

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá

2012

FERNANDO JULIANI

**GERENCIAMENTO DO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO SECUNDÁRIA
DE ACELERÔMETROS POR MEIO DE UMA
APLICAÇÃO DE BANCO DE DADOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Co-orientador: Prof. Dr. Everaldo de Barros

Guaratinguetá

2012

J943g Juliani, Fernando
Gerenciamento do processo de calibração secundária de
acelerômetros por meio de uma aplicação de banco de dados / Fernando
Juliani – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
107 f : il.
Bibliografia: f. 84-88

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Co-orientador: Prof. Dr. Everaldo de Barros

1. Acelerômetros 2. Calibração 3. Banco de dados I. Título


CDU 534.1(043)

FERNANDO JULIANI

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS D'ANDRADE SOUTO
DCTA/IAE/ITA

DADOS CURRICULARES

FERNANDO JULIANI

NASCIMENTO	29.08.1979 – TABOÃO DA SERRA / SP
FILIAÇÃO	Ulisses Juliani Sebastiana Grava Juliani
1998/2002	Curso de Graduação Bacharelado em Computação na Universidade de Taubaté.
2006/2007	Curso de Pós-Graduação em Melhoria de Processo de Software, nível de Especialização, na Universidade Federal de Lavras.
2011/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho aos meus pais Ulisses e Sebastiana, construtores de uma família harmoniosa, cujos ensinamentos me permitem sonhar e realizar; à minha esposa Iara, fonte inesgotável de incentivo e paciência; ao meu irmão Valdemir, por ser exemplo de perseverança e alegria, mesmo em momentos difíceis; ao meu irmão Valdecir, pelo companheirismo de sempre.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por dar-me tranqüilidade e persistência, determinantes para o alcance deste objetivo,

ao meu co-orientador Everaldo, por ser o principal incentivador deste trabalho e estar sempre presente nos momentos de maior dificuldade no desenvolvimento desta obra,

ao meu orientador Mauro Hugo, que mesmo muito ocupado sempre esteve atento às minhas dúvidas, solucionando-as prontamente,

às secretárias da Pós Graduação, pela presteza e atenção apresentadas em todos os momentos,

ao amigo Henio, pela disposição em ajudar e por receber-me em sua casa sempre que preciso,

aos colegas da Divisão de Integração e Ensaios: Fábio, André,IVALDO, Ailson, Roberto, Adriana, todos sempre dispostos a colaborar,

aos membros e suplentes da Banca Examinadora, pelas sugestões que visaram a melhoria deste trabalho,

aos meus pais, por proporcionarem as melhores condições para minha formação, culminando na conclusão deste trabalho e incentivando a busca pelos próximos,

à minha esposa Iara, por estar ao meu lado sempre,

à todas as pessoas aqui não citadas que contribuíram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos.”

Albert Einstein

JULIANI, F. **Gerenciamento do processo de calibração secundária de acelerômetros por meio de uma aplicação de banco de dados.** 2012. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A vibração é um dos fenômenos que deve ser controlado quando atinente à componentes aeroespaciais. Sua ocorrência, em geral, não é benéfica para a vida útil de um sistema mecânico desse tipo e, por isso, este deve ser submetido a inúmeros testes de vibração para que informações sobre seu comportamento em operação sejam conhecidas. Sendo o acelerômetro o principal componente do sistema de medição empregado nos testes de vibração em sistemas mecânicos, é fundamental que sua calibração seja realizada periodicamente de forma a garantir suas condições operacionais. O processo de calibração secundária de acelerômetros especificamente envolve informações determinantes para a obtenção de resultados confiáveis e análise correta do comportamento de uma estrutura submetida a um ambiente vibratório. O valor de sensibilidade para uma frequência fixa de calibração é um exemplo de informação relevante que deve ser gerenciada. O Laboratório Central de Calibração de Acelerômetros do Comando da Aeronáutica é responsável pelo controle de um elevado número desses transdutores e, portanto, deve gerenciar dados de sua calibração e utilização. No entanto, deficiências foram detectadas no modo de controle vigente. Esta pesquisa propõe uma sistemática auxiliada por sistema proprietário de banco de dados para o gerenciamento laboratorial de dados de calibração de acelerômetros utilizados em testes e monitoramentos de vibração mecânica atendendo a itens da norma NBR ISO/IEC 17025 (2005).

PALAVRAS-CHAVE: Acelerômetro. Calibração secundária. Teste de vibração. Aplicação. Banco de dados.

JULIANI, F. **Accelerometers secondary calibration process management through a database application.** 2012. 107f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

Vibration is one of the phenomena that must be controlled regarding aerospace components. In general, its occurrence is not beneficial to the life cycle of such a mechanical system, and therefore it must be subjected to numerous vibration tests so that information about its behavior in operation is known. Since the accelerometer is the main component of the measuring system employed in mechanical vibration tests, it is essential that its calibration is performed periodically to ensure its operational conditions. The accelerometer secondary calibration process specifically involves critical information to obtain reliable results and correct analysis of the behavior of a structure subjected to a vibration environment. The sensitivity value for a fixed frequency calibration is an example of relevant information that must be managed. The Brazilian Air Force Command Central Laboratory of Accelerometer Calibration is responsible for managing a large number of transducers and therefore must manage data from their calibration and use. However, deficiencies were detected in the current control system. This research proposes a systematic approach aided by a proprietary database to manage the laboratory calibration data of accelerometers used in testing and monitoring of mechanical vibration according to NBR ISO/IEC 17025 (2005) items.

KEYWORDS: Accelerometer. Secondary calibration. Vibration test. Application. Database.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um sistema massa-mola-amortecedor (MAIA; SILVA, 1997)	21
Figura 2 – Categorias de transdutores: (a) ativos; (b) passivos (BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986)	24
Figura 3 – Nomograma com limites de vibração senoidal (INMAN, 2008).	25
Figura 4 – Constituição de um transdutor e seu modelo massa-mola (EWINS, 1984).....	25
Figura 5 – Diversos tipos de acelerômetros Brüel&Kjær.....	26
Figura 6 – Curva de resposta de um acelerômetro piezoelétrico. A frequência de ressonância é denotada por f_n . A faixa utilizável depende do desvio aceitável do valor médio da resposta sobre a parte plana da curva de resposta (HARRIS; PIERSOL, 2002).....	27
Figura 7 – Configurações de acelerômetros da Brüel&Kjær: (a) compressão; (b) cisalhamento	29
Figura 8 – Teste de vibração do VSB-30: (a) vista geral; (b) detalhe dos acelerômetros fixados na estrutura	31
Figura 9 – Teste de separação de estágios do VLS: (a) vista geral ilustrando quatro momentos do teste; (b) detalhe de um acelerômetro fixado na estrutura.....	33
Figura 10 – Análise modal experimental realizada no VANT: (a) vista geral; (b) detalhe dos acelerômetros fixados sobre a asa do veículo	34
Figura 11 – Distribuição dos tipos de sinais dinâmicos (MAIA; SILVA, 1997)	36
Figura 12 – Sinal senoidal.	36
Figura 13 – Sinal por varredura senoidal	37
Figura 14 – Espectro de uma varredura senoidal	38
Figura 15 – Relação entre os quantificadores de amplitude (HARRIS; PIERSOL, 2002, p.12.10).....	39
Figura 16 – Configuração da calibração pelo método de comparação ou “back to back”	41
Figura 17 – Diagrama esquemático da calibração por comparação.	42
Figura 18 – Curva de resposta da calibração secundária de um acelerômetro piezoelétrico. ..	43
Figura 19 – Institutos subordinados ao DCTA.....	45
Figura 20 – Veículos desenvolvidos pelo IAE: (a) VSB-30; (b) VLS-1.....	46
Figura 21 – Cadeia de rastreabilidade metrológica do SISMETRA (NSCA 9-1, 2012).....	48

Figura 22 – Componentes do sistema de calibração secundária de acelerômetros	49
Figura 23 – Inexistência de conexão entre as atividades de calibração e teste	51
Figura 24 – Fluxo de processos com destaque para a implantação da sistemática proposta.....	52
Figura 25 – Arquitetura cliente-servidor do sistema gerenciador de dados de acelerômetros	54
Figura 26 – Classificação dos tipos de pesquisa (adaptado de JUNG, 2011), com destaque àqueles aplicáveis a esta pesquisa.....	55
Figura 27 – Ciclo de vida de software (adaptado de SOMMERVILLE, 2007)	57
Figura 28 – Diagrama de casos de uso de gerenciamento de acelerômetros.....	60
Figura 29 – Diagrama de atividades do módulo de inserção de acelerômetros	61
Figura 30 – Campos e registros da tabela Acelerômetros	62
Figura 31 – Esquema do banco de dados do sistema com as principais tabelas e relacionamentos	63
Figura 32 – Ambiente integrado de desenvolvimento do Delphi 7.....	65
Figura 33 – Interface de administração do SGBD SQL Server.....	66
Figura 34 – Ilustração do fluxo de processos do gerenciamento de dados de acelerômetros	68
Figura 35 – Configuração de controle de acesso aos registros e tabelas do SGBD.	69
Figura 36 – Módulo da aplicação para o controle de dados de acelerômetros.....	71
Figura 37 – Módulo da aplicação para a pesquisa por dados de acelerômetros.....	72
Figura 38 – Módulo do sistema para gerenciamento de acelerômetros utilizados em teste.....	73
Figura 39 – Módulo da aplicação que permite a seleção de acelerômetros a serem utilizados em testes.....	74
Figura 40 – Rastreabilidade de medição: (a) curvas de resposta das calibrações secundárias realizadas em um acelerômetro piezoelétrico; (b) variação de sensibilidade entre as calibrações	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes do sistema de calibração secundária de acelerômetros.....	50
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Active Directory
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CLBI	Centro de Lançamento da Barreira do Inferno
COMAER	Comando da Aeronáutica
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
GIA-SJ	Grupamento de Infraestrutura e Apoio de São José dos Campos
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IDE	Integrated Development Environment
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IEPE	Integrated Electronics Piezo Electric
IFI	Instituto de Fomento e Coordenação Industrial
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LCC	Laboratório Central de Calibração
LDAP	Lightweight Directory Access Protocol
LRC	Laboratório Regional de Calibração
LSC	Laboratório Setorial de Calibração
NBR	Norma Brasileira Registrada
NSCA	Norma de Sistema do Comando da Aeronáutica
RAD	Rapid Application Development
RCD	Rede de Comunicação de Dados
SGBD	Sistema Gerenciador de Banco de Dados
SI	Sistema Internacional de Unidades
SISMETRA	Sistema de Metrologia Aeroespacial
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VLS	Veículo Lançador de Satélites
TMS	The Modal Shop
UML	Unified Modeling Language
VSB	Veículo de Sondagem Booster

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de pesquisa.....	17
1.2	Objetivos da pesquisa.....	17
1.3	Justificativa e relevância da pesquisa	17
1.4	Resultados esperados.....	19
1.5	Organização do estudo	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Conceitos sobre vibrações	21
2.2	Transdutores de vibração	23
2.3	Aplicações dos acelerômetros	29
2.3.1	Teste de vibração	30
2.3.2	Teste de choque mecânico.....	32
2.3.3	Análise modal experimental	33
2.3.4	Demais aplicações	35
2.4	Conceitos sobre processamento de sinais	35
2.4.1	Classificação dos sinais.....	36
2.4.2	Características dos sinais determinísticos periódicos.....	36
2.5	Conceitos sobre calibração de acelerômetros	39
3	O LABORATÓRIO CENTRAL DE CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS.....	45
3.1	Metrologia no âmbito institucional.....	45
3.2	A calibração realizada no LCC de Acelerômetros do COMAER.....	49
3.3	Deficiências detectadas no processo de calibração do LCC de Acelerômetros.....	50
3.4	Solução proposta para o gerenciamento de acelerômetros.....	52
4	METODOLOGIAS DE PESQUISA E DE DESENVOLVIMENTO	55
4.1	Metodologia de pesquisa	55
4.1.1	Caracterização da pesquisa	56
4.1.2	Delimitação da pesquisa.....	57
4.2	Metodologia de desenvolvimento	57
4.2.1	Especificação de requisitos	58
4.2.2	Projeto de software.....	59
4.2.2.1	Modelagem do software	60
4.2.2.2	Modelagem de dados	61
4.2.3	Implementação do sistema	64
4.2.3.1	Desenvolvimento rápido de software utilizando o Delphi.....	64
4.2.3.2	Programação de banco de dados utilizando SQL.....	65
4.2.3.3	Implementação de recursos de segurança para acesso ao banco de dados	66
5	RESULTADOS DA PESQUISA	70
5.1	Apresentação da aplicação.....	70
5.2	Itens da norma NBR ISO/IEC17025 atendidos pela aplicação	74
5.2.1	Controle de registros	74
5.2.2	Controle de dados	75
5.2.3	Equipamentos	76
5.2.4	Rastreabilidade de medição.....	77
5.2.5	Manuseio de itens de teste e calibração	78
5.2.6	Apresentação de resultados	79

6	CONCLUSÃO.....	81
6.1	Aspectos positivos da implementação da sistemática.....	81
6.2	Aspectos negativos da implementação da sistemática.....	82
6.3	Trabalhos futuros	82
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICES	89
	ANEXOS	98

1 INTRODUÇÃO

Em Dinâmica muitas análises são destinadas ao estudo dos efeitos da vibração em sistemas mecânicos. Na área aeroespacial especificamente, um dos propósitos do estudo da vibração é justamente minimizá-la por meio da adequação da estrutura projetada e desenvolvida ao ambiente severo em que será submetida. Testes relacionados à vibração compõem uma etapa do ciclo de vida de sistemas desse gênero e envolvem geralmente a análise de resposta de um grande número de acelerômetros piezoelétricos que monitoram os movimentos da estrutura excitada ou determinam a relação entrada-saída correspondente.

Sendo o acelerômetro o primeiro elemento do conjunto de instrumentos utilizados em um sistema de medição de vibrações, realizar periodicamente sua calibração favorece a precisão da medida e torna-se recomendável devido à freqüente exposição do transdutor a excitações de alta intensidade que podem alterar suas características durante o teste. Além disso, a rastreabilidade da medição a padrões nacionais e condições contratuais ou legais é exigida pelos requisitantes do teste e estabelecida por normas específicas aplicadas na execução dos testes.

Entre os métodos de calibração de acelerômetros destacam-se a calibração primária, realizada pelo Instituto Nacional de Metrologia (NMI) por meio da aplicação de técnicas de interferometria a laser e reciprocidade; e a calibração secundária, que é caracterizada pela obtenção tanto da sensibilidade do acelerômetro em frequência fixa quanto da variação da sensibilidade dentro da faixa de frequência operacional. A rastreabilidade neste caso é assegurada por um acelerômetro padrão de referência, posicionado entre o vibrador e o acelerômetro a ser calibrado. Este método geralmente é utilizado por laboratórios de calibração de acelerômetros de institutos de pesquisa, empresas e fábricas que realizam a calibração de forma a suprir a demanda interna e atender solicitações de clientes externos.

No Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), órgão militar subordinado ao Comando da Aeronáutica (COMAER), está localizado o Laboratório Central de Calibração (LCC) de Acelerômetros, designado à calibração secundária de acelerômetros e atendimento aos padrões estabelecidos pelo Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA). Métodos e operações deste laboratório serão objetos de análise e embasarão o desenvolvimento desta pesquisa.

