Figuras 32–34 e 43–44, os dados correspondentes às assinaturas de tensão *rms* do PZT têm as mesmas tendências observadas por Park et al. (1999) e Koo et al. (2009) para o caso da impedância elétrica.

Figura 43 – Assinaturas do PZT solto: (a) em perspectiva 3D, (b) Temperatura vs. frequência.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 44 – Assinaturas *baseline*: (a) em perspectiva 3D, (b) Temperatura vs. Frequência.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Por outro lado, apesar de algumas pequenas alterações provocadas por variações de temperatura e possível ruído ambiental, as formas das assinaturas permanecem praticamente inalteradas. É bem sabido que os danos estruturais não só provocam deslocamentos horizontais ou verticais nas assinaturas de impedância elétrica e, portanto, nas assinaturas de tensão *rms*, mas também alteram significativamente a sua forma, que é diferente de alterações causadas por efeitos da variação de temperatura. No entanto, as mudanças observadas nas Figuras 32–34 causam variações consideráveis nos índices de dano, que dificultam o diagnóstico em tempo real da estrutura. Portanto, um sistema de monitoramento em tempo real deve incluir algum método para compensar esses efeitos da variação de temperatura.

5.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi estudado o efeito da temperatura sobre uma placa de alumínio (estrutura), com carga (dano induzido) e sem carga. Foram coletadas assinaturas de tensão *rms* de transdutores para diferentes temperaturas. Usou-se uma câmara climática para mudar a temperatura da estrutura na faixa de 0–60ºC com passos de 5 ºC. Foi caracterizado o deslocamento de frequência em função da temperatura, considerado que o desvio de frequência é o fator dominante adverso apresentado nas respostas do transdutor devido à variação de temperatura, segundo (PARK et al., 1999; KOO et al., 2009). Os valores de deslocamento de frequência, que foram calculados baseado no critério de maximização do coeficiente de correlação (C_C), apresentam uma tendência linear para a faixa de temperatura de 0–60ºC. O deslocamento de frequência caracterizado é utilizado posteriormente para compensar as assinaturas de tensão *rms* dos transdutores.

Então, o SHM foi iniciado com a aquisição das tensões *rms* do um transdutor piezelétrico. Foram realizadas as compensações da assinatura *baseline* nominal para as temperaturas de 0 ºC e 60 ºC. Medições de assinaturas de tensão *rms* de monitoramento, ou seja, com carga e sem carga obtidas nas mesmas temperaturas, foram, então, comparadas com as assinaturas *baseline* compensadas utilizando as métricas de dano RMSD e CCDM a fim de avaliar se a estrutura sofreu qualquer mudança adversa.

Os índices de dano mostram que é possível ter uma falsa indicação de dano se a estrutura (em estado íntegro) for exposta apenas à variação de temperatura. Porém, após realizar a compensação, os índices de dano mostram que é possível estabelecer um limiar, a partir do qual, pode-se considerar que a estrutura sofreu dano.

Quando modelado corretamente, o método de desvio de frequência pode ser muito preciso, especialmente quando o deslocamento de frequência é o efeito dominante devido às mudanças de temperatura. Também, no percurso dos experimentos, foi determinado que as medições de tensão *rms* são dependentes da temperatura atual e não de suas mudanças dinâmicas.

Finalmente, como em todo sistema de SHM baseado na técnica da EMI, os sinais de resposta utilizados não são simples de serem modelados, havendo sempre a necessidade de aprofundar as pesquisas, a fim de achar métodos ótimos para compensar os efeitos da variação de temperatura e/ou de outras variáveis ambientais.

Capítulo 6 CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de nós sensores inteligentes em sistemas de WSHM pode reduzir significativamente os custos de instalação, enquanto possibilita o diagnóstico em tempo real e aumenta a flexibilidade das arquiteturas de sistema. Nesta Tese é descrito o desenvolvimento e implementação de um sistema de WSHM baseado no princípio da EMI, propondo uma solução integral para detectar danos estruturais em tempo real, que inclui compensação devido ao efeito da variação de temperatura e pode ser gerenciado remotamente. Os métodos aplicados neste estudo foram testados usando um transdutor piezelétrico de PZT colado a uma placa de alumínio.

O NSI proposto, representa a unidade essencial de sensoriamento e diagnóstico de danos com capacidade de comunicação sem fio. A nova abordagem para detectar danos em estruturas, analisa as variações apresentadas na tensão *rms* de transdutores piezelétricos, após ser excitados por sinais elétricos senoidais gerados em uma dada faixa de frequência apropriada, inclusive sob efeito da variação de temperatura. O protótipo de NSI pode interrogar até 16 transdutores piezelétricos dentro de uma faixa de frequência de 5–250 kHz. Resultados experimentais mostram que as assinaturas de tensão *rms* têm as mesmas tendências observadas nas assinaturas de impedância elétrica. Está comprovado que essa abordagem é suficiente para detectar danos estruturais e, portanto, pode ser utilizada para implementar NSI mais simples e baratos, pois não necessita medir, de fato, a impedância elétrica, não depende da taxa de amostragem e não é necessário armazenar os dados do sinal de excitação. O tempo para interrogar uma estrutura utilizando uma varredura de 4096 pontos de frequência, incluído o armazenamento de dados em memória externa, é aproximadamente 45s e para transmitir todos esses dados até o servidor central, é aproximadamente 8s. Apesar de o NSI ser de baixo consumo, para conseguir sua autonomia completa é preciso contar com um sistema que garante o fornecimento de energia permanente e de longa duração.

A RSSF proposta, integra com sucesso as tecnologias padrão ZigBee e GSM/GPRS. ZigBee é de baixo consumo e apropriado para redes de médio alcance, porém utilizando as redes de telefonia celular, a tecnologia GSM/GPRS é possível, virtualmente, o gerenciamento remoto dos NSIs desde qualquer lugar do mundo com acesso à Internet. Para o monitoramento

remoto foi implementado um servidor HTTP, que incorpora um intérprete PHP e um gerenciador de banco de dados. O banco de dados é acessado mediante scripts elaborados em PHP e é usado para armazenar os comandos de controle dos NSIs e os dados correspondentes às assinaturas de tensão *rms*. Assim, este trabalho é mais uma prova que as RSSFs contribuem para que os sistemas de WSHM se tornem mais práticos e versáteis e, quando comparados com as redes com fio, apresenta as seguintes vantagens: baixo consumo, flexibilidade, facilidade de implantação, processamento local de dados, baixo custo e pequeno tamanho; mas como desvantagens apresenta menor taxa de transferência e maior probabilidade de apresentar interferências. O consumo de energia está diretamente relacionado com o alcance do dispositivo transceptor, ou seja, uma rede de maior alcance precisa de transceptores de maior potência e, portanto, o consumo de energia é maior. Nos testes em campo aberto (*outdoor*) realizados para as comunicações no âmbito da rede ZigBee, distâncias em torno de 40 m foram garantidas com sucesso, usando os transceptores internos dos módulos ZigBee.

O algoritmo proposto para compensar o efeito da temperatura foi incorporado em cada NSI. O efeito da temperatura ambiente foi analisado usando uma câmara climática para a faixa de 0–60ºC. O NSI compensa *online* o deslocamento da assinatura de tensão *rms* de transdutores piezelétricos devido ao efeito da temperatura. Os resultados experimentais confirmam que a análise das assinaturas de uma estrutura íntegra, exposta apenas a uma mudança de temperatura, pode resultar em uma falsa indicação de dano. Assim, após a compensação, pode-se estabelecer um limiar, a partir do qual, é possível afirmar que as mudanças na resposta dinâmica da estrutura são provocadas pela presença de dano na estrutura.

Foi desenvolvida uma aplicação com interface gráfica de fácil utilização, para gerenciar os NSIs e realizar a coleta de dados desde os âmbitos local e remoto. Testes de repetitividade nos registros das assinaturas mostram que, em ambos os casos, a transmissão de dados foi satisfatória, portanto, os algoritmos de sincronismo das máquinas de estado desenvolvidos, garantem segurança e confiabilidade na transferência de dados através da rede ZigBee.

Por outro lado, sendo que o método de detecção de danos analisa às mudanças presentes nas assinaturas de tensão *rms*, não é necessário analisar, por separado, as implicâncias da camada de adesivo (considerada aqui como parte da estrutura). No entanto, estudos indicam que as características da camada de adesivo, como a espessura, têm influência sobre a impedância elétrica.

Enfim, considerando que a maioria de parâmetros do transdutor piezelétrico e da estrutura são dependentes da temperatura, os sistemas de SHM baseados na EMI são difíceis de serem

modelados. Portanto, sempre haverá a necessidade de pesquisar novas técnicas eficientes para compensar os efeitos da temperatura e outras variáveis exógenas.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Uma grande quantidade de pesquisa deve ainda ser realizada e muitos sistemas de WSHM devem ser propostos antes que os sistemas de inspeção e controle, em tempo real e totalmente autônomos, possam ser adotados de forma confiável em estruturas de engenharia reais. A evolução da tecnologia nos diversos campos da engenharia continua a oferecer muitas e excitantes oportunidades para o desenvolvimento de novas técnicas e sistemas para o WSHM.

Como sugestões para trabalhos futuros, os seguintes tópicos podem ser explorados:

- Utilização de *energy harvesters*. Uma possível solução para o problema de geração de energia localizada é a utilização de tecnologias que permitem a captação de energia ambiente (térmica, vibração, acústica, solar ou outro) para acionar os NSIs. Nesse sentido, a captação de energia a partir de fontes de vibração mecânica é uma nova tecnologia e foco de muitos esforços de investigação em curso. Essas novas tecnologias podem ser utilizadas para aumentar o tempo de autonomia do NSI e a dependência de baterias pode ser reduzida. Além disso, se combinados as novas RSSFs podem ser incorporadas nas estruturas ou componentes estruturais para aprimorar na manutenção baseada em condição e nos sistemas de SHM avançados;
- Caracterização e modelamento de transdutores usando análise de elementos finitos. A caracterização e modelamento de materiais piezelétricos para entender suas características de resposta em função da variação de temperatura, pode ser uma linha de pesquisa promissora, a fim de propor novos e eficientes métodos de compensação;
- Desenvolvimento de nós de uma RSSF, NSI e nó de enlace, utilizando micro PC Raspberry Pi ou Beaglebone. Esses dispositivos apresentam características de um PC portátil com simples conectividade para redes sem fio;
- Desenvolvimento de nós de uma RSSF, NSI e nó de enlace, utilizando. FPGA – compacto – pequeno.
- Aplicação à detecção de outros tipos de eventos, tais como vazamentos em tubulações. Usar o NSI para estudar, caracterizar e/ou detectar vazamento em tubulações;

- Aplicação no desenvolvimento de um analisador de impedâncias no domínio do tempo. O NSI com alguns poucos componentes adicionais pode ser convertido em um analisador de impedâncias baseado apenas em medições de tensões *rms*.