Este trabalho propõe uma sistemática para o controle de dados de calibração secundária de acelerômetros e da utilização destes em testes e monitoramentos de vibração realizados pelo IAE de acordo com o instituído pela norma técnica NBR ISO/IEC 17025 (2005), que

versa sobre requisitos gerais para competência de laboratórios que realizam calibração e testes. O desenvolvimento de uma ferramenta computacional servirá de apoio à implementação da sistemática proposta. A aplicação estará integrada à infraestrutura da Rede de Comunicação de Dados (RCD) e ao Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) existentes na Instituição, possibilitando, dessa forma, a rastreabilidade de informações relevantes no âmbito do LCC de Acelerômetros do COMAER.

A implementação desta solução não impede que em algum momento possa ser substituída ou atualizada por meio de uma nova tecnologia ou novos procedimentos. Do mesmo modo, outra estratégia de auxílio ao corpo laboratorial poderia ser adotada, como a adoção de uma ferramenta comercial que pudesse minimizar as deficiências do atual processo. Porém esta solução mostrou-se pouco apropriada para o caso em estudo por motivos abordados na seção 3.4 deste trabalho.

Decorrido o desenvolvimento deste trabalho, evidencia-se seu caráter multidisciplinar, uma vez que aspectos relacionados a vibrações, desenvolvimento de software e gestão da qualidade são abordados. A sistemática proposta converge na implantação de um sistema de gestão da qualidade em um laboratório de calibração de acelerômetros, uma vez que procedimentos nela compreendidos atendem a determinados requisitos estabelecidos pela norma técnica NBR ISO/IEC 17025 (2005).

É importante esclarecer a adoção de alguns vocábulos nesta pesquisa. O termo “aplicação” é empregado por versar sobre um sistema computacional isolado que resolve uma necessidade específica (PRESSMAN, 2010, p.7). Os termos “dados” e “informações” são tratados como sinônimos, definidos assim por Date (2000, p. 4). Houaiss (2001) descreve “sistemática” como “um conjunto de elementos organizados entre si segundo um ou mais critérios”. O emprego deste termo nesta pesquisa pode em algum momento ser contestado devido ao fato de serem apresentadas somente as características atinentes à aplicação e os métodos utilizados para o seu desenvolvimento. No entanto, entende-se que a implementação da ferramenta desenvolvida implicará modificações em procedimentos laboratoriais e até no comportamento do corpo laboratorial (aspectos que não compõem o escopo desta pesquisa), o que de fato transpõe o conceito de uma simples aplicação de banco de dados. Dessa forma a aplicação desenvolvida é apenas uma parte do processo de gerenciamento de acelerômetros nas atividades de calibração e teste, ou seja, uma componente da sistemática.

1.1 Problema de pesquisa

Por ser a calibração secundária de acelerômetros um requisito para sua utilização em testes (vibração, choque, análise modal, etc.) ou no monitoramento de vibrações, pode-se afirmar que estas atividades devem estar correlacionadas.

Embora no laboratório em estudo exista um sistema que realize a aquisição dos dados durante a calibração de acelerômetros e possua funcionalidades relevantes como, por exemplo, a emissão de certificados de acordo com o que preconiza a norma NBR ISO/IEC 17025 (2005), ele isoladamente não supre algumas carências detectadas relacionadas à disponibilidade de dados.

A prestação de serviços a clientes externos ou a setores do IAE explicita a inexistência de vínculo entre o processo de calibração de acelerômetros e os testes a serem realizados. Apresenta-se ainda como fator crítico o número elevado de acelerômetros utilizados, o que torna dificultoso o controle laboratorial destes transdutores.

É imprescindível o gerenciamento integrado dos dados das atividades, principalmente porque algumas informações relacionadas à atividade de teste estão intrinsecamente ligadas à atividade laboratorial de calibração.

1.2 Objetivo da pesquisa

O presente estudo tem como objetivo geral propor uma sistemática que, por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida, auxilie no gerenciamento de dados de calibração de acelerômetros, de forma a tornar exequível o controle de utilização destes em testes e monitoramento de vibração.

1.3 Justificativa e relevância da pesquisa

Os acelerômetros piezoelétricos empregados nas medições de vibração podem influenciar significativamente a precisão da medida e, por isso, devem ser calibrados antes de colocados em operação. É relevante que o laboratório designado a aloca-los esteja capacitado a gerenciar os dados de calibração desses transdutores. Para isso, os registros relacionados a cada calibração devem conter as informações apropriadas que facilitem a identificação de elementos influenciadores da incerteza e permita que os testes sejam realizados em condições que se aproximem o máximo possível da condição real (NBR ISO/IEC 17025, 2005).

Esta pesquisa justifica-se por dois motivos: pela constatação de que é necessário haver rastreabilidade entre as atividades de calibração e testes e, pela dificuldade encontrada pelo LCC de Acelerômetros do COMAER em gerenciar os dados de calibração de um elevado número de acelerômetros. Com isso, tornou-se imperativo o desenvolvimento de uma aplicação que auxiliasse no gerenciamento de dados relacionados ao processo de calibração e, ao mesmo tempo, preenchesse a lacuna informacional existente entre esta atividade e a atividade de testes envolvendo acelerômetros piezoelétricos.

De acordo com a norma NBR ISO/IEC 17025 (2005), o controle de dados é um tópico importante no que tange aos métodos de calibração e teste e à validação destes métodos. Porém, a rastreabilidade de dados envolvendo simultaneamente as atividades de calibração e de testes não é comum em laboratórios do gênero. Geralmente, a instituição que realiza a calibração não é a mesma que realiza os testes, o que torna injustificável a manutenção de um histórico de operação dos transdutores. Dados disponibilizados no sítio do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) contabilizam seis laboratórios acreditados no país que realizam calibração de acelerômetros e somente dois que realizam ambas as atividades. Informações sobre estes laboratórios são encontradas no Anexo A.

A presente proposta de estudo aborda um caso específico, em que tanto a atividade de calibração quanto a atividade de teste são realizados pela mesma instituição, o IAE, o que justifica a manutenção de um histórico integrado de dados dos transdutores em ambas as atividades. Este recurso evitaria, por exemplo, a utilização em excesso de um determinado acelerômetro (acarretando a redução de sua vida útil) ou, ao contrário, sua subutilização.

Outro elemento que reforça a relevância desta pesquisa é o fato de a calibração secundária de acelerômetros ser um tópico pouco explorado na literatura. Isto é comprovado em um estudo realizado recentemente por Campos (2010), baseado na pesquisa em dois dos principais periódicos relacionados a vibrações mecânicas e medições. Constatou-se que grande parte dos trabalhos publicados apresenta o estudo de sistemas e novas técnicas de calibração de acelerômetros baseados nos métodos de calibração primária. As técnicas secundárias são pouco abordadas internacionalmente e informações a respeito não são recentemente encontradas.

1.4 Resultados esperados

Por meio desta pesquisa espera-se:

- Minimizar dificuldades de gerenciamento de centenas de acelerômetros piezoelétricos;
- Tornar ágil o processo de liberação dos acelerômetros para uso;
- Auxiliar o LCC de Acelerômetros do COMAER a alcançar sua acreditação junto ao INMETRO.

1.5 Organização do estudo

Neste capítulo inicial é apresentado o introdutório do estudo, que inclui os problemas detectados que levaram ao desenvolvimento da pesquisa, o objetivo geral, a justificativa, a relevância e os resultados esperados.

No segundo capítulo conceitos sobre vibrações, transdutores de vibração e testes envolvendo acelerômetros são apresentados. O referencial teórico inclui também aspectos do processamento de sinais periódicos e a calibração secundária de acelerômetros.

O terceiro capítulo evidencia aspectos da metrologia, apresentando a hierarquia dos laboratórios de calibração do COMAER e o método de calibração aplicado pelo LCC de Acelerômetros, com detalhamento dos componentes e das configurações existentes.

No quarto capítulo os procedimentos metodológicos da pesquisa e do desenvolvimento da aplicação são apresentados. Quanto à pesquisa, sua caracterização e delimitação são descritos. No que tange ao desenvolvimento da solução, métodos utilizados no projeto e construção da aplicação de banco de dados são apresentados. Aspectos relacionados à metodologia de desenvolvimento da aplicação e da modelagem do banco de dados são abordados, assim como as ferramentas computacionais que auxiliaram na construção da aplicação.

O quinto capítulo descreve os resultados obtidos, que consistem na apresentação das funcionalidades da aplicação que beneficiarão o corpo técnico laboratorial e na enumeração dos itens da norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) atendidos pela implantação da sistemática proposta.

As conclusões do trabalho desenvolvido são apresentadas no sexto capítulo. Posteriormente seguem as referências bibliográficas, os apêndices e anexos contendo informações adicionais sobre a sistemática proposta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conceitos que embasaram este estudo, a partir de tópicos que versam sobre vibrações, transdutores de vibração, aplicações dos acelerômetros, aspectos do processamento de sinais periódicos e calibração de acelerômetros.

2.1 Conceitos sobre vibrações

Vibração é definida por Rao (2008) como “qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo” (RAO, 2008, p. 6). Este fenômeno está presente em nossas vidas em todo momento, podendo ser observado na sua forma mais simples em um teclado de computador ao pressionarmos as teclas digitando um texto ou de uma forma mais intensa, como na asa de um avião ou no motor de um foguete em elevada altitude exposto a inúmeras forças dinâmicas. A vibração está presente em nosso corpo e nos auxilia na respiração por meio de sua ação em nossos pulmões, assim como se faz notar em nossas pernas e braços quando caminhamos. Da mesma forma, a vibração está presente nas máquinas, estruturas e sistemas projetados pelo homem.

O movimento vibratório de uma estrutura pode ser representado por um sistema massa-mola-amortecedor, como ilustrado na Figura 1. A inércia é representada por uma massa constante m de rigidez infinita, a elasticidade por uma mola ideal sem massa de rigidez constante k , e o amortecimento por um amortecedor viscoso ideal sem massa de coeficiente de amortecimento constante c .

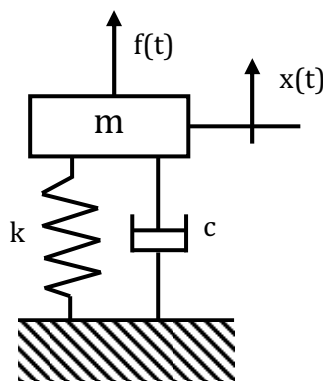


Figura 1 – Representação de um sistema massa-mola-amortecedor (MAIA; SILVA, 1997).

O modelo matemático do sistema massa-mola-amortecedor é descrito pela equação (1), onde $f(t)$ é a força de excitação dependente do tempo aplicada ao sistema e $x(t)$ a resposta do sistema à força de excitação (MAIA; SILVA, 1997, p.3).

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

Rao (2008), Buzdugan, Mihăilescu e Rades (1986) classificam o fenômeno vibração de acordo com os seguintes critérios:

a) Quanto ao número de graus de liberdade

De acordo com o número de graus de liberdade (ou de coordenadas independentes) necessário para determinar as posições ou movimentos de todos os seus componentes, o sistema vibratório pode ser classificado como simples com somente um grau de liberdade, discreto se possuir um número finito de graus de liberdade ou como contínuo quando apresentar um número infinito de graus de liberdade. Muitos problemas relacionados à vibração podem ser tratados com precisão por meio da redução do número de coordenadas, transformando um sistema antes discreto ou contínuo em simples, com um grau de liberdade somente (BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986, p. 13).

b) Quanto à forma de excitação

Um sistema pode oscilar em regime de vibração livre ou forçada. A vibração livre de um sistema ocorre quando este sofre uma perturbação inicial e continua vibrando sem a ação de forças externas, como em um pêndulo. A frequência de uma vibração livre é identificada como frequência natural. Já a vibração forçada se faz presente quando uma força externa age sobre o sistema, como em um motor de automóvel. Quando a frequência de uma força externa coincide com a frequência natural do sistema ocorre o fenômeno denominado ressonância, caracterizado como uma amplificação da amplitude da resposta do sistema, que pode ocasionar oscilações indesejáveis e falhas estruturais graves.

c) Quanto ao amortecimento

Um sistema vibratório pode oscilar em regime de vibração amortecida ou não. O sistema é classificado como amortecido quando a energia aplicada à sua entrada se dissipa pelo atrito ou por outro tipo de resistência durante a oscilação. Do contrário, quando não ocorre dissipação de energia, a vibração é definida como não amortecida.

d) Quanto à linearidade

Um sistema é considerado linear quando seus componentes (mola, massa, amortecedor) apresentam um movimento de comportamento linear obedecendo ao princípio da superposição¹. Neste caso a vibração resultante do sistema também é linear. Quando os componentes não se comportam da mesma forma, o princípio da superposição não é válido e identifica-se a vibração resultante como não linear.

e) Quanto à previsibilidade da excitação

A excitação de um sistema vibratório pode também ser classificada como determinística ou aleatória, de acordo com sua previsibilidade. É considerada determinística quando a excitação de entrada que age sobre o sistema é determinística em qualquer momento, assim como a vibração resultante. Quando o sistema sofre uma excitação de comportamento imprevisível, estocástico, a excitação é classificada como aleatória.

2.2 Transdutores de vibração

Buzdugan, Mihăilescu e Rades (1986) definem transdutor como um dispositivo que converte alterações de uma grandeza mecânica, como deslocamento ou aceleração, em alterações equivalentes de outra grandeza física, como a elétrica. Os transdutores de vibração geralmente são compostos de materiais de estado sólido que são eletronicamente sensíveis à força mecânica e podem ser denominados como ativos, quando sua carga elétrica for gerada

¹ O princípio da superposição estabelece que, uma vez que as equações do movimento são lineares, conhecer a resposta a uma simples entrada harmônica permite o cálculo da resposta a uma diversidade de distúrbios de entrada de natureza periódica, pois a resposta total é representada pelo somatório das respostas individuais (INMAN, 2008, p. 103).

diretamente pela força aplicada (dispensando, dessa forma, uma fonte de energia externa), ou passivos, quando a força aplicada alterar as características elétricas do material. Esta classificação é apresentada esquematicamente na Figura 2, que ilustra de maneira objetiva as duas grandes categorias de transdutores.

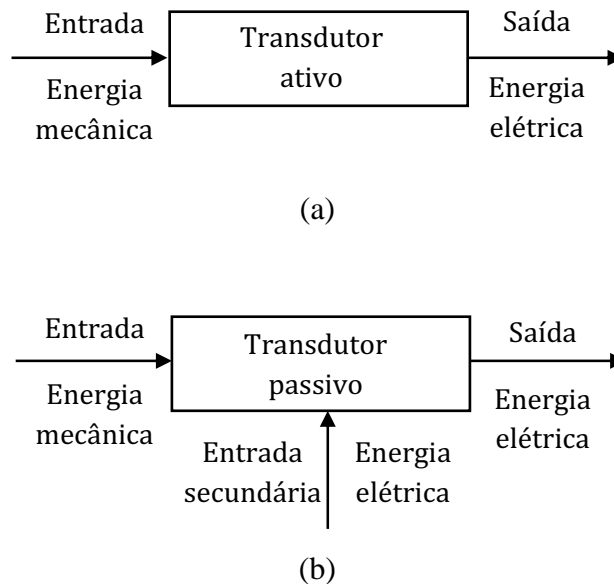


Figura 2 – Categorias de transdutores: (a) ativos; (b) passivos (BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986).

Entre os tipos de transdutores ativos classificados como piezoelétricos, destaca-se o acelerômetro, transdutor piezoelétrico mais utilizado no monitoramento de vibrações devido às suas características de resposta (ou saída) em frequência. Na faixa de frequência compreendida entre 10 Hz e 10 kHz os acelerômetros piezoelétricos são os transdutores mais indicados para o monitoramento de vibrações. Os transdutores de velocidade podem ser empregados para a faixa de frequência entre 10 Hz e 1 kHz. Em movimentos vibratórios de frequência abaixo de 10 Hz, a vibração produzida é pequena em termos de aceleração, moderada em termos de velocidade e relativamente alta em termos de deslocamento e, para este caso, o transdutor de deslocamento é o mais indicado a operar.

A relação entre os parâmetros de deslocamento, velocidade e aceleração de um movimento harmônico pode ser representada por meio de um nomograma de vibração. A Figura 3 ilustra um exemplo de nomograma, com faixa de frequência de vibração para um determinado dispositivo situada entre 2 Hz e 8 Hz, aceleração máxima de 1 g (9,81 m/s²), velocidade limitada a 400 mm/s e pico de deslocamento limitado a 30 mm. A vibração resultante é delimitada à região destacada do gráfico.

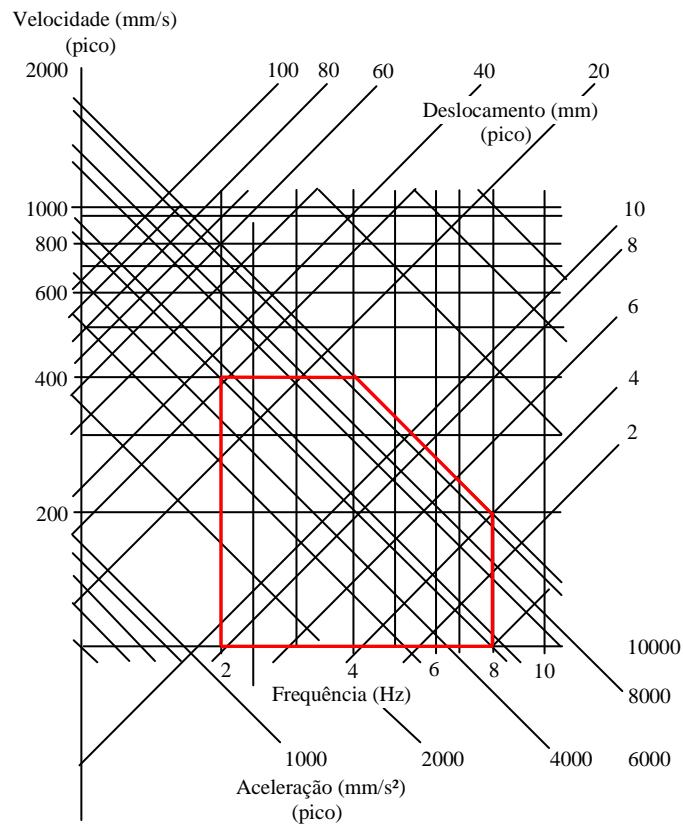


Figura 3 – Nomograma com limites de vibração senoidal (INMAN, 2008).

Fisicamente, a parte inferior do acelerômetro consiste de uma base sólida que deve acompanhar o movimento do objeto monitorado. O elemento piezoelétrico é disposto internamente na estrutura de forma que, quando o conjunto é sujeito à vibração, a massa sísmica exerça sobre o elemento piezoelétrico uma força proporcional à aceleração vibratória, de acordo com a segunda lei de Newton, onde $F = ma$. Em frequências situadas bem abaixo da frequência de ressonância do acelerômetro, a aceleração da massa sísmica é igual à aceleração da base e a magnitude do sinal de saída é proporcional à aceleração à qual o transdutor foi submetido. A Figura 4 ilustra esquematicamente um acelerômetro piezoelétrico e o modelo massa-mola associado.

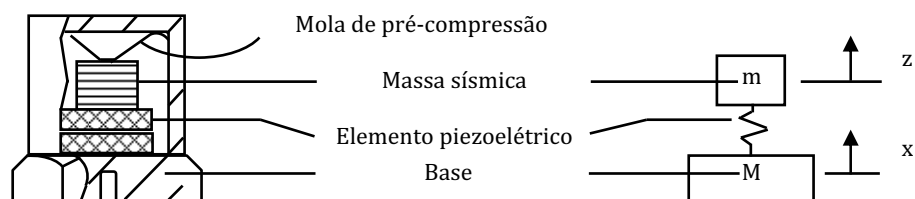


Figura 4 – Constituição de um transdutor e seu modelo massa-mola (EWINS, 1984).

A resposta de um acelerômetro é relacionada à tecnologia empregada na sua construção, podendo apresentar saída em tensão ou carga. Os acelerômetros com saída em carga geram uma carga elétrica proporcional à força aplicada quando o elemento piezoelétrico sofre uma tensão ou compressão provocada pelo movimento da massa sísmica durante a vibração e, neste caso, torna-se necessário o emprego de amplificadores de carga para produzir uma tensão de saída proporcional à carga de entrada gerada pelo acelerômetro.

Nos acelerômetros com saída em tensão, a carga elétrica é condicionada e amplificada internamente, produzindo na saída um sinal em tensão elétrica. Esses acelerômetros são denominados IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) e alguns exemplos de modelos que utilizam esse princípio são o ICP², Isotron³ e DeltaTron⁴.

Os tipos mais comuns de acelerômetros disponíveis comercialmente possuem a forma cilíndrica, com uma base de integração em sua parte inferior, além de um conector de cabo coaxial que pode estar localizado na parte superior ou lateral. São relativamente leves com peso que pode variar de 0,14 gramas a 120 gramas, sendo que as unidades menores possuem em geral cerca de 5mm de diâmetro e as maiores cerca de 25,4 mm, com altura de 25,4 mm, e opções para medições de movimento vibratório em uma única direção (monoaxiais) ou em três direções ortogonais (triaxiais). Diversos tipos são ilustrados na Figura 5.



Figura 5 – Diversos tipos de acelerômetros Brüel&Kjær.

Outro fator associado à caracterização de um acelerômetro é a sua sensibilidade, definida por Buzdugan, Mihăilescu e Rades (1986) como a relação entre sua saída elétrica e a aceleração por ele captada. Ela pode ser descrita como sensibilidade de carga

²ICP é uma marca registrada da empresa PCB.

³Isotron é uma marca registrada da empresa Endevco.

⁴Deltatron é uma marca registrada da empresa Brüel&Kjær.

$$S_q = \frac{q}{\ddot{x}} \quad (2)$$

onde q é a carga desenvolvida pela aceleração \ddot{x} , ou como sensibilidade de tensão

$$S_e = \frac{u}{\ddot{x}} \quad (3)$$

onde u é a tensão de saída do transdutor. As duas sensibilidades são relacionadas pela equação

$$S_e = S_q/C \quad (4)$$

onde C é a capacitância total do transdutor, do cabo e dos conversores.

A sensibilidade do acelerômetro pode variar de acordo com as propriedades do material piezoelétrico e da massa que o compõem. Com isso, os acelerômetros de maior dimensão podem ter sua sensibilidade aumentada dependendo do componente piezoelétrico neles inserido e apresentarem o limite de frequência máxima menor, sendo mais sensíveis a ruídos acústicos.

Um acelerômetro piezoelétrico é caracterizado em termos de sua máxima amplitude de aceleração e faixa útil de frequência de medição, conforme ilustrado na Figura 6.

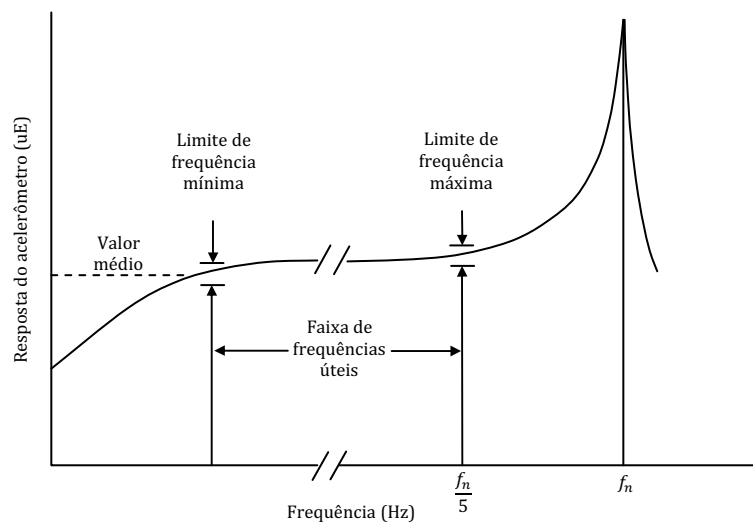


Figura 6 – Curva de resposta de um acelerômetro piezoelétrico. A frequência de ressonância é denotada por f_n . A faixa utilizável depende do desvio aceitável do valor médio da resposta sobre a parte plana da curva de resposta (HARRIS; PIERSOL, 2002).

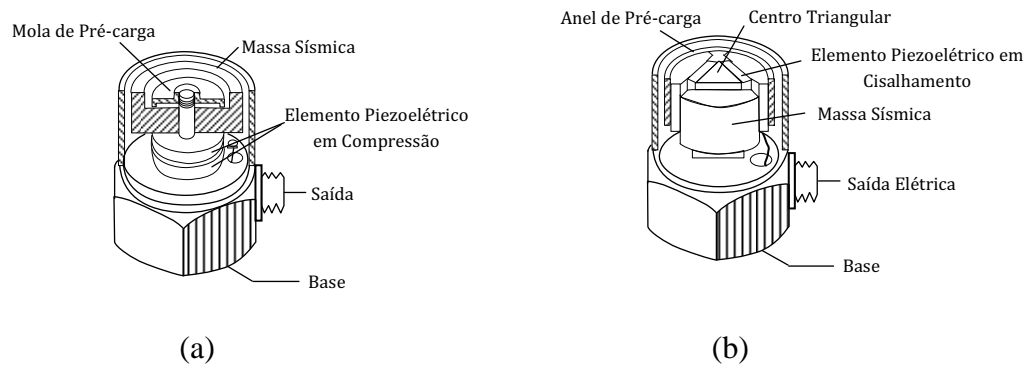
Em termos práticos, de acordo com Buzdugan, Mihăilescu e Rades (1986, p.100), na seleção de um acelerômetro piezoelétrico deve-se considerar que:

- O peso do acelerômetro não deve ultrapassar um décimo do peso real da estrutura vibratória;
- A faixa de frequência do acelerômetro deve estar em conformidade com a faixa de frequência exigida para medição;
- A amplitude máxima de vibração esperada durante a medição não deve exceder a um terço da amplitude máxima suportada pelo acelerômetro;
- A temperatura máxima de operação não deve ser ultrapassada;
- O acelerômetro deve suportar condições ambientais diversas de umidade, ruído, campos magnéticos e radiação.

Em relação à massa sísmica, os acelerômetros podem apresentar diversas configurações. Destacam-se dois modos de operação: compressão e cisalhamento.

Na configuração por compressão a massa sísmica exerce uma força compressora sobre o elemento piezoelétrico. Este tipo de acelerômetro consiste de um disco piezoelétrico e uma massa sísmica localizados na estrutura interna do acelerômetro e fixados em compressão por meio de uma mola, como ilustrado na Figura 7 (a). De acordo com Harris e Piersol (2002), o movimento em determinada direção resulta em uma força compressiva que age sobre o elemento piezoelétrico. Produz-se então uma saída elétrica proporcional à aceleração, que deve ser convertida em tensão por um amplificador de carga (RANDALL, 2011, p.14). Esse tipo de acelerômetro deve ser cuidadosamente acoplado à estrutura para minimizar qualquer distorção presente em sua saída elétrica. Alguns modelos de acelerômetros permitem a medição da aceleração em temperaturas que podem variar de até -254°C a 760°C .

Na configuração por cisalhamento, a massa sísmica exerce uma força de corte sobre o elemento piezoelétrico. Os acelerômetros com essa configuração geralmente são do modelo Delta Shear® da Brüel&Kjær que possuem três elementos piezoelétricos e três massas dispostas em uma configuração triangular, conforme ilustrados na Figura 7 (b). Nesta configuração a mola de fixação é cilíndrica de forma a manter as forças compressivas entre as massas, os elementos piezoelétricos e o centro triangular. Acelerômetros deste tipo apresentam baixa sensibilidade transversal em relação à direção principal de medida e sua faixa de temperatura é a mesma do tipo compressão.



Fonte: Brüel&Kjær

Figura 7 – Configurações de acelerômetros da Brüel&Kjær: (a) compressão; (b) cisalhamento.

De acordo com Serridge e Licht (1987, p.21), na deformação de compressão a carga é captada na direção da polarização, sendo essa uma desvantagem em acelerômetros deste tipo, pois as entradas não vibratórias, como as flutuações de temperatura, desenvolvem uma carga na direção da polarização, que é também captada com a carga induzida pela vibração. Dessa forma, a saída do acelerômetro não é resultante apenas da entrada da vibração. Já na deformação por cisalhamento a carga é captada na direção perpendicular à direção de polarização e, a carga extra, resultante das flutuações de temperatura, não é absorvida. Isso faz com que o desempenho dos acelerômetros com essa configuração sofra menor influência das variações de temperatura no ambiente.

Por outro lado, os autores também afirmam que os acelerômetros do tipo compressão devem ser utilizados em medições de vibração elevada (choque, por exemplo), onde os erros presentes na saída são insignificantes quando comparados com o sinal de vibração. Além disso, o acelerômetro com essa configuração é utilizado como padrão de referência no processo de calibração secundária.

2.3 Aplicações dos acelerômetros

A aplicabilidade dos acelerômetros é apresentada a seguir, com ênfase nos testes de vibração, testes de choque mecânico e análise modal experimental.

2.3.1 Teste de vibração

McConnell (1995) define o teste de vibração como

a arte e ciência de medir e entender a resposta da estrutura enquanto exposta a um ambiente dinâmico específico; e, se necessário, simular esse ambiente de maneira satisfatória para garantir que a estrutura resista ou funcione apropriadamente quando exposta a este ambiente dinâmico em condições de campo. (McCONNELL, 1995, p. 10, tradução nossa).

A execução de testes que envolvem vibração geralmente requer a utilização de determinados equipamentos e instrumentos. Ewins (1984) e Inman (2008) destacam os seguintes grupos de componentes:

- a) Mecanismo de excitação, que normalmente consiste de um vibrador que excita a estrutura fazendo-a vibrar;
- b) Sistema de transdução, para a medição dos parâmetros de interesse, realizada por meio de conversão do movimento da estrutura em sinal elétrico, constituído por condicionadores de sinal e transdutores, sendo o **acelerômetro piezoelétrico** (EWINS, 1984, p. 89, grifo nosso) o transdutor mais utilizado na medição da resposta de vibração de uma estrutura e;
- c) Sistema de controle de vibrações, que deve garantir os níveis de vibração especificados para o teste por meio de um controle em malha fechada. Durante o teste de vibração, o ambiente vibratório gerado é monitorado pelo controlador a partir dos sinais fornecidos pelos acelerômetros de controle e corrigido em tempo real em função dos níveis de aceleração pré-definidos para o teste.