Finalmente, todas as metodologias sugeridas neste estudo podem ser utilizadas para desenvolver um sistema de WSHM compacto e autônomo para detecção de danos em tempo real e em aplicações práticas.

Referências

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE- ANSI/IEEE. **IEEE standard on piezoelectricity**. New York: IEEE Standards Board, 1987. 66 p. (Std, 176).

ANNAMDAS, V. G. M.; RADHIKA, M. A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 24, n. 9, p. 1021-1042, 2013. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/24/9/1021.abstract>. Acesso em: 20 aug. 2013.

ANNAMDAS, V. G. M.; YANG, Y. Practical implementation of piezo-ceramic sensors in monitoring of excavation for transit station construction in Singapore. **Structural Control & Health Monitoring**, Chichester, v. 19, n. 2, p. 231–245, 2012. Disponível em: <http://www.academia.edu/3009992/Practical_implementation_of_Piezo-ceramic_sensors_in_monitoring_of_excavation_for_transit_station_construction_in_Singapore>. Acesso em: 20 aug. 2013.

ARAUJO, A.; GARCIA-PALACIOS, J.; BLESA, J.; TIRADO, F.; ROMERO, E.; SAMARTIN, A.; NIETO-TALADRIZ, O. Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 61, n. 3, p. 801–810, 2012. ISSN: 0018-9456. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6061956>. Acesso em: 20 aug. 2013.

ARMS, S. W.; GALBREATH, J. H.; TOWNSEND, C. P.; CHURCHILL, D. L.; CORNEAU, B.; KETCHAM, R. P.; PHAN, N. Energy harvesting wireless sensors and networked timing synchronization for aircraft structural health monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATION, VEHICULAR TECHNOLOGY, INFORMATION THEORY AND AEROSPACE & ELECTRONIC SYSTEMS TECHNOLOGY - WIRELESS VITAE, 1., 2009, Aalborg. **Proceedings...** Red Hook: IEEE, 2009. p. 16-20.

ARMS, S. W.; TOWNSEND, C. P.; GALBREATH, J. H.; DISTASI, S. J.; LIEBSCHUTZ, D.; PHAN, N. Flight testing of wireless sensing networks for rotorcraft structural health and usage management systems. In: AUSTRALIAN INTERNATIONAL AEROSPACE CONGRESS, 14., 2011, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: Royal Aeronautical Society, 2011. p. 1-14.

ATMEL. **At86rf230**. San Jose: Atmel Corporation, 2009. p. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/doc5131.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2012.

ATMEL. **Atmega640/1280/1281/2560/2561**. San Jose: Atmel Corporation, 2012. 40 p. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/doc2549.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2012.

ATMEL. **Zigbit™ 2.4 Ghz wireless modules**. San Jose: Atmel Corporation, 2013. 25 p. Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/1738045.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2012.

BANKS, H. T.; SMITH, R. C.; WANG, Y. **Smart material structures**: modeling, estimation and control. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. 304 p.

BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; DE ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring. **Sensors**, Basel, v. 14, n. 1, p. 1208-1227, 2014. ISSN: 1424-8220. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/14/1/1208/pdf>. Acesso em: 23 aug. 2014.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 58, n. 10, p. 3602-3608, 2009.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. Optimal frequency range selection for PZT transducers in impedance-based SHM systems. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 8, p. 1297-1303, 2010. ISSN: 1530-437X. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5471694>. Acesso em: 20 aug. 2013.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Influence of excitation signal on impedance-based structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 21, n. 14, p. 1409-1416, 2010. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/21/14/1409>. Acesso em: 15 jun. 2011.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 11, n. 2, p. 173–186, 2011. ISSN: 1475-9217. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/cgi/reprint/13/1/82>. Acesso em: 11 may 2013.

BASTANI, A.; AMINDAVAR, H.; SHAMSHIRSAZ, M.; SEPEHRY, N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 11, n. 3, p. 305–314, 2011. ISSN: 1475-9217. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/early/2011/12/14/1475921711427486>. Acesso em: 11 may 2013.

BERLINCOURT, D. A.; CURRAN, D. R.; JAFFE, H. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers. In: MASON, W. P. (Ed.). **Physical Acoustics: Principles and Methods**. New York: Academic Press, 1964. cap. 3, v.1-A, p. 169-270. ISBN 978-1-4832-2857-0.

BHALLA, S.; SOH, C. K. Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**, New York, v. 32, n. 12, p. 1897-1916, 2003. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.307/abstract>. Acesso em: 12 jan. 2011.

BHALLA, S.; SOH, C. K. High frequency piezoelectric signatures for diagnosis of seismic/blast induced structural damages. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 37, n. 1, p. 23-33, 2004a. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869503000963>. Acesso em: 12 jan. 2011.

BHALLA, S.; SOH, C. K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. I: modeling. **Journal of Aerospace Engineering**, New York, v. 17, n. 4, p. 154–165, 2004b. ISSN: 0893-1321. Disponível em:

<http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290893-1321%282004%2917%3A4%28154%29>. Acesso em: 23 out. 2013.

BHALLA, S.; SOH, C. K. Structural health monitoring by piezo-impedance transducers. II: applications. **Journal of Aerospace Engineering**, New York, v. 17, n. 4, p. 166–175, 2004c. ISSN: 0893-1321. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%290893-1321%282004%2917%3A4%28166%29>. Acesso em: 31 out. 2013.