Os testes de vibração são largamente empregados para a qualificação e aceitação de componentes estruturais. Entre as razões expostas por Rao (2008, p. 344) para a medição de vibração, destacam-se:

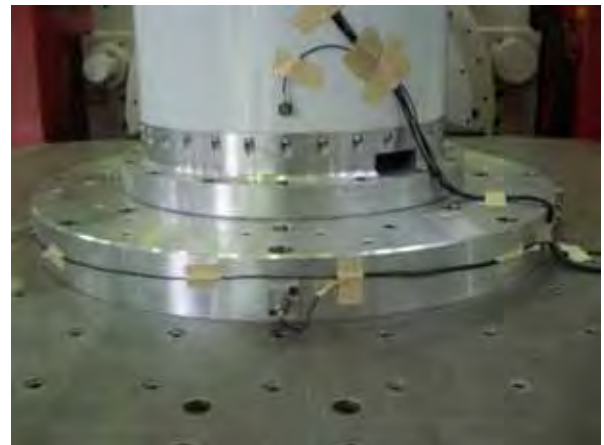
- a) A medição das frequências naturais de uma estrutura é importante para evitar condições de ressonância;
- b) As características de vibração de uma estrutura calculadas previamente podem não corresponder aos valores reais devido aos critérios adotados na análise;
- c) Testes e monitoramentos de vibração geralmente requerem informações sobre o tempo de vida de uma estrutura em um ambiente de vibração.

De acordo com McConnell (1995), existem vários tipos de testes de vibração, alguns envolvendo medições em campo com a estrutura em seu estado operacional normal e outros envolvendo situações em que a estrutura é excitada por meios externos, em campo ou laboratório.

O IAE vem realizando ao longo dos últimos anos diversos testes de vibração de componentes e sistemas aeroespaciais, incluindo os testes dinâmicos dos módulos do Veículo de Sondagem Booster - 30 (VSB-30)⁵, que envolvem algumas dezenas de acelerômetros piezoelétricos. A Figura 8 (a) ilustra o teste de vibração da carga útil do foguete VSB-30, em que foram utilizados três acelerômetros modelo 4514 da Brüel&Kjær para controle do ambiente vibratório e seis acelerômetros modelo 4507-B-004 para medição de vibrações. A Figura 8 (b) ilustra em detalhe alguns acelerômetros fixados na estrutura.



(a)



(b)

Fonte: IAE/DCTA

Figura 8 – Teste de vibração do VSB-30: (a) vista geral; (b) detalhe dos acelerômetros fixados na estrutura.

⁵ O VSB-30 é um foguete de sondagem utilizado em missões suborbitais capaz de lançar cargas úteis compostas por experimentos científicos e tecnológicos.

2.3.2 Teste de choque mecânico

De acordo com Harris e Piersol (2002),

o choque mecânico é uma excitação não periódica de um sistema mecânico, caracterizada pelo tempo curto de duração e alta severidade, causando deslocamentos relativos significantes em um sistema mecânico (HARRIS; PIERSOL, 2002, p. 26.1, tradução nossa).

No que tange a testes, considera-se um sistema exposto ao choque quando este estiver sujeito à excitação mecânica de curta duração (transiente). O teste de choque geralmente objetiva simular sobre um sistema mecânico determinadas condições ambientais esperadas em momentos posteriores. Os testes com utilização de máquinas de choque geralmente são mais recomendados que os testes de campo em condições ambientais reais por quatro razões principais (HARRIS; PIERSOL, 2002):

1. A natureza do choque é controlada e o choque pode ser repetido com razoável exatidão. Isso permite tanto uma avaliação comparativa do equipamento em teste quanto uma correta especificação de desempenho;
2. A intensidade e a natureza dos movimentos de choque que podem ser produzidos resultam em uma condição média padrão, possibilitando melhor proteção do sistema, enquanto que o teste de campo envolve uma condição específica somente contida nessa média;
3. A máquina de choque pode ser alojada em local conveniente que não afete sua disponibilidade para o monitoramento do teste e;
4. A máquina de choque possui um custo de operação relativamente baixo e pode executar de forma prática um grande número de testes de desenvolvimento em componentes e subconjuntos complexos (HARRIS; PIERSOL, 2002, p.26.1, tradução nossa).

Todavia, no domínio aeroespacial, testes de campo são imperativos e envolvem um grande número de acelerômetros piezoelétricos.

A Figura 9 (a) ilustra um teste de separação de estágios do Veículo Lançador de Satélites (VLS). Neste teste foram utilizados dois sistemas de medição – um sistema solo com 112 canais, e outro sistema via telemetria com 10 canais, para medições de choque e vibração quase-estática, distribuídos em: 70 acelerômetros modelos 8339-002, 8339 e 4514 da Brüel&Kjær para medições de choque; 42 acelerômetros modelos 4573 e 4574 para medições de vibração quase estática (sistema solo); e 10 acelerômetros modelo 4393 para medições de choque (sistema de telemetria). A Figura 9 (b) ilustra em detalhe um acelerômetro fixado na estrutura.



(a)



(b)

Fonte: IAE/DCTA

Figura 9 – Teste de separação de estágios do VLS: (a) vista geral ilustrando quatro momentos do teste; (b) detalhe de um acelerômetro fixado na estrutura.

2.3.3 Análise modal experimental

O teste modal, incluindo o processo de aquisição de dados e o processamento digital de sinais, é executado em estruturas com o objetivo de obter um modelo matemático experimental de seu comportamento dinâmico (EWINS, 1984, p.1).

Para Maia e Silva (1997), o requisito comum em testes modais geralmente envolve a obtenção de um modelo estrutural dinâmico adequado para um determinado objetivo. Este objetivo pode ser:

- Obtenção das frequências de uma estrutura;
- Obtenção das formas modais e informações de amortecimento da estrutura;
- Correlação entre um modelo de elementos finitos da estrutura e os resultados medidos da estrutura real;
- Obtenção de um modelo dinâmico da estrutura que pode ser utilizado para avaliar os efeitos de uma série de modificações nesta estrutura ou;
- Obtenção de um modelo dinâmico adequado para atualização do modelo de elementos finitos de uma estrutura de tal forma que o modelo teórico seja a melhor representação das características dinâmicas da estrutura real (MAIA; SILVA, 1997, p. 128, tradução nossa).

A Figura 10 (a) ilustra um teste modal do Veículo Aéreo Não Tripulado Acauã (VANT). Este teste foi realizado para estimação dos parâmetros modais até a frequência máxima de 128 Hz. Os pontos de medição das respostas às excitações aplicadas na estrutura foram distribuídos em cinco componentes distintos da aeronave – asa, cauda, empena horizontal, empena vertical e fuselagem, totalizando 88 pontos de medição. Foram utilizados acelerômetros Brüel&Kjær, distribuídos da seguinte forma: 40 acelerômetros modelo 4507-B-004, 44 acelerômetros modelo 4508B e quatro acelerômetros modelo 4507-002. A Figura 10 (b) ilustra em detalhe os acelerômetros fixados na asa do veículo.



(a)



(b)

Fonte: IAE/DCTA

Figura 10 – Análise modal experimental realizada no VANT: (a) vista geral; (b) detalhe dos acelerômetros fixados sobre a asa do veículo.

2.3.4 Demais aplicações

Outras aplicações de acelerômetros incluem o controle ativo de vibrações e o monitoramento de vibrações em máquinas rotativas e em seres humanos.

Os acelerômetros piezoelétricos desempenham um papel importante em sistemas de controle ativo de vibrações, sendo utilizados nas medições em que são estimadas perturbações e variações de sistema (FULLER; ELLIOTT; NELSON, 1996, p.115). Em geral esses transdutores fornecem ao controlador informações que permitem determinar o desempenho do sistema de controle ou reproduzir sinais de controle relacionados à resposta do sistema.

Este transdutor é utilizado também no monitoramento de vibrações em máquinas rotativas. Os componentes dessas máquinas, como rolamentos ou conjunto de engrenagens, quando defeituosos, podem gerar vibrações de alta frequência e, por isso, devem ser monitorados com acelerômetros. Estes quando instalados sobre a estrutura da máquina podem detectar de forma contínua ou periódica o movimento absoluto da estrutura em termos de aceleração (SCHEFFER; GIRDHAR, 2004, p.32).

Finalmente, o monitoramento de vibrações em seres humanos é outra atividade em que acelerômetros são empregados. Em muitos sistemas de engenharia, o ser humano é parte integrante e a transmissão de vibração sobre ele gera desconforto e perda de eficiência (RAO, 2008, p.5). Além disso, os efeitos da vibração sobre o corpo humano em determinados níveis e frequências podem ser extremamente graves, podendo afetar alguns órgãos. Os seres humanos são mais sensíveis à aceleração que ao deslocamento, sendo que a vibração em torno da frequência de 5 Hz a aproximadamente $0,01 \text{ m/s}^2$ de amplitude é mais facilmente percebida (MANSFIELD apud INMAN, 2008, p.19).

2.4 Conceitos sobre processamento de sinais

Para identificar a origem das vibrações, Brandt (2011) afirma que muitas vezes é necessária uma análise profunda dos sinais medidos nos testes realizados. A análise de sinais, que entre várias disciplinas abrange também a de análise de vibrações, é um tópico relevante no que tange aos testes de vibração e também à calibração de transdutores. A interpretação correta dos sinais adquiridos nestas duas aplicações proporciona o conhecimento das reais condições físicas de um sistema vibratório (teste) e assegura a confiabilidade que um transdutor deve apresentar (calibração).

2.4.1 Classificação dos sinais

De acordo com Shin (2008), o sinal é a representação dos dados de um fenômeno físico. Pode-se considerar como exemplos de sinais as oscilações de temperatura em um determinado ambiente utilizando a escala temporal e as variações de tensão de um transdutor de vibração. Maia e Silva (1997) classificam os sinais dinâmicos em dois grandes grupos definidos como determinísticos e aleatórios, conforme ilustrado na Figura 11.

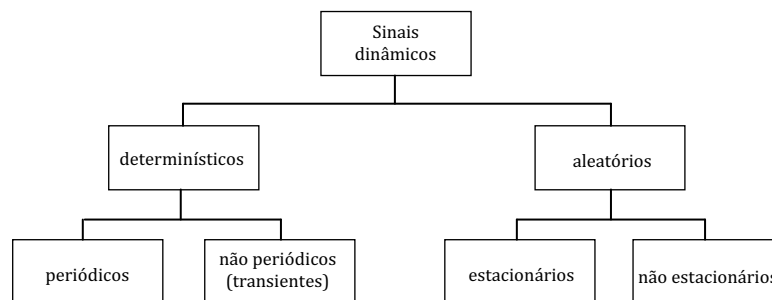


Figura 11 – Distribuição dos tipos de sinais dinâmicos (MAIA; SILVA, 1997).

Uma vez que sinais periódicos senoidais são empregados no processo de calibração de transdutores de vibração, neste trabalho são discutidos somente os conceitos sobre os sinais classificados como determinísticos e periódicos.

2.4.2 Características dos sinais determinísticos periódicos

Os sinais determinísticos periódicos possuem forma de ondas e repetem-se em intervalos regulares de tempo, sendo a senóide seu exemplo mais simples, como ilustrado na Figura 12, onde T_p é denominado o período do sinal e $f = 1/T_p$ a sua frequência.

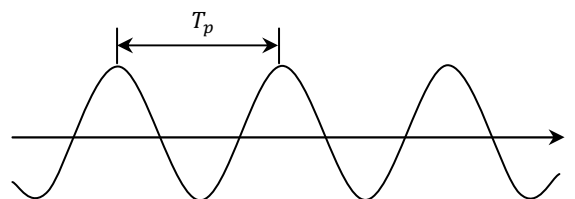


Figura 12 – Sinal senoidal.

Brandt (2011) considera importante o sinal senoidal no processo de análise de vibrações pelo fato do seno representar uma frequência simples que, em um sistema linear, significa uma entrada senoidal gerando uma saída senoidal, ou seja, uma resposta harmônica é obtida.

Para French (2001), existem duas razões, uma física e outra matemática, que definem a importância da vibração senoidal, também descrita como movimento harmônico simples:

A razão física baseia-se no fato de que vibrações puramente senoidais se originam de uma grande variedade de sistemas mecânicos devido às forças proporcionais ao deslocamento do equilíbrio, que deve ser pequeno. A outra razão é devida ao teorema de Fourier, que estabelece que, qualquer perturbação que se repita regularmente com o período T pode ser construída ou analisada por um conjunto de vibrações senoidais puras de períodos $T, T/2, T/3$, etc. (FRENCH, 2001, p. 14).

Além do sinal senoidal de frequência fixa, o sinal do tipo varredura senoidal também é amplamente empregado na análise de vibrações. Sinais do tipo varredura senoidal são obtidos variando-se a frequência do sinal a uma taxa de variação linear ou exponencial, conforme ilustrado na Figura 13.

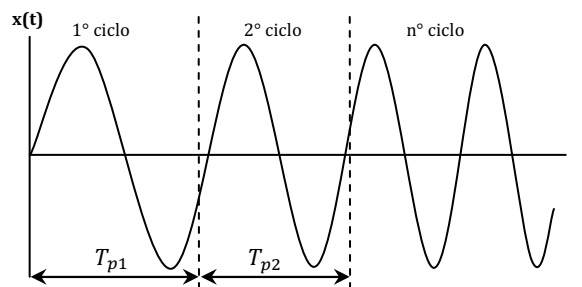


Figura 13 – Sinal por varredura senoidal.

Em termos de caracterização do domínio da frequência, seu espectro é obtido a partir da amplitude e frequência de cada ciclo do sinal.

De acordo com Barros (2001), considerando-se que cada ciclo de uma varredura por seno é uma função periódica contínua que satisfaz as condições de Dirichlet ⁶ (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996), este sinal pode então ser expresso por uma série discreta de Fourier. Ou seja, um sinal $x(t)$, de período T , pode ser denotado por (NEWLAND, 1997):

⁶ As condições de Dirichlet são satisfeitas quando: a) um sinal $x(t)$ apresenta um número finito de descontinuidades em um período qualquer; b) um sinal $x(t)$ contém um valor mínimo e um valor máximo durante um período qualquer; c) um sinal $x(t)$ é absolutamente integrável em um período qualquer (PROAKIS; MANOLAKIS, 1996, p.234).

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad (5)$$

onde os coeficientes a_0 , a_k e b_k são definidos por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \quad (7)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt \quad (8)$$

O espectro de uma varredura senoidal seria obtido então pelo cálculo das frequências e amplitudes fundamentais (para $k = 1$), através da análise isolada de cada ciclo crescente de frequência, conforme ilustrado na Figura 14.



Figura 14 – Espectro de uma varredura senoidal.

Em termos da caracterização no domínio do tempo, um sinal periódico senoidal é descrito pelos seus valores de valor médio, valor de pico, valor pico-a-pico e valor eficaz (HARRIS; PIERSOL, 2002, p.12.10), conforme ilustrado na Figura 15. Esses valores são utilizados na especificação da sensibilidade de transdutores de vibração e choque.