BUETHE, I.; ECKSTEIN, B.; FRITZEN, C.-P. Model-based detection of sensor faults under changing temperature conditions. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 13, n. 2, p. 109–119, 2014. ISSN: 1475-9217. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/early/2013/12/13/1475921713510755.full.pdf+html>. Acesso em: 5 nov. 2014.

BUSCH-VISHNIAC, I. J. Piezoelectricity and pyroelectricity. In: LING, F. F. (Ed.). **Mechanical Engineering Series**. New York: Springer, 1999. cap. 5, p. 140-183. ISBN 978-1-4612-7142-0.

CADY, W. G. **Piezoelectricity**: an introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals. New York: McGraw-Hill, 1946. 806 p.

CAWLEY, P. The impedance method of non-destructive inspection. **NDT International**, Ann Arbor, v. 17, n. 2, p. 59-65, 1984. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0308912684900452/pdf?md5=b0e11e500e6097c593cd465addd67834&pid=1-s2.0-0308912684900452-main.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2012.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS 1995; SMART STRUCTURES AND INTEGRATED SYSTEMS, 1995, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 1995. v. 2443.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C. Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. In: AIAA/ ASME/ASCE/AHS/ASC SDM CONFERENCE, 36., 1995, New Orleans. **Proceedings...** New Orleans: SDM, 1995. v. 4, p. 2243–2248.

CHEN HONGYAN; ZHU LONGBIAO; HUANG XI; ZHANG YIHUI. Structural health monitoring system of gantry crane based on ZigBee technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL MANUFACTURING AND AUTOMATION - ICDMA, 3., 2012, GuiLin. **Proceedings...** Red Hook: IEEE, 2012. p. 801-804.

CORTEZ, N. E. **Desenvolvimento e implementação de um sistema para detecção de falhas em estruturas usando microcontrolador**. 2012. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. A new microcontrolled structural health monitoring system based on the electromechanical impedance principle. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 12, n. 1, p. 14-22, 2013. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/12/1/14>. Acesso em: 4 nov. 2013.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. Design and implementation of wireless sensor networks for impedance-based structural health monitoring using ZigBee and Global System for Mobile Communications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 26, n.10, p. 1207–1218, 2014. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/26/10/1207>. Acesso em: 10 jun. 2014.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. Smart wireless sensor node for impedance-based SHM Applications with multi-sensor capability and automatic compensation for temperature effects. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 10., 2015, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2015. p. 748–755.

DRAGOMIRESCU, D.; PERGET, F.; CAMPS, F.; PLANA, R.; DE LUCA, A.; UDREA, F. Energy efficient wireless sensor network architecture for aircraft structure health monitoring: from sensor to data collect. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 9., 2013, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2013. p. 1403–1410.

EIRAS, J. A. Materiais piezoelétricos. In: Programa de Redes Cooperativas de Engenharia (RECOPE). **Sensores:** Teoria e Aplicações. São Paulo: AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2004. cap. 2, 34 p.

FARAHANI, S. **Zigbee wireless networks and transceivers**. Burlington: Elsevier, 2008. 348 p.

FARRAR, C. R.; PARK, G.; FARINHOLT, K. M. Sensor network paradigms. In: BOLLER, C.; CHANG, F. K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 71, p. 1-17.

FARRAR, C. R.; PARK, G.; TODD, M. D. Sensing network paradigms for structural health monitoring. In: MUKHOPADHYAY, S. C. (Ed.). **New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring**. Berlin: Springer, 2011. p. 137-157. ISBN 978-3-642-21098-3.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. **Structural health monitoring:** a machine learning perspective. Chichester: John Wiley & Sons, 2013. 654 p. ISBN 978-1119994336.

FINZI NETO, R. M.; STEFFEN, V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A low-cost electromechanical impedance-based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 10, n. 4, p. 391-402, 2011. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/10/4/391>. Acesso em: 10 ago. 2011.

FRANCO, S. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 658 p.

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, London, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0022-3735/22/10/001>. Acesso em: 11 dez. 2010.

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Recent advancements in the electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 5., 1998, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 1998. v. 3329, p. 536-547.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Characterization of piezoelectric wafer active sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 11, n. 12, p. 959-976, 2000. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/11/12/959>. Acesso em: 18 jan. 2011.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v. 124, n. 1, p. 116-125, 2002. Disponível em: <www.me.sc.edu/Research/lamss/pdf/JOURNALS/27_JVA_V124_N1_2002.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2011.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J. J. Piezoelectric wafer embedded active sensor for aging aircraft structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 1, n. 1, p. 41–62, 2002. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/1/1/41>. Acesso em: 19 jan. 2011.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J. J.; REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K. Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**, Birmingham, v. 6, n. 1, p. 3-21, 2003.

HARMS, T.; BANKS, B.; SARVESTANI, S. S.; BASTIANINI, F. Design and testing of a low-power wireless sensor network for structural health monitoring of bridges. In: SENSORS AND SMART TRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS - SPIE, 2009, San Diego. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2009. v. 7292, 72920U-8.

HARMS, T.; SHAH, P. V.; SEDIGH, S.; BOURQUE, Z.; BASTIANINI, F. Zigbee-enabled structural health monitoring with the smart brick network. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 7., 2009, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2009. p. 909–916.

HEINEN, M. The A380 program. In: GLOBAL INVESTOR FORUM. **Slides**. Hamburg. **Slides…** Munich: EADS, 19-20 oct. 2006. p. 1-18. Disponível em: < www.airbus-group.com/dms/airbusgroup/int/en/investor-relations/documents/2006/untitled/Global-Investor-Forum-2006/gif2006_a380_sperl_heinen.pdf >. Acesso em: 2 jul. 2015.

HOOKER, M. W. **Properties of PZT-based piezoelectric ceramics between -150 and 250ºC**. Hampton: National Aeronautics and Space Administration, 1998. Disponível em: <NASA/CR-1998-208708>. Acesso em: 20 aug. 2013. Report.

INMAN, D. J.; FARRAR, C. R.; LOPES JR., V.; STEFFEN JR., V. **Damage prognosis**: for aerospace, civil and mechanical systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2005. 470 p.

JAFFE, B.; ROTH, R. S.; MARZULLO, S. Piezoelectric properties of lead zirconate lead titanate solid solution ceramics. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 25, n. 6, p. 809-810, 1954. ISSN: 0021-8979. Disponível em: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/25/6/10.1063/1.1721741>. Acesso em: 20 aug. 2013.

KALIAPPAN, J.; SIVAKUMAR, S. M. Piezoceramic materials: phenomena and modeling. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 40, p. 1-15.

KESSLER, S. S.; SPEARING, S. M.; ATALA, M. J.; CESNIK, C. E. S.; SOUTIS, C. Damage detection in composite materials using frequency response methods. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 87-95, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836801000506>. Acesso em: 16 jul. 2013.

KIM, J.; GRISSO, B. L.; HA, D. S.; INMAN, D. J. A system-on-board approach for impedance-based structural health monitoring. In: SENSORS AND SMART STRUCTURES TECHNOLOGIES FOR CIVIL, MECHANICAL, AND AEROSPACE SYSTEMS, 2007, San Diego. **Proceedings...** San Diego: SPIE, 2007. v. 6529, p. 65290O.

KONCHUBA, N. J. **Temperature compensation improvements for impedance based structural health monitoring**. 2011. 51 f. Dissertation (Master of Science in Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, 2011.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B. Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 20, n. 4, p. 367-377, 2009. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/20/4/367.short>. Acesso em: 2 dec. 2013.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A. Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS 1996: SMART STRUCTURES AND INTEGRATED SYSTEMS - SPIE, 1996, San Diego. **Proceedings...** Bellingham: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1996. v. 2717, p. 302-310.

KRISHNAMURTHY, V.; SAZONOV, E. Reservation-based protocol for monitoring applications using IEEE 802.15.4 sensor networks. **International Journal Of Sensor Networks**, Geneva, v. 4, n. 3, p. 155–171, 2008. Disponível em: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=22109>. Acesso em: 23 apr. 2013.

KURATA, M.; KIM, J.; LYNCH, J.; VAN DER LINDEN, G.; SEDARAT, H.; THOMETZ, E.; HIPLEY, P.; SHENG, L. Internet-enabled wireless structural monitoring systems: development and permanent deployment at the new carquinez suspension bridge. **Journal of Structural Engineering**, New York, v. 139, n. 10, p. 1688-1702, 2013. ISSN: 1943-541X. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0000609>. Acesso em: 19 apr. 2014.

LEE, H.-J.; SARAVANOS, D. A. **The effect of temperature dependent material nonlinearities on the response of piezoelectric composite plates**. Cleveland: National Aeronautics and Space Administration, 1997. (NASA/TM--97-206216). Disponível em: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19980017194.pdf>. Acesso em: 20 aug. 2013. Report.

LEE , J.-S.; SU, Y.-W.; SHEN, C. C. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY - IECON, 33., 2007, Taipei. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2007. p. 46-51, 9848735.

LI, F.; XU, Z.; WEI, X.; YAO, X. Temperature- and dc bias field- dependent piezoelectric effect of soft and hard lead zirconate titanate ceramics. **Journal of Electroceramics**, Boston, v. 24, n. 4, p. 294–299, 2010. ISSN: 1385-3449. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10832-009-9571-1>. Acesso em: 30 oct. 2014.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems — determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 5, n. 1, p. 12-20, 1994. ISSN: 1045-389X. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/5/1/12.full.pdf+html>. Acesso em: 20 aug. 2013.

LIN, B.; GIURGIUTIU, V. Modeling and testing of PZT and PVDF piezoelectric wafer active sensors. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 15, n. 4, p. 1085-1093, 2006.

LOSADA, M.; IRIZAR, A.; DEL CAMPO, P.; RUIZ, P.; LEVENTIS, A. Design principles and challenges for an autonomous WSN for structural health monitoring in aircrafts. In: CONFERENCE ON DESIGN OF CIRCUITS AND INTEGRATED CIRCUITS - DCIS, 2014, Madrid. **Proceedings...** Red Hook: IEEE, 2014, p. 1-6.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M.; RUIZ, L. B.; DE FREITAS MINI, R. A.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Redes de sensores sem fio. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORAS, 21., 2003, Natal. **Anais...** Natal: SBRC 2003. p. 179 - 226.

LYNCH, J. P.; LOH, K. J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. **The Shock and Vibration Digest**, Washington, v. 38, n. 2, p. 91–128, 2006. ISSN: 0583-1024. Disponível em: <http://www-personal.umich.edu/~jerlynch/papers/SVDReview.pdf>. Acesso em: 28 sep. 2013.

MARQUI, C. R.; BUENO, D. D.; BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; SANTOS, R. B.; LOPES JUNIOR, V. External disturbance effect in damage detection using electrical impedance. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 26., 2008, Orlando. **Proceedings...** Orlando: SEM, 2008. (Artigo, 286).