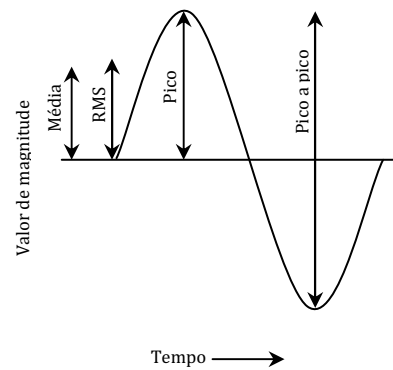


Figura 15 – Relação entre os quantificadores de amplitude (HARRIS; PIERSOL, 2002, p.12.10).

2.5 Conceitos sobre calibração de acelerômetros

Quando utilizados no monitoramento de vibrações, os acelerômetros são frequentemente submetidos a forças de grande intensidade que podem resultar em mudança sensível de suas características ou até mesmo em avaria permanente. E por apresentarem um porte reduzido e serem frequentemente manipulados, os acelerômetros podem ainda apresentar avarias mesmo quando não utilizados, como, por exemplo, quando expostos a quedas.

Para verificação da sensibilidade, calibrações de acelerômetros são conduzidas, constituindo-se em uma importante operação que deve anteceder as atividades de testes e monitoramento de vibrações estruturais, visando garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados gerados pela cadeia de instrumentos utilizada nas medições. A sensibilidade de carga é um dos critérios fundamentais para a seleção de um acelerômetro piezoelétrico e é definida como a razão entre a carga desenvolvida resultante da força aplicada sobre o transdutor e a aceleração que causou o fluxo de carga, sendo expressa geralmente em pC/g ou mV/g.

Outros parâmetros avaliados na calibração de acelerômetros são a capacitância do transdutor e sua sensibilidade transversal. A capacitância de um acelerômetro pode ser definida como a razão entre suas sensibilidades de carga e tensão, podendo ser calculada através dessas duas calibrações. A sensibilidade transversal está relacionada à sensibilidade do acelerômetro a movimentos perpendiculares ao seu eixo principal, devendo estar abaixo de 5% da sensibilidade do eixo principal (BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986).

Para Serridge e Licht (1987), além de somente estabelecer uma relação entre grandeza física e grau definido de precisão, há também outras razões para se efetuar a calibração destes transdutores:

- Fundamentados em leis, contratos ou normas específicas, os clientes requisitantes de testes podem exigir evidências que comprovem a precisão do transdutor;
- Nos casos em que o acelerômetro é utilizado em uma configuração particular não documentada ou ambiente não conhecido, faz-se necessária uma calibração para esta condição. A carta de calibração do transdutor, porém, abrange a maioria das aplicações;
- Um sistema de controle é parte importante no processo de calibração, principalmente em sistemas de medição compostos de muitos instrumentos. Erros cometidos no cálculo de toda a sensibilidade do sistema podem ser evitados com uma simples verificação da calibração.

O processo de calibração de um acelerômetro refere-se essencialmente à verificação de sua sensibilidade, porém a carta de calibração que o acompanha fornece parâmetros adicionais relevantes como resposta em frequência, capacitância e peso (SERRIDGE; LICHT, 1987, p. 112). A carta de calibração de um acelerômetro Brüel&Kjær modelo 4514-B-004 é apresentada no Anexo B.

Entre vários fatores que determinam a complexidade da calibração, destaca-se a aplicação pretendida, condições em que as medições serão executadas e o tipo de instrumentos disponíveis para a calibração. De acordo com Buzdugan, Mihăilescu e Rades (1986, p. 269), na calibração de acelerômetros geralmente as seguintes informações são exigidas:

- A sensibilidade, quando relacionada a uma faixa de frequência de interesse, a uma determinada faixa de amplitude e quando submetida a condições ambientais diversas (temperatura, variação de tensão, ruído acústico, umidade, campos eletromagnéticos);
- Periodicidade da calibração (novas calibrações em intervalos de um a dois anos) e;
- Resposta de frequência e faixa operacional linear em diferentes condições de acoplamento.

É recomendável utilizar o método de calibração que forneça a sensibilidade de acordo com a faixa dos níveis de frequência e amplitude nas quais o transdutor irá operar. A

sensibilidade do acelerômetro pode ser obtida por dois métodos de calibração distintos (SERRIDGE; LICHT, 1987 e HARRIS; PIERSOL, 2002):

- Métodos absolutos (englobam o processo de calibração primária de acelerômetros): incluem interferometria a laser e técnicas de reciprocidade. Este método de calibração é aplicado pelo NMI de cada país. Esses institutos ocupam o topo da hierarquia dos padrões de calibração e são acreditados para a calibração de padrões de referência. No Brasil, o INMETRO é o órgão acreditado para realizar a calibração primária de acelerômetros;
- Método por comparação (engloba o processo de calibração secundária de acelerômetros): neste método o acelerômetro a ser calibrado é fixado sobre um acelerômetro padrão de referência, e ambos são fixados sobre a armadura do vibrador em uma configuração referenciada como calibração por comparação ou “back to back” (McCONNELL, 1995).

Neste trabalho apenas a calibração por comparação é discutida de forma mais aprofundada. A calibração primária, não abordada nesta dissertação, é discutida em uma vasta literatura abordando este método (SERRIDGE; LICHT, 1987; HARRIS; PIERSOL, 2002; BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986).

No método de calibração de acelerômetros por comparação, o acelerômetro utilizado como referência é montado sobre a armadura do vibrador e o acelerômetro a ser calibrado é acoplado rigidamente sobre o acelerômetro padrão de referência, conforme ilustrado na Figura 16.

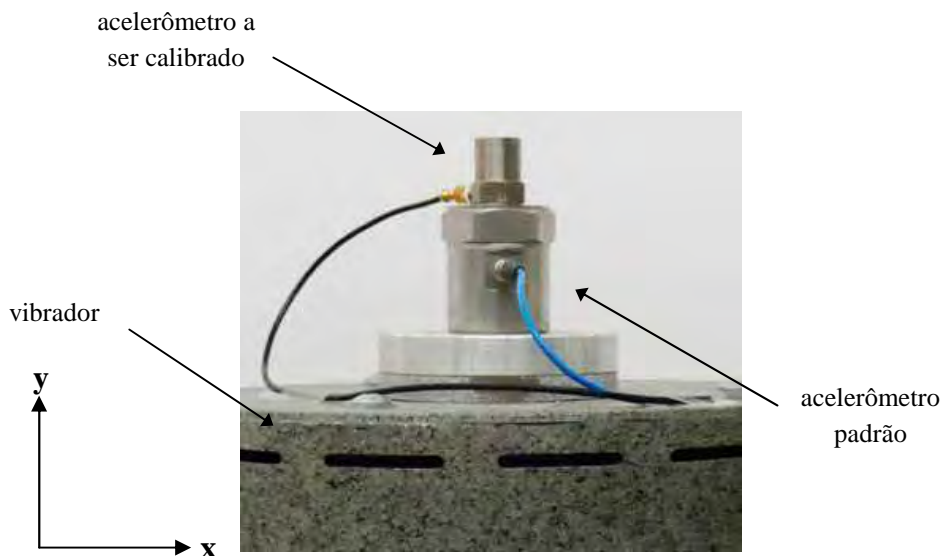


Figura 16 – Configuração da calibração pelo método de comparação ou “back to back”.

A calibração do acelerômetro é limitada às faixas de frequência e amplitude utilizadas na calibração do transdutor padrão (BUZDUGAN; MIHĂILESCU; RADES, 1986). A sensibilidade do acelerômetro padrão é definida neste caso como S_r . A sensibilidade do acelerômetro a ser calibrado é desconhecida e denominada S_u . Quando ambos os acelerômetros são sujeitos a uma excitação senoidal gerada pelo vibrador com frequência fixa na direção y , as saídas V_u e V_r dos acelerômetros são medidas. Como $S_u = V_u/a_y$ e $S_r = V_r/a_y$, a sensibilidade S_u pode ser obtida pela seguinte equação:

$$S_u = S_r \frac{V_u}{V_r} \quad (9)$$

Dessa forma, quando os dois transdutores são submetidos a um movimento vibratório introduzido pelo vibrador, o coeficiente das respectivas tensões de saídas será proporcional as suas sensibilidades e, como a sensibilidade do acelerômetro padrão já é conhecida, a sensibilidade do acelerômetro a ser calibrado pode ser determinada com precisão. O diagrama esquemático da configuração “back to back” é ilustrado na Figura 17.

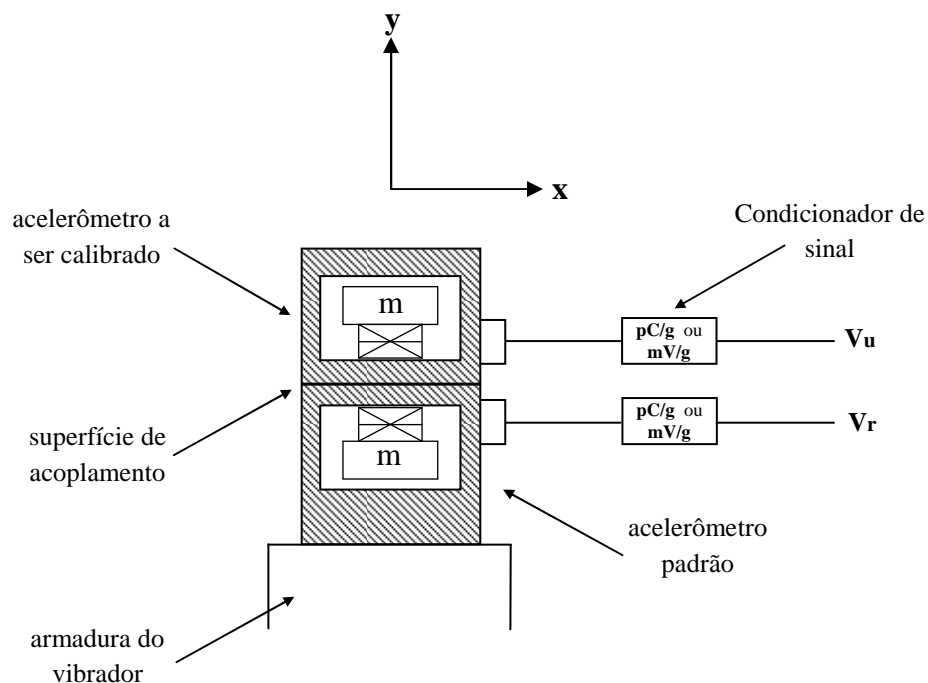


Figura 17 – Diagrama esquemático da calibração por comparação (McCONNELL, 1995).

Conforme recomendações da norma ISO 16063-21 (2003), os melhores resultados em termos de precisão geralmente são alcançados quando os dois acelerômetros são rigidamente fixados na configuração “back to back” com os respectivos eixos de sensibilidade paralelos à direção do movimento. Com efeito, imprecisões podem ser produzidas em razão de: um alinhamento imperfeito do eixo de sensibilidade do acelerômetro em relação ao eixo da medida desejada; rigidez do acoplamento; variações de temperatura ou ainda em razão do efeito de vibração do cabo do acelerômetro. De acordo com McConnell (1995, p. 237), neste método de calibração o par constituído pelo acelerômetro padrão e pelo condicionador de sinal torna-se uma única unidade e a rastreabilidade da calibração é assegurada pelo acelerômetro padrão calibrado por um NMI. A Figura 18 ilustra a curva resultante de uma calibração secundária de um acelerômetro piezoelétrico.

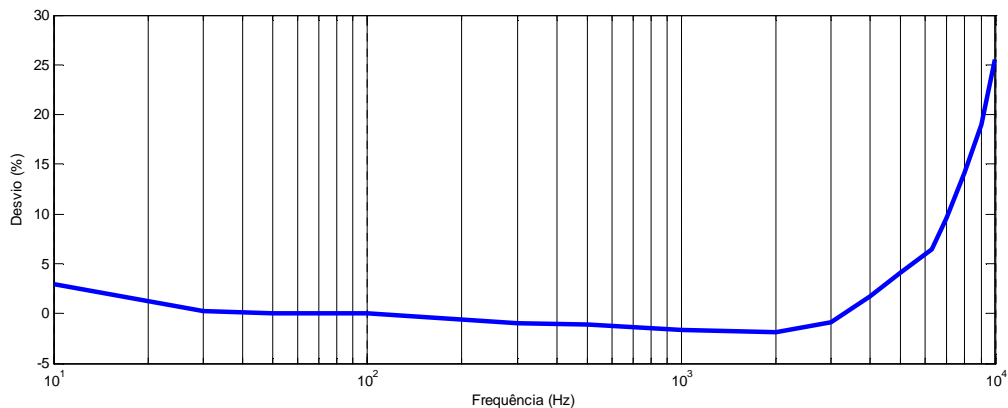


Figura 18 – Curva de resposta da calibração secundária de um acelerômetro piezoelétrico.

Algumas considerações adicionais devem ser observadas para o valor da sensibilidade, determinada em um processo de calibração por comparação (BARROS; JULIANI; MATHIAS, 2005). Esta é influenciada pela amplitude e pela frequência da excitação aplicada e, no caso específico dos acelerômetros fabricados pela empresa Brüel&Kjaer, os valores de sensibilidade são fornecidos para uma frequência fixa de 160 Hz e amplitude de 100 ms^{-2} . Entretanto, estes acelerômetros utilizam geralmente elementos piezoelétricos que apresentam uma atenuação da sensibilidade que varia a uma taxa de 2,5% por década de frequência e esta atenuação deve ser considerada para o valor da sensibilidade obtido pelo método de comparação, medido para um valor de frequência fixa.

Decorrente disto, a calibração de um acelerômetro deve fornecer o valor da sensibilidade acompanhado da sua respectiva resposta em frequência, indicando assim o valor da sensibilidade medido para uma frequência fixa de calibração e também a sensibilidade

relativa. A sensibilidade relativa é obtida por meio da razão entre o valor da sensibilidade à frequência fixa e o valor da sensibilidade medido ao longo da faixa de frequência operacional do acelerômetro.

3 O LABORATÓRIO CENTRAL DE CALIBRAÇÃO DE ACELERÔMETROS

Neste capítulo são apresentadas as disposições hierárquicas - organizacional e metrológica - que abrangem os laboratórios de calibração do COMAER, enumeradas as deficiências detectadas no processo de calibração do LCC de Acelerômetros em particular e apresentada uma proposta de solução visando minimizar tais deficiências. O conceito de laboratório é o mesmo adotado pela Norma de Sistema do Comando da Aeronáutica - NSCA 9-4 (2009), que o define como um organismo que calibra e/ou realiza testes. Nos casos em que um laboratório faz parte de uma organização militar que realiza outras atividades além das referidas, o termo reporta-se apenas às partes que estão diretamente envolvidas nos processos de calibração e/ou teste, sendo estes realizados a partir de instalações permanentes, temporárias ou móveis.

3.1 Metrologia no âmbito institucional

O COMAER, uma organização das Forças Armadas subordinada ao Ministério da Defesa, foi criado para formular e conduzir a política aeronáutica, civil e militar do país (RANGEL, 2005). O Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) é um órgão subordinado ao COMAER e tem como propósito desenvolver atividades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico e industrial no setor aeroespacial. Conforme ilustrado na Figura 19, dentre os institutos que compõem sua estrutura orgânica, como o Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI) e o Instituto de Estudos Avançados (IEAv), destaca-se neste trabalho o IAE, que desenvolve projetos nas áreas aeronáutica, aeroespacial e de defesa. A calibração de transdutores de aceleração e os testes realizados com estruturas aeroespaciais são algumas das diversas atividades do Instituto inseridas no contexto deste trabalho.