MARTINS, L. G. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V.; PALOMINO, L. V.; RADE, D. A. Architecture of a remote impedance-based structural health monitoring system for aircraft applications. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 34, n. special, p. 393-400, 2012. ISSN: 1678-5878. Special. Disponível em: < http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v34nspe/a08v34nspe.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2015.

MESHNETICS. **SerialNet™ reference manual:** AT-command set. Phoenix: MeshNetics, 2008. 71 p. Disponível em: <http://www2.ee.ic.ac.uk/t.clarke/projects/Resources/BitCloud/P-EZN-452~01-%28SerialNet%20AT-Command%20Set%20Reference%20Manual%29.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2012.

NANDA, K.; NAYAK, K.; CHIPPALKATTI, S.; RAO, R.; SELVAKUMAR, D.; PASUPULETI, H. Web based monitoring and control of WSN using WINGZ (wireless IP network gateway for ZigBee). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSING TECHNOLOGY - ICST, 6., 2012, Kolkata. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2012. p. 666-671.

NOKES, J. P.; CLOUD, G. L. The application of interferometric techniques to the nondestructive inspection of fiber-reinforced materials. **Experimental Mechanics**, Heidelberg, v. 33, n. 4, p. 314-319, 1993.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of civil structural components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**, New York, v. 6, n. 4, p. 153–160, 2000a. Disponível em: <http://ascelibrary.org/iso/resource/1/jitse4/v6/i4/p153_s1>. Acesso em: 20 jan. 2011.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 11, n. 6, p. 448–455, 2000b. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/11/6/448>. Acesso em: 20 jan. 2011.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**, New York, v. 30, n. 10, p. 1463–1474, 2001. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.72/pdf>. Acesso em: 20 jan. 2011.

PARK, G.; FARRAR, C. R. Piezoelectric impedance methods for damage detection and sensor validation. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 18, p. 1-14.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME International Journal, Series A**, Tokio, v. 42, n. 2, p. 249–258, 1999. ISSN: 1344-7912. Disponível em: <http://astp.jst.go.jp/modules/search/DocumentDetail/1344-7912_42_2_Impedance-Based%2BStructural%2BHealth%2BMonitoring%2Bfor%2BTemperature%2BVarying%2BApplications._N%252FA>. Acesso em: 2 dec. 2013.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of piezoelectric impedancebased health monitoring and path forward. **The Shock and Vibration Digest**, Thousands Oaks, v. 35, n. 6, p. 451-463, 2003.

PARK, S.; AHMAD, S.; YUN, C. B.; ROH, Y. Multiple crack detection of concrete structures using impedance based structural health monitoring techniques. **Experimental Mechanics**, Brookfield, v. 46, n. 5, p. 609–618, 2006. Disponível em: <www.springerlink.com/content/t5681058186m2118/fulltext.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2011.

PARK, S.; GRISSO, B. L.; INMAN, D. J.; YUN, C. B. MFC-based structural health monitoring using a miniaturized impedance measuring chip for corrosion detection. **Research in Nondestructive Evaluation**, New York, v. 18, n. 2, p. 139–150, 2007. Disponível em: <www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09349840701279937>. Acesso em: 3 fev. 2011.

PARK, S.; LEE, J.; YUN, C.; INMAN, D. J. Electro-mechanical impedance-based wireless structural health monitoring using PCA-data compression and k-means clustering algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 19, n. 4, p. 509-520, 2008.

PARK, S.; YUN, C. B.; ROH, Y.; LEE, J. J. Health monitoring of steel structures using impedance of thickness modes at PZT patches. **Smart Structures and Systems**, Daejeon, v. 1, n. 4, p. 339–353, 2005. Disponível em: <http://koasas.kaist.ac.kr/bitstream/10203/12039/1/Health%20monitoring%20of%20steel%20

structures%20using%20impedance%20of%20thickness%20modes%20at%20PZT%20patches.pdf>. Acesso em: 5 fev. 2011.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J. Low cost impedance monitoring using smart materials. In: EUROPEAN WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 1., 2002, Paris. **Proceedings...** Paris: Ecole Normale Superieure, 2002. p. 442-449.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 15, n. 2, p. 129-139, 2004.

PECKENS, C. A.; KANE, M. B.; ZHANG, Y.; LYNCH, J. P. Permanent installation of wireless structural monitoring systems in infrastructure systems. In: WANG, M. L.; LYNCH, J. P.; SOHN, H. (Ed.). **Sensor technologies for civil infrastructures:** sensing hardware and data collection methods for performance assessment. Waltham: Woodhead Publishing, 2014. v.1, p. 480-509.

PENTARIS, F. P.; STONHAM, J.; MAKRIS, J. P. A review of the state-of–the-art of wireless SHM systems and an experimental set-up towards an improved design. In: IEEE EUROCON, 2013, Zagreb. **Proceedings...** Red Hook: IEEE, 2013. p. 275-282, 13827737.

PIEZO SYSTEMS. **Piezoceramic application data**. Woburn: Piezo Systems, 2011. 64 p. Disponível em: <http://www.piezo.com/catalog8.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2014.

PIROTI, R. P.; ZUCCOLOTTO, M. Transmissão de dados através de telefonia celular: arquiteura das redes gsm e gprs. **Liberato**, Novo Hamburgo, v. 9, n. 12, p. 81 - 89, 2009.

RADIL, T.; RAMOS, P. M.; SERRA, A. C. Impedance measurement with sine-fitting algorithms implemented in a DSP portable device. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 57, n. 1, p. 197-204, 2008.

RISTIC, V. M. **Principles of acoustic devices**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 359 p.

RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M.; LOUREIRO, A. A. F. MANNA: a management architecture for wireless sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, New York, v. 41, n. 2, p. 116-125, 2003.

RYTTER, A. **Vibration based inspection of civil engineering structures**. 20 abr. 1993. 206 f. Thesis (Philosophical Doctor) - Instituttet for Bygningsteknik, University of Aalborg, Aalborg, 1993.

SABAT, R. G.; RENB, W.; YANG, G.; MUKHERJEE, B. K. Temperature dependence of the dielectric, elastic and piezoelectric material constants of lead zirconate titanate (PZT) ceramics. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS: ACTIVE MATERIALS: BEHAVIOR AND MECHANICS - SPIE, 2006, San Diego. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2006. v. 6170, p. 1-8, 61700A.

SANS INSTITUTE. **The gsm standard (an overview of its security)**. Bethesda: SANS Institute, 2001. 10 p.

SAZONOV, E.; KRISHNAMURTHY, V.; SCHILLING, R. Wireless intelligent sensor and actuator network - a scalable platform for time-synchronous applications of structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 9, n. 5, p. 465-476, 2010.

ISSN: 1475-9217. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/9/5/465.full.pdf+html>. Acesso em: 15 aug. 2013.

SHERRIT, S.; YANG, G.; WIEDERICK, H. D.; MUKHERJEE, B. K. Temperature dependence of the dielectric, elastic and piezoelectric material constants of lead zirconate titanate ceramics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART MATERIALS, STRUCTURES AND SYSTEMS, 9., 1999, Bangalore. **Proceedings...** New Delhi: Allied Publishers, 1999. p. 121-126.

SHIRANE, G.; SUZUKI, K.; TAKEDA, A. Phase transitions in solid solutions of PbZrO3 and PbTiO3 (II) X-ray study. **Journal of the Physical Society of Japan**, Tokyo, v. 7, n. 1, p. 12-18, 1952. Disponível em: <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.7.12>. Acesso em: 26 apr. 2013.

SHIRANE, G.; TAKEDA, A. Phase transitions in solid solutions of PbZrO3 and PbTiO3 (I) small concentrations of PbTiO3. **Journal of the Physical Society of Japan**, Tokyo, v. 7, n. 1, p. 5-11, 1952. Disponível em: <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.7.5>. Acesso em: 26 apr. 2013.

SOH, C. K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge. **Smart Materials and Structures**, New York, v. 9, n. 4, p. 533-542, 2000. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0964-1726/9/4/317>. Acesso em: 16 dez. 2010.

SOHN, H.; FARRAR, C. R.; HEMEZ, F. M.; SHUNK, D. D.; STINEMATES, D. W.; NADLER, B. R.; CZARNECKI, J. J. **A review of structural health monitoring literature**: 1996-2001. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory Report, 2004. (LA-13976-MS). Disponível em: <http://institute.lanl.gov/>. Acesso em: 13 jun. 2011. Report.

STASZEWSKI, W. J.; WORDEN, K. Signal processing for damage detection. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 21, p. 1-7.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Truss structure integrity identification using PZT sensor actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 6, n. 1, p. 134-139, 1995.

TANNER, N. A.; WAIT, J. R.; FARRAR, C. R.; SOHN, H. Structural health monitoring using modular wireless sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 14, n. 1, p. 43-56, 2003. ISSN: 1045-389X. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/14/1/43.full.pdf+html>. Acesso em: 20 sep. 2013.

TAYLOR, S. G.; FARINHOLT, K. M.; PARK, G.; TODD, M. D.; FARRAR, C. R. Multi-scale wireless sensor node for health monitoring of civil infrastructure and mechanical systems. **Smart Structures and Systems**, Daejeon, v. 6, n. 5-6, p. 661–673, 2010. ISSN: 1738-1584. Disponível em: <http://technopress.kaist.ac.kr/download.php?journal=sss&volume=6&num=5&ordernum=13>. Acesso em: 6 apr. 2013.

TELIT. **Gm862 family hardware user guide rev.2**. Sgonico: Telit Communications, 2011. 74 p. Disponível em: <http://www.telit.com/module/infopool/download.php?id=537>. Acesso em: 3 dec. 2012.

TELIT. **AT commands reference guide rev. 15**. Sgonico: Telit Communications, 2012. 588 p. Disponível em: <http://www.lte.com.tr/uploads/pdfe/1.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2013.

TENNINA, S.; KOUBÂA, A.; DAIDONE, R.; ALVES, M.; JURCÍK, P.; SEVERINO, R.; TILOCA, M.; HAUER, J.-H.; PEREIRA, N.; DINI, G.; BOUROCHE, M.; TOVAR, E. **IEEE 802.15.4 and ZigBee as enabling technologies for low-power wireless systems with quality-of-service constraints**: springerbriefs in electrical and computer engineering. New York: Springer, 2013. p. ISBN 978-3-642-37367-1.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. A taxonomy of wireless micro-sensor network models. **ACM Mobile Computing and Communications Review**, New York, v. 6, n. 2 , p. 28-36, 2002. Disponível em: <http://www.cs.binghamton.edu/~nael/research/papers/taxonomy.pdf>. Acesso em: 20 Dec. 2012.