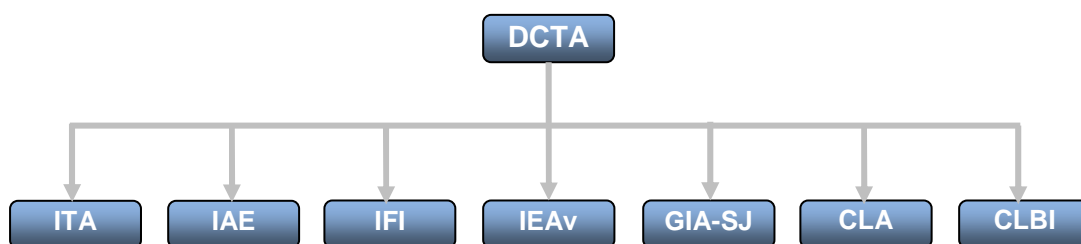
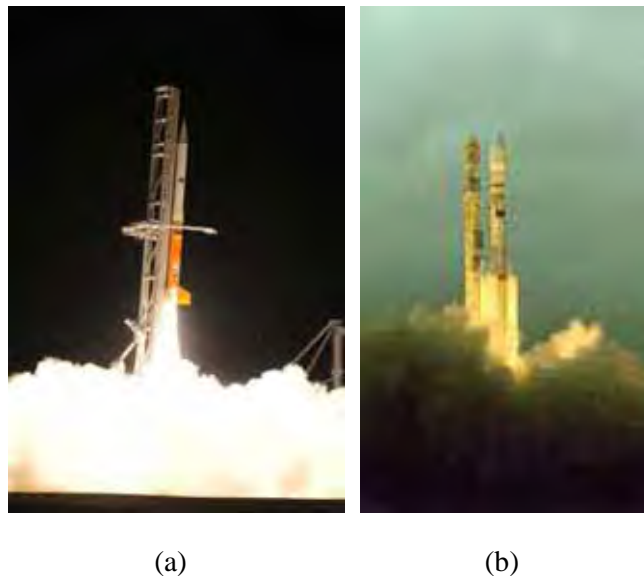


Figura 19 – Institutos subordinados ao DCTA.

Entre as realizações do IAE, destacam-se os veículos de sondagem das séries SONDA e VSB-30, ilustrado na Figura 20 (a), que objetiva lançar experimentos em ambiente de micro gravidade ⁷; e o VLS-1, ilustrado na Figura 20 (b), cujo propósito é inserir na órbita terrestre satélites de pequeno porte. Os veículos de sondagem especificamente têm proporcionado a realização de inúmeros experimentos científicos e tecnológicos por universidades e centros de pesquisa brasileiros permitindo a consolidação de conhecimentos em áreas como propulsão, materiais e processos (AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2005). Decorrente disto, a participação industrial e as pesquisas na área aeroespacial vem crescendo ao longo dos anos, fato que tem atraído a atenção de outros países interessados na utilização do ambiente de micro gravidade para suas pesquisas.



Fonte: IAE/DCTA

Figura 20 – Veículos desenvolvidos pelo IAE: (a) VSB-30; (b) VLS-1.

A evolução tecnológica dos equipamentos e instrumentos empregados nas atividades aeroespaciais expôs a necessidade de normalização das atividades técnico-gerenciais relacionadas aos processos de medição em calibrações e testes. Foi criado então o SISMETRA, cuja atribuição é normalizar as atividades relacionadas à metrologia no âmbito do COMAER, assegurando a confiabilidade, a comparabilidade e a rastreabilidade das calibrações, medições e testes realizados em benefício do COMAER.

⁷ Condições de micro gravidade proporcionadas por voos suborbitais permitem a realização de experimentos científicos e tecnológicos nas áreas de materiais, biotecnologia, combustão, aperfeiçoamento dos processos de geração de energia na Terra, entre outras.

Em termos organizacionais, o SISMETRA é constituído por um órgão central e pelos seus elos. Entre as inúmeras atribuições do órgão central há a responsabilidade pela disseminação da rastreabilidade metrológica, fiscalização e aprimoramento das atividades correlatas. O órgão central é o DCTA, que coordena as atividades metrológicas do Conselho de Metrologia do SISMETRA, do IFI (por intermédio da Divisão de Confiabilidade Metrológica Aeroespacial) e do LCC. Os elos são todos os laboratórios de calibração, medição e testes, bem como os demais processos tecnológicos usuários de metrologia no âmbito do COMAER.

Os padrões metrológicos do SISMETRA estão inter-relacionados aos padrões nacionais do INMETRO. Estes, por sua vez, estão referenciados ao Escritório Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), órgão gestor dos padrões internacionais de medidas que zela pela conformidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI). De acordo com a NSCA 9-1 (2012), a cadeia metrológica dos laboratórios do SISMETRA no contexto metrológico internacional é composta pelos seguintes organismos:

- a) BIPM: *Bureau International des Poids et Mesures*, órgão sediado em Paris, fundado em decorrência da Convenção do Metro ⁸, zela pela uniformidade mundial das medições, assim como por sua rastreabilidade às unidades do SI. Seus membros são os NMIs dos países associados.
- b) INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia; autarquia federal competente para: executar políticas nacionais de metrologia e qualidade; implantar e manter a cadeia de rastreabilidade dos padrões das unidades de medida no país de forma a torná-las harmônicas internamente e compatíveis no plano internacional; e planejar e executar atividades de acreditação de laboratórios de calibração e de ensaios.
- c) LCC: Laboratório Central de Calibração, laboratório de mais alto nível de padrões de referência dentro da estrutura do DCTA, responsável por garantir a rastreabilidade metrológica aos padrões nacionais do INMETRO ou equivalente, em uma ou mais grandezas de interesse do SISMETRA.

⁸ A Convenção do Metro é um tratado diplomático assinado em Paris no ano de 1875 por representantes de dezessete países, incluindo o Brasil. O propósito deste tratado era instituir uma autoridade internacional na área de metrologia.

- d) LRC: Laboratórios Regionais de Calibração, integrantes do SISMETRA, localizados em território nacional, formalmente autorizados pelo órgão central para calibrarem os padrões dos LSC. Os padrões dos LRC são rastreados diretamente aos padrões do LCC.
- e) LSC: Laboratórios Setoriais de Calibração, integrantes do SISMETRA, localizados em bases aéreas, centros de pesquisas, unidades operacionais, unidades de controle do espaço aéreo, organizações de saúde, unidades de ensino ou em outros órgãos do COMAER, responsáveis por calibrar equipamentos, instrumentos de medição e/ou sistemas de medição. Os padrões dos LSC são rastreados aos padrões do LRC correspondente.

A Figura 21 ilustra a hierarquia metrológica dos laboratórios do SISMETRA no contexto metrológico internacional e, por conseguinte, dos padrões, equipamentos e instrumentos de medição existentes no COMAER.

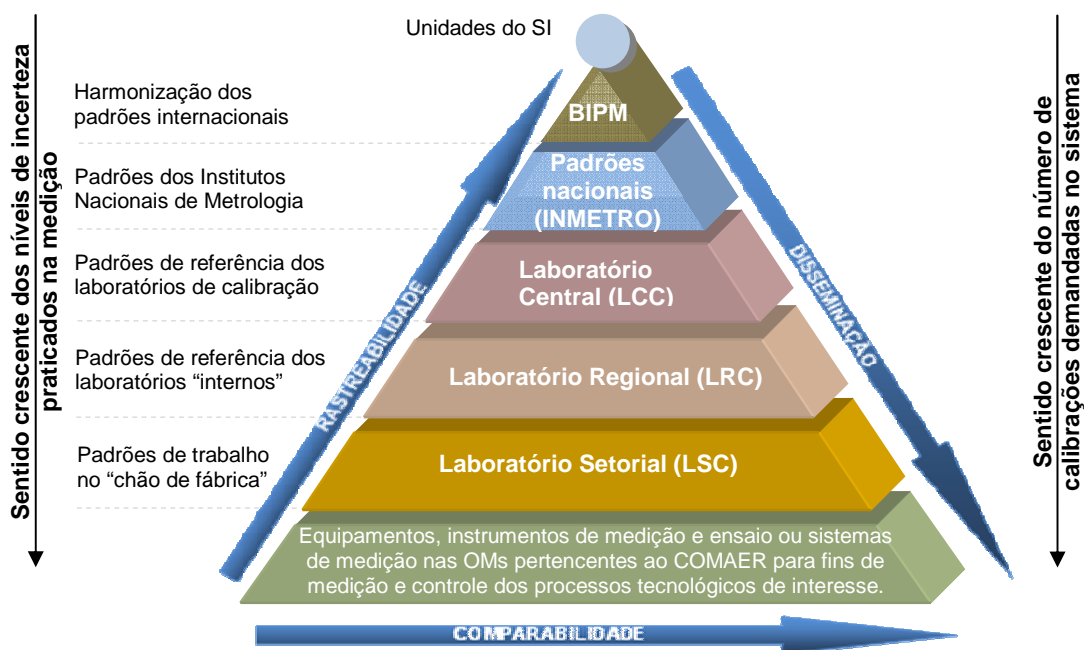


Figura 21 – Cadeia de rastreabilidade metrológica do SISMETRA (NSCA 9-1, 2012).

O complexo denominado Laboratório Central de Calibração é composto por laboratórios distribuídos entre os institutos do DCTA.

No IAE estão situados os seguintes laboratórios com as respectivas grandezas:

- a) Laboratórios da Divisão de Aerodinâmica: Baixa Pressão e Baixa Força (Tração e Compressão);
- b) Laboratórios de Calibração da Divisão de Integração e Ensaios: Alta Pressão, Força (Tração e Compressão) e **Acelerômetros**; e
- c) Laboratório de Calibração de Força da Divisão de Sistemas Aeronáuticos: Tração e Compressão.

Na Divisão de Confiabilidade Metrológica, pertencente ao IFI, estão instalados:

- a) Laboratórios de Metrologia Física: Massa, Pressão, Temperatura e Vazão (Líquido);
- b) Laboratório de Metrologia Elétrica; e
- c) Laboratório de Metrologia Dimensional.

No IEAV, especificamente na Subdivisão de Óptica Aplicada da Divisão de Fotônica, está localizado o Laboratório de Medição de Superfície Óptica.

3.2 A calibração realizada no LCC de Acelerômetros do COMAER

A calibração secundária de acelerômetros piezoelétricos é realizada com o apoio do sistema marca The Modal Shop (TMS) modelo 9155C, para calibrações na faixa de frequências de 5 Hz a 10 kHz e amplitude de até 10 g. O sistema é composto de vibrador, amplificador de potência, acelerômetro padrão, um chassi contendo dois condicionadores de sinais, acessório de conexão e um microcomputador com placa de controle de aquisição de dados e software de controle instalado. Estes componentes são ilustrados na Figura 22 e descritos na Tabela 1.

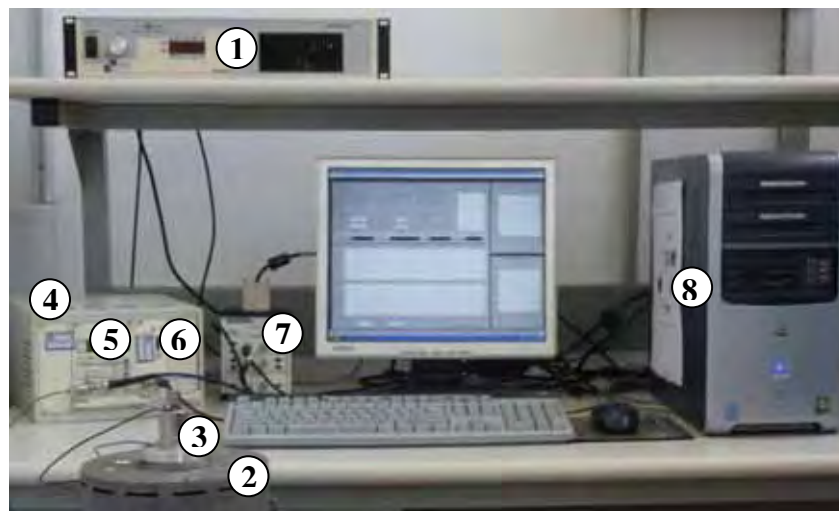


Figura 22 – Componentes do sistema de calibração secundária de acelerômetros.

Tabela 1 – Componentes do sistema de calibração secundária de acelerômetros.

Item	Descrição	Marca	Modelo
1	Amplificador de potência	TMS	2050E05
2	Vibrador	MB Dynamics	CAL 50
3	Acelerômetro padrão	PCB	301A10
4	Chassi	PCB	441A35
5	Condicionador de sinais 1	PCB	443B101
6	Condicionador de sinais 2	PCB	442A102
7	Acessório de conexão entre os condicionadores de sinais e o sistema de aquisição de dados	National Instruments	BNC-2140
8	Microcomputador para controle e aquisição de dados/ Software 9155C	Hewlett-Packard/ National Instruments	Pavillion a250n/ PCI-4451

3.3 Deficiências detectadas no processo de calibração do LCC de Acelerômetros

Embora o software do sistema 9155C gerencie a aquisição dos dados de calibração de acelerômetros e possua funcionalidades relevantes como, por exemplo, a emissão de certificados de acordo com o que preconiza a norma NBR ISO/IEC 17025 (2005), ele não supre algumas carências que se fazem notar principalmente quando serviços são prestados a setores do IAE. Neste caso é essencial que haja um vínculo entre o processo de calibração e os testes a serem realizados. É imprescindível o gerenciamento não somente dos dados de calibração em si, mas também de algumas informações das atividades de teste e monitoramento de vibrações que são intrínsecas às atividades laboratoriais. As carências detectadas são:

- Falta de rastreabilidade de dados entre o processo de calibração do acelerômetro e a utilização deste em testes ou monitoramento de vibração, conforme ilustrada na Figura 23. A conexão entre os processos inexistente e dificulta o gerenciamento em calibrações futuras, pois a utilização do acelerômetro em um teste ou monitoramento de vibração abrevia o espaço de tempo que deve existir entre uma calibração e outra, uma vez que os acelerômetros devem ser calibrados periodicamente, no período máximo de um ano, de acordo com as recomendações definidas nos procedimentos internos;

- Necessidade de gerenciamento dos valores de sensibilidade obtidos durante os processos de calibração de um mesmo acelerômetro, que possibilite uma avaliação da variabilidade destes valores;
- Inexistência de gerenciamento do uso do acelerômetro em testes e monitoramento de vibração que possibilite a obtenção de um histórico e de informações sobre sua aplicabilidade;
- Inexistência de gerenciamento do local físico de armazenagem dos acelerômetros, o que reduziria sensivelmente o tempo de localização para uso;
- Necessidade de controle de dados dos condicionadores de sinal que são utilizados com os respectivos acelerômetros. Informações sobre suas características não são armazenadas pelo sistema 9155C, e a disponibilidade dos dados de localização física também contribui para tornar ágil o processo de preparação de teste de vibração;
- Embora a calibração de amplificadores não seja objeto deste trabalho, os dados a ela relacionados também são importantes para a rastreabilidade global do sistema de calibração. Durante um teste de vibração, por exemplo, resultados inconsistentes podem ser obtidos e algumas vezes isto ocorre devido à utilização de amplificadores não calibrados. É indispensável, portanto, um gerenciamento mínimo dos dados de calibração de amplificadores.