TORFS, T.; STERKEN, T.; BREBELS, S.; SANTANA, J.; VAN DEN HOVEN, R.; SPIERING, V.; BERTSCH, N.; TRAPANI, D.; ZONTA, D. Low power wireless sensor network for building monitoring. **IEEE Sensors Journal**, New York, v. 13, n. 3, p. 909-915, 2013. ISSN: 1530-437X. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6301674>. Acesso em: 24 aug. 2013.

TRIPATHI, N. D.; REED, J. H. **Cellular communications:** a comprehensive and practical guide. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014. 1032 p. ISBN 978-0-470-47207-1.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; FARMER, J.; INMAN, D. J. Time-domain electromechanical impedance for structural health monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL DYNAMICS, 8., 2011, Leuven. **Proceedings...** Leuven: Eurodyn, 2011. p. 2043-2046.

VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v. 25, n. 5, p. 1550-1558, 2011. Disponível em: <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327010004279>. Acesso em: 4 jun. 2011.

WANG, P.; YAN, Y.; TIAN, G. Y.; BOUZID, O.; DING, Z. Investigation of wireless sensor networks for structural health monitoring. **Journal of Sensors**, New York, v. 2012, p. 1 - 7, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2012/156329>. Acesso em: 15 apr. 2014.

WANG, S.; YOU, C. A circuit design for impedance-based structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 19, n. 9, p. 1029-1040, 2008.

WANG, Y.; QIU, L.; GAO, L.; YUAN, S.; QING, X. A new temperature compensation method for guided wave-based structural health monitoring. In: SPIE - HEALTH MONITORING OF STRUCTURAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS, 2013, San Diego. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2013. v. 8695, p. 1-10, 86950H.

WILSON, W. C.; ATKINSON, G. M. Passive Wireless Sensor Applications for NASA's Extreme Aeronautical Environments. **IEEE Sensors Journal**, New York, v. 14, n. 11, p. 3745-3753, 2014. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6813588>. Acesso em: 2 jul. 2015.

XU, B.; GIURGIUTIU, V. A low-cost and field portable electromechanical (E/M) impedance analyzer for active structural health monitoring. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 5., 2005, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2005. p. 634-644.

YEDAVALLI, R. K.; BELAPURKAR, R. K. Application of wireless sensor networks to aircraft control and health management systems. **Journal of Control Theory and Applications**, Guangzhou, v. 9, n. 1, p. 28-33, 2011. Disponível em: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11768-011-0242-9.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2015.

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electromechanical impedance modeling. In: BOLLER, C.; CHANG, F.-K.; FUJINO, Y. (Ed.). **Encyclopedia of structural health monitoring**. Chichester: John Wiley & Sons, 2009. cap. 5, p. 1-19.

ZHANG, Q. M.; ZHAO, J. Electromechanical properties of lead zirconate titanate piezoceramics under the influence of mechanical stresses. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, New York, v. 46, n. 6, p. 1518-1526, 1999.

ZHOU, G.-D.; YI, T.-H. Recent developments on wireless sensor networks technology for bridge health monitoring. **Mathematical Problems in Engineering**, New York, v. 2013, p. 1-33, 2013. Disponível em: <http://downloads.hindawi.com/journals/mpe/2013/947867.pdf>. Acesso em: 6 apr. 2014.

ZIGBEE ALLIANCE. **Zigbee specification**. San Ramon: ZigBee Alliance, 2008. 604 p. (053474r17).

ZIGBEE ALLIANCE. **Zigbee specification**. San Ramon: ZigBee Alliance, 2012. 622 p. (053474r20). Disponível em: < http://www.zigbee.org/download/standards-zigbee-specification/ >. Acesso em: 2 dec. 2012.

Apêndice A

Artigos publicados relacionados com esta pesquisa

CORTEZ, N. E. et al. Impedance-based structural health monitoring system using wireless sensor networks. In: 9th INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 9., 2013, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2013. p. 1605-1612. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=GRxIAQAAQBAJ&pg=PA1605>. Acesso em: 15 jun. 2015.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. Design and implementation of wireless sensor networks for impedance-based structural health monitoring using ZigBee and Global System for Mobile Communications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v. 26, n.10, p. 1207–1218, 2014. Disponível em: <http://jim.sagepub.com/content/26/10/1207>. Acesso em: 10 jun. 2014.

CORTEZ, N. E.; BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. Red inalámbrica de sensores inteligentes para monitorear salud estructural que incorpora compensación por efecto de la temperatura. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICACIONES TELCON-UNI 2014, 3., 2014, Lima. **Proceedings...** Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, p. 1-8, 2014. Disponível em: <http://cct-uni.pe/telcon/2014/files/papers/T-18.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2015.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. Smart wireless sensor node for impedance-based SHM applications with multi-sensor capability and automatic compensation for temperature effects. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING - IWSHM, 10., 2015, Stanford. **Proceedings...** Lancaster: DEStech Publications, 2015. p. 748–755.

Publicação vinculada ao Mestrado

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. Um novo método para monitoramento de integridade estrutural usando microcontrolador. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19., 2012, Campina Grande. **Proceedings...** Campina Grande: UFPR. ISBN: 978-85-8001-069-5. Disponível em: <www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2012/Artigos/98417.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2013.

CORTEZ, N. E.; VIEIRA FILHO, J.; BAPTISTA, F. G. A new microcontrolled structural health monitoring system based on the electromechanical impedance principle. **Structural Health Monitoring**, Thousand Oaks, v. 12, n. 1, p. 14-22, 2013. Disponível em: <http://shm.sagepub.com/content/12/1/14 >. Acesso em: 4 nov. 2013.