Com as dificuldades acima expostas, optou-se por desenvolver uma sistemática que pudesse ser modelada de acordo com as características e cultura próprias do LCC de Acelerômetros e ao mesmo tempo atendesse o que é preconizado pela norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) em termos de controle de dados principalmente.

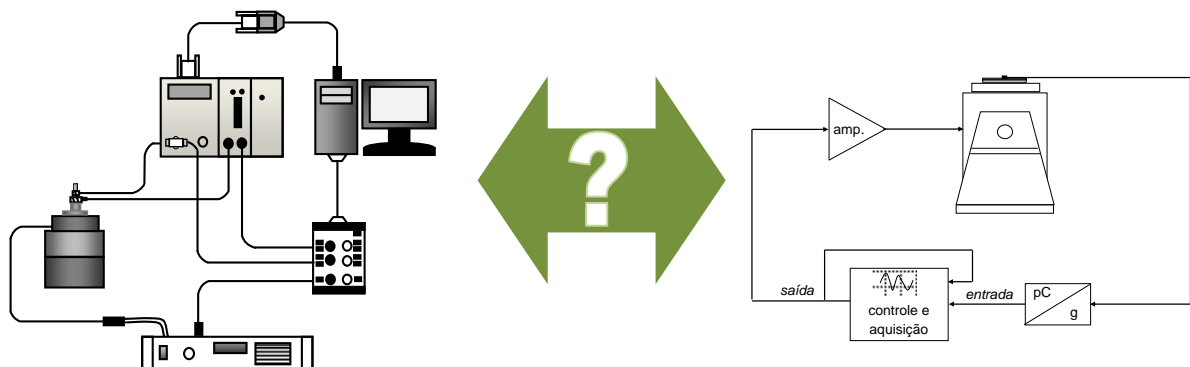


Figura 23 – Inexistência de conexão entre as atividades de calibração e teste.

3.4 Solução proposta para o gerenciamento de acelerômetros

A solução proposta consiste basicamente em implantar uma sistemática que preencha a lacuna informacional existente entre as atividades de calibração de acelerômetros e testes, e proporcione ao corpo técnico do LCC de Acelerômetros do COMAER o gerenciamento de centenas de acelerômetros. A Figura 24 ilustra o fluxo dos processos de calibração e teste com a implantação da sistemática proposta.

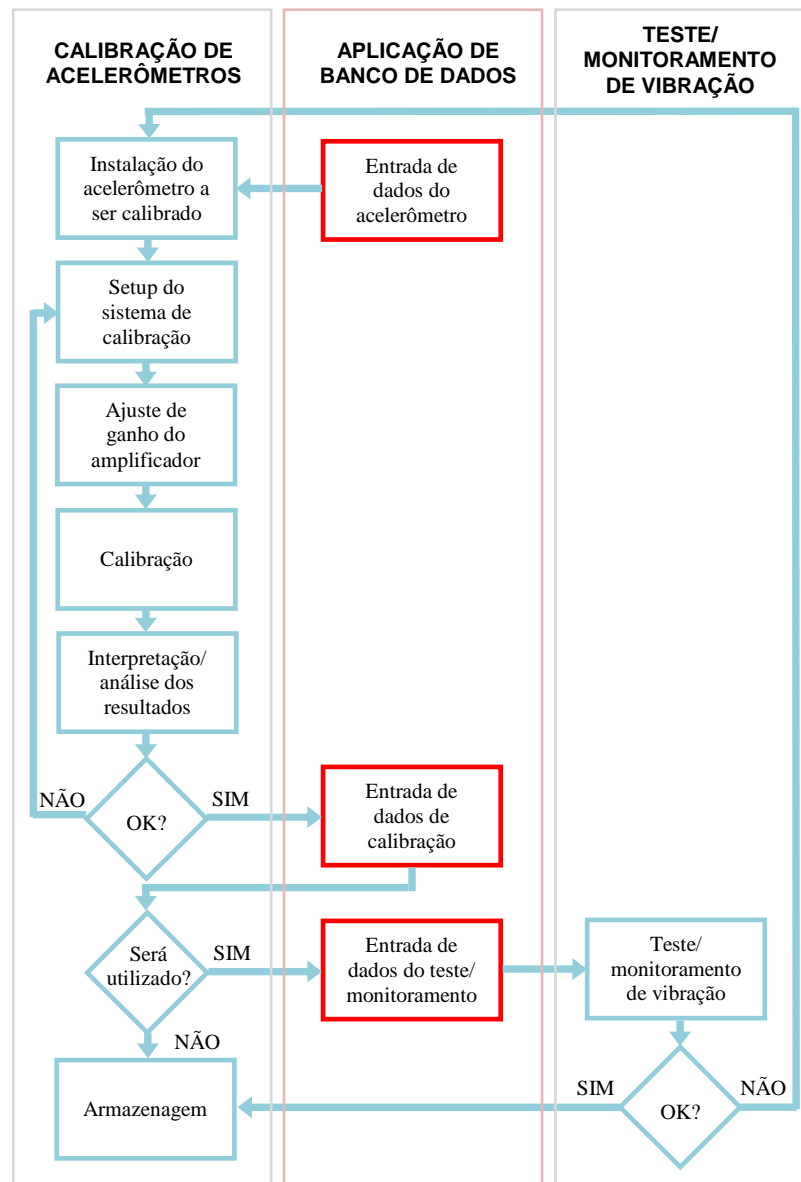


Figura 24 – Fluxo de processos com destaque para a implantação da sistemática proposta.

A implantação dessa sistemática, no entanto, exige algumas mudanças procedimentais por parte do corpo técnico laboratorial. E a existência de uma ferramenta computacional é essencial para que o objetivo primário da proposta, que é disponibilizar de forma ágil dados de interesse pertinentes ao acelerômetro, às calibrações e aos testes em que são envolvidos, seja cumprido. Esse repositório de informações permite a rastreabilidade e, conseqüentemente, um maior controle por parte do corpo laboratorial sobre a integridade física do transdutor, refletida posteriormente nos dados transmitidos durante o teste. Em um segundo momento essas informações armazenadas seriam correlacionadas, proporcionando o gerenciamento dos dados tanto da calibração do acelerômetro quanto de sua utilização em testes.

Informações básicas do plano de calibração concernentes ao acelerômetro e ao amplificador correspondente (quando for o caso) como, por exemplo, a descrição do item, seu número de série, modelo, localização e identificação individual unívoca são registrados, conforme recomenda a norma NBR ISO/IEC 17025 (2005, p.16). As datas da última e da próxima calibração (quando aplicável) assim como as informações fornecidas pelo sistema 9155C consideradas relevantes para a atividade de teste também devem ser gerenciadas.

Ao serem requisitados acelerômetros ao laboratório para realização de teste, informações documentais como descrição do teste, nome do responsável e identificação dos acelerômetros utilizados são registrados no banco de dados. Estabelece-se então um vínculo entre os dados de calibração do acelerômetro e do teste. Embasado neste gerenciamento, o corpo técnico laboratorial terá subsídios para administrar e programar as atividades relacionadas.

No que tange ao processo de desenvolvimento da aplicação, o fato desta ser projetada e implementada no âmbito laboratorial permitiu que fosse modelada de acordo com as necessidades e cultura locais a um custo irrisório. E embora haja aplicações comerciais que provêem soluções similares, elas geralmente possuem um custo elevado, principalmente quando solicitados incrementos em suas funcionalidades ou modificações dos módulos existentes. A representação de dados científicos é altamente dinâmica e requer mudanças estruturais constantemente na estrutura do banco de dados, como descreve Critchlow (2000). O custo de repetidas atualizações, necessárias em um ambiente dinâmico, torna-se proibitivo.

Pesquisas realizadas em publicações que tratavam sobre o desenvolvimento e utilização de sistemas proprietários para o gerenciamento de dados de monitoramento em áreas diversas como Acústica (SIKORSKA; KELLY; PAN, 2005), Hidrologia (CARLETON; DAHLGREN; TATE, 2005) e Química (KJELDEN; OLSEN; HEINEMEIER, 2010) confirmam a eficácia

do desenvolvimento de um sistema de banco de dados proprietário. No que tange ao gerenciamento de dados de calibração, Batagelj, Bojkovski e Drnovsek (2008) propõem uma solução integrada de dados direcionada a laboratórios de calibração primária. Trabalhos científicos recentes abordando especificamente o gerenciamento de dados de calibração secundária por meio de uma aplicação desenvolvida não foram encontrados.

Acrescenta-se ainda como elemento facilitador ao desenvolvimento proprietário de aplicações o fato de já existir uma infraestrutura de Rede de Comunicação de Dados (RCD) corporativa que suporte o modelo de arquitetura cliente-servidor ⁹, considerado o mais apropriado para o estudo de caso e ilustrado na Figura 25.

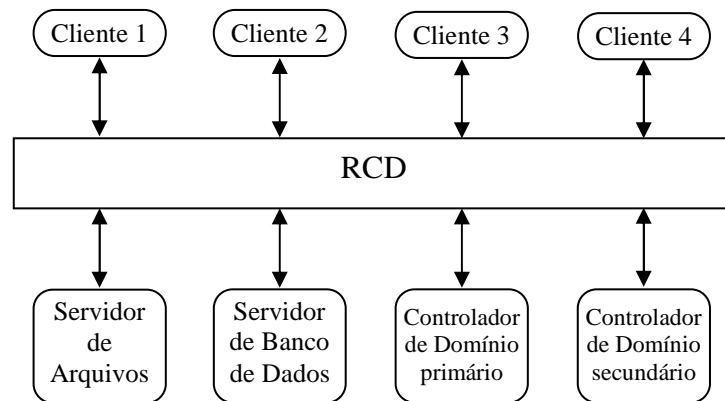


Figura 25 – Arquitetura cliente-servidor do sistema gerenciador de dados de acelerômetros.

De acordo com Sommerville (2007, p. 166), para que o modelo cliente-servidor seja implementado, uma RCD deve apresentar alguns requisitos, a saber: um conjunto de computadores servidores que ofereçam serviços para outros subsistemas (serviços de impressão, gerenciamento de arquivos e bancos de dados, por exemplo); um conjunto de clientes que solicitem os serviços oferecidos pelos servidores (a execução de um programa por vários clientes simultaneamente); e uma rede que permita aos clientes acessarem esses serviços.

Quanto à arquitetura da aplicação, esta é conectada a um banco de dados, processa as solicitações de informações provenientes de usuários, assim como atualiza as informações no banco de dados. As ações dos usuários não interferem na organização e a integridade das informações é garantida. Este tipo de aplicação é definido por Sommerville (2007, p. 195) como aplicação de processamento de transações.

⁹ De acordo com Sommerville (2007, p. 166), no modelo de arquitetura cliente-servidor a infraestrutura de uma RCD é organizada como um conjunto de serviços, servidores e clientes associados que acessam e usam os serviços.

4 METODOLOGIAS DE PESQUISA E DE DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são descritos os procedimentos metodológicos que caracterizam esta pesquisa e também o desenvolvimento da solução. No que concerne à pesquisa são apresentadas as etapas para a obtenção do modelo que determina as especificações para o desenvolvimento. Com relação à metodologia de desenvolvimento são descritos os procedimentos técnicos adotados no projeto, construção e implementação da solução.

4.1 Metodologia de pesquisa

Segundo Jung (2011), a pesquisa é utilizada como instrumento ou ferramenta para a descoberta de novos conhecimentos básicos ou aplicados. No que concerne à sua classificação, ela pode ser classificada de diferentes maneiras, conforme ilustrado na Figura 26. Deve-se optar por um tipo de pesquisa conhecendo-se a natureza, o objetivo, a abordagem e o procedimento necessário para a sua execução.

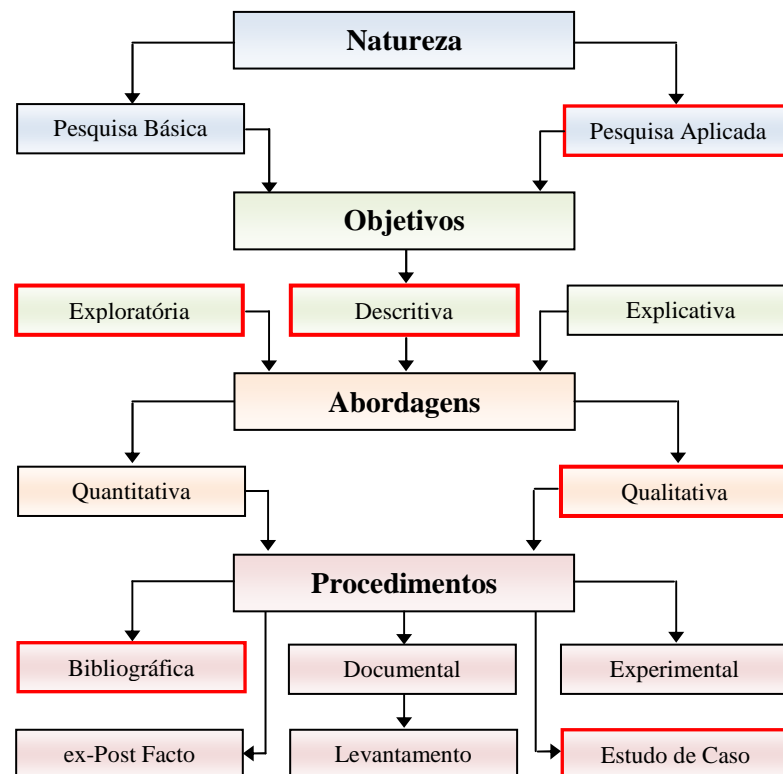


Figura 26 – Classificação dos tipos de pesquisa (adaptado de JUNG, 2011), com destaque àqueles aplicáveis a esta pesquisa.

4.1.1 Caracterização da pesquisa

Neste trabalho é adotado o modelo de pesquisa aplicada exploratório-descritiva, de caráter qualitativo, sendo empregados os procedimentos “estudo de caso” e “pesquisa bibliográfica” na proposta de uma sistemática para o gerenciamento de dados de calibração secundária de acelerômetros piezoelétricos.

De acordo com Jung (2011), a pesquisa baseada em sua natureza é classificada como aplicada quando o objetivo é gerar conhecimento com finalidade de aplicação. Dessa forma, o resultado a ser obtido é a solução concreta do problema estudado, que contribuirá para o desenvolvimento de novos produtos ou processos.

A pesquisa classificada quanto aos objetivos é denominada exploratória ao ter como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a inovação, assumindo, na maioria dos casos, a forma de pesquisa bibliográfica ou de estudo de caso (GIL, 2009, p.41). A pesquisa descritiva enumera as características de determinado fenômeno ou estabelece relações entre variáveis, sendo uma de suas características mais significativas a utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados, como, por exemplo, a observação sistemática.

A modalidade de pesquisa classificada quanto à abordagem é denominada qualitativa ao englobar questões norteadoras de interesse amplo, que se definem à medida que o estudo se desenvolve (GODOY, 1995). Envolve a obtenção de dados descritivos sobre processos interativos, por meio do contato direto do pesquisador com a situação em análise em busca da compreensão dos fenômenos.

O procedimento estudo de caso¹⁰ descreve um sistema técnico no âmbito particular ou coletivo e é considerada uma importante ferramenta para os pesquisadores que tem por finalidade entender “como” e “por que” funcionam os processos (JUNG, 2011). Finalmente, a pesquisa bibliográfica é caracterizada pelo desenvolvimento baseado em materiais já elaborados, como livros e publicações científicas periódicas, permitindo ao pesquisador a cobertura de uma gama de fenômenos mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente (GIL, 2009, p.44).

¹⁰ Tanto nas engenharias como na computação são necessários estudos anteriores para que se possa determinar como está funcionando o processo ou, como é o processo, para que posteriormente seja recomendado, desenvolvido e implantado um novo sistema ou técnica de otimização (JUNG, 2011).

4.1.2 Delimitação da pesquisa

De acordo com Gil (2009, p.29), as pesquisas, principalmente as acadêmicas, devem ser delimitadas a uma dimensão viável, pois o problema levantado em uma pesquisa tende a ser formulado em termos muito amplos. A delimitação do problema relaciona-se estreitamente com os recursos disponíveis para investigação e, no momento em que os limites exatos da pesquisa são estabelecidos, independentemente da análise teórica que oriente a investigação, a precisão e a clareza tornam-se obrigações do pesquisador (TRIVIÑOS, 1987).

Dessa forma, esta pesquisa está assim delimitada:

- a) Gerenciamento de dados de calibrações secundárias de acelerômetros piezoelétricos, realizadas no LCC de Acelerômetros do COMAER.
- b) Desenvolvimento de uma ferramenta computacional voltada ao gerenciamento dos dados de calibração secundária de acelerômetros e ao controle de utilização destes em testes dinâmicos.

4.2 Metodologia de desenvolvimento

O processo de desenvolvimento de software especificamente define a abordagem adotada quando um software é elaborado (PRESSMAN, 2010). Entre as atividades envolvidas no ciclo de vida de software descritas por Sommerville (2007, p. 44) e ilustradas na Figura 27, aborda-se aquelas consideradas mais relevantes neste trabalho: a especificação de requisitos junto ao cliente, a elaboração do projeto de software e a implementação do software.

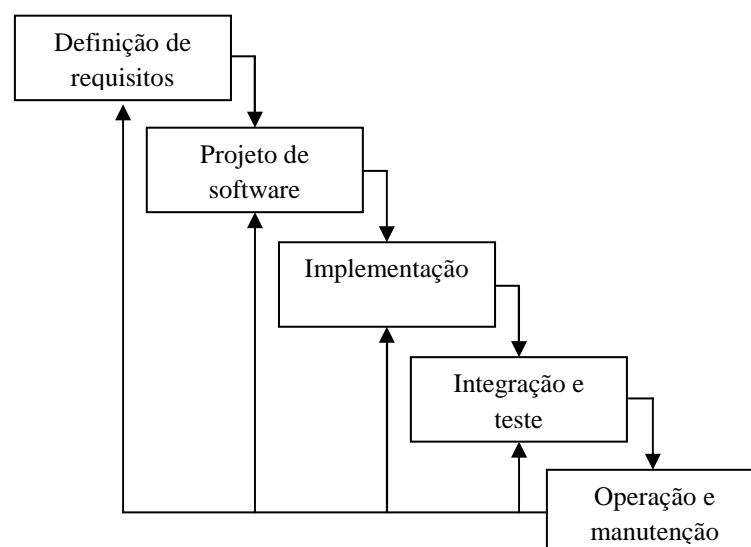


Figura 27 – Ciclo de vida de software (adaptado de SOMMERVILLE, 2007).

4.2.1 Especificação de requisitos

O desenvolvimento de software objetiva a criação de uma ferramenta computacional que supra as necessidades de usuários em suas tarefas. A correta especificação de requisitos do software, ou seja, das funcionalidades que ele deve apresentar, é fundamental para que haja satisfação por parte do cliente e sucesso no esforço de desenvolvimento empreendido pelo desenvolvedor.

O processo de Engenharia de Requisitos ¹¹ abrange uma etapa crucial no ciclo de vida do desenvolvimento de software por abordar não somente aspectos técnicos, mas também gerenciais, organizacionais, econômicos e sociais, já que se faz necessário estabelecer uma forma de linguagem comum, capaz de expressar os desejos dos clientes e usuários e, ao mesmo tempo, ser compreendida pelo desenvolvedor.

Para Davis (1993), durante o processo de especificação de requisitos, é preciso analisar o problema a ser resolvido. A análise do problema consiste em entender o que é imprescindível para o usuário e as limitações existentes na solução. Um projeto de software somente pode ser considerado bem sucedido quando houver consenso entre cliente e desenvolvedor no que tange à especificação de requisitos.

Uma forma de melhorar a compreensão dos requisitos é classificá-los em requisitos funcionais e não-funcionais. De acordo com Sommerville (2007, p.80) os requisitos funcionais descrevem: os serviços que o sistema deve fornecer; como o sistema deve responder a determinadas entradas; e o comportamento do sistema em determinadas situações. Por outro lado, os requisitos não-funcionais implicam nas restrições sobre serviços ou funções oferecidos pelo sistema, incluindo as limitações do produto software, as restrições sobre o processo de desenvolvimento e os padrões utilizados.

No que tange ao gerenciamento de acelerômetros nas atividades de calibração e testes, são requisitos funcionais:

- O software deve possibilitar ao usuário a visualização, inserção e alteração dos dados de cada acelerômetro localizado no laboratório;
- O usuário deve ter acesso tanto aos dados que caracterizam o acelerômetro (o modelo, por exemplo) quanto àqueles relacionados à sua calibração (valor de sensibilidade, por exemplo);

¹¹ De acordo com o Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, o processo de aquisição, refinamento e verificação das necessidades do cliente é chamado de engenharia de requisitos (IEEE, 1984).

- O usuário deve localizar rapidamente dados sobre determinado acelerômetro por meio da entrada de seu número de série ou parte dele;
- O sistema deve oferecer a opção de pesquisa avançada, possibilitando ao usuário o acesso às informações de forma ágil. As palavras-chaves devem ser digitadas nos campos correspondentes e o resultado é apresentado em uma lista, podendo ser indexada e impressa de acordo com a preferência do usuário;
- Em se tratando de um sistema para gerenciar dados de acelerômetros utilizados em teste e monitoramento de vibrações, algumas informações são relevantes (aplicabilidade do teste, por exemplo) e devem ser acessíveis ao usuário;
- O software deve possibilitar ao usuário a visualização, inserção e alteração dos dados de cada teste que envolva acelerômetros gerenciados pelo laboratório.

Os requisitos não-funcionais incluem:

- O acesso ao banco de dados do sistema deve ser restrito às pessoas autorizadas pela chefia do laboratório e que estejam envolvidas nas atividades do laboratório;
- O Sistema Gerenciador de Banco de Dados poderá ser o Microsoft SQL Server, MySQL ou o PostgreSQL;
- O sistema deverá ser executado na plataforma operacional Windows, da Microsoft;
- O tempo de resposta do software não poderá ultrapassar 5 segundos;
- O sistema deverá atender às necessidades dos usuários no que tange ao gerenciamento de dados de acelerômetros respeitando o que preconiza a norma NBR ISO/IEC 17025 (2005).
- A operação do sistema pelo usuário demandará um computador com no mínimo 256 Mb de RAM, com processador de 1.5 Ghz ou superior.

4.2.2 Projeto de software

De acordo com Sommerville (2007, p. 158), o projeto de software consiste essencialmente na tomada de decisões sobre a organização lógica do software. Essa organização lógica pode ser representada pela Linguagem Unificada de Modelagem (UML), uma linguagem gráfica que proporciona visualização, especificação, construção e documentação de artefatos de software, e auxilia na elaboração da estrutura de projetos de software (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000).

Assim como o projeto de software, o projeto de banco de dados também é relevante no contexto deste trabalho pelo fato de o software desenvolvido estar integrado a uma base de dados. O desenvolvimento de uma estrutura lógica de banco de dados adequada e coerente com projeto de software e, conseqüentemente, com os requisitos especificados é essencial para que o produto software funcione de forma consistente. De acordo com Date (2000, p. 381), a modelagem de banco de dados fornece uma base para um ataque sistemático ao problema de projeto de banco de dados.

4.2.2.1 Modelagem do software

Os requisitos funcionais especificados na etapa anterior podem ser expressos nesta fase de projeto de software como casos de uso ¹². Os diagramas de casos de uso da UML são essenciais para o gerenciamento dos requisitos especificados e possibilitam ao usuário a visualização do comportamento **estático** do sistema ou subsistema e o entendimento de suas funcionalidades, permitindo, dessa forma, a implementação pelo desenvolvedor. A Figura 28 ilustra o diagrama de casos de uso relacionados ao gerenciamento de dados de calibração de acelerômetros.

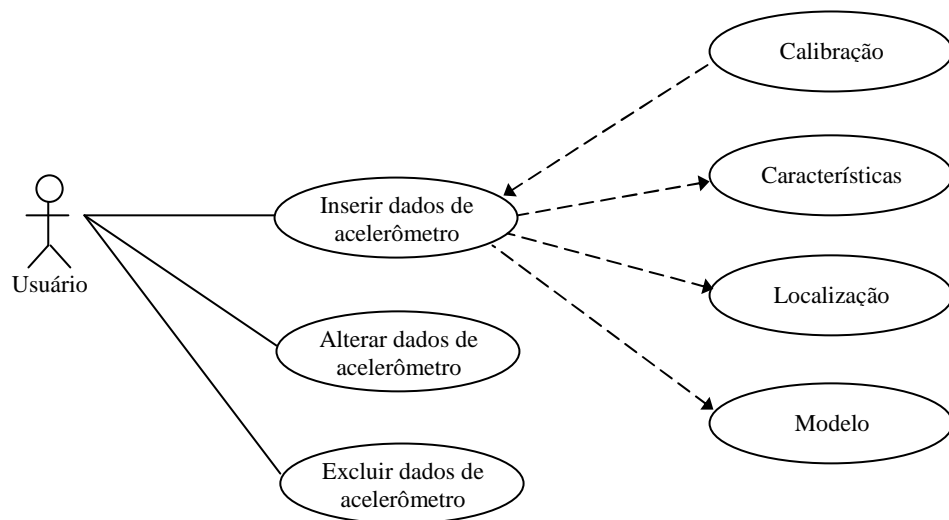


Figura 28 – Diagrama de casos de uso de gerenciamento de acelerômetros.

¹² Caso de uso é a descrição de um conjunto de seqüência de ações realizadas pela aplicação que proporciona resultados observáveis de valor (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000, p. 19).

No que tange à clareza e definição do projeto de software ao cliente principalmente, tão importante quanto o diagrama de caso de uso é o diagrama de atividades. Este consiste essencialmente de um fluxograma que enfatiza a atividade que ocorre ao decorrer do tempo. É empregado para fazer a modelagem de aspectos **dinâmicos** do sistema, mostrando o fluxo de controle de uma atividade para outra (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000, p.257). A Figura 29 ilustra um diagrama de atividades relacionado à inserção de dados de calibração de acelerômetros.

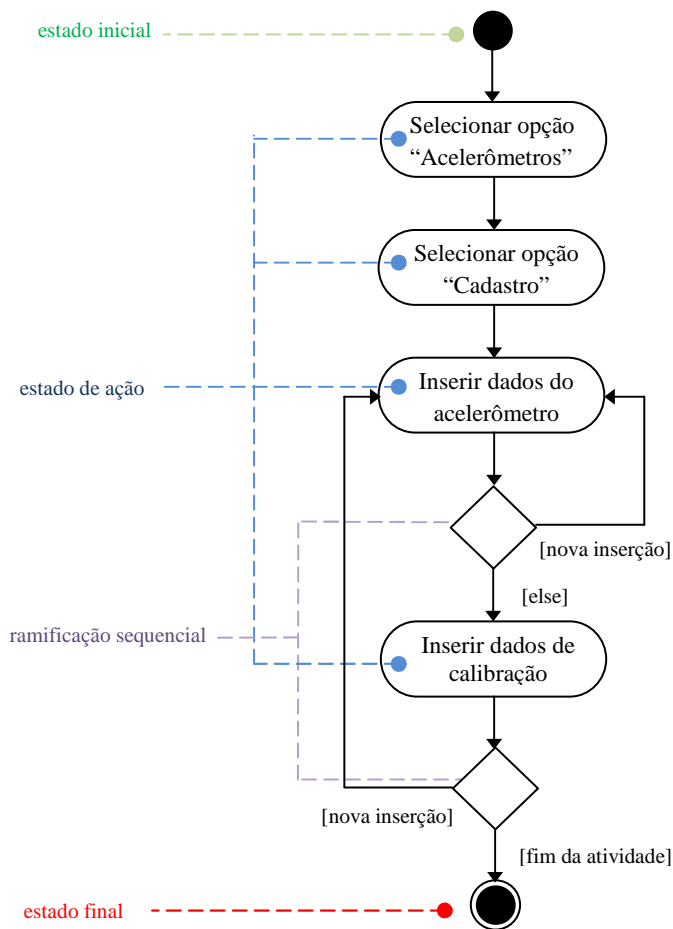


Figura 29 – Diagrama de atividades do módulo de inserção de acelerômetros.

4.2.2.2 Modelagem de dados

Date (2000, p.4) define banco de dados como um repositório de arquivos de dados computadorizados, onde os usuários da aplicação podem executar diversas operações sobre estes arquivos, como inserção, pesquisa, alteração e eliminação de dados. Estes arquivos computadorizados são comumente denominados tabelas. As linhas de uma tabela podem ser consideradas registros do arquivo e as colunas podem ser vistas como os campos desses

registros. A Figura 30 ilustra a tabela Acelerômetros com alguns campos definidos e vários registros inseridos.

O diagrama mostra uma tabela com o seguinte conteúdo:

AccID	AccSN	AccDesc	LastSensVal	...
1	58828	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,898	...
2	58830	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,851	...
3	58831	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,822	...
4	58832	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,822	...
5	58833	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,814	...
6	58834	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,766	...
7	58835	Acelerômetro de Vibração Estrutural	1,739	...
...

Setas indicam que 'campos' apontam para as colunas e 'registros' apontam para as linhas da tabela.

Figura 30 – Campos e registros da tabela Acelerômetros.

A modelagem de dados consiste na aplicação de técnicas que objetivam descrever os dados, como os dados são agrupados em tabelas e como estas tabelas se relacionam, umas as outras. Entre as várias técnicas de modelagem de dados existentes, optou-se pela adoção de diagramas entidade¹³/ relacionamento¹⁴ (modelo ER) no desenvolvimento do banco de dados da aplicação. Este esquema de banco de dados estabelece algumas regras de consistência, como, por exemplo, a unicidade de tabelas e registros.

Embora os conceitos de tabela e entidade sejam similares, eles não devem ser confundidos. De acordo com McLeod e Schell (2007, p. 136) as tabelas são o resultado da divisão de entidades em unidades menores que estejam em conformidade com as regras definidas para a estrutura de banco de dados. Uma entidade pode se transformar em uma tabela, no entanto, na maioria das vezes, a entidade é dividida em várias tabelas.

A base de dados do sistema foi definida por meio de dezoito tabelas, obedecendo à relação 1: n (um para muitos). Nos relacionamentos onde a integridade referencial foi imposta, a garantia de consistência no banco de dados foi estabelecida, evitando a

¹³ Date (2000, p. 10) define entidade como um termo comumente usado no meio de banco de dados para indicar qualquer objeto distinguível que deva ser representado no banco de dados.

¹⁴ Chen (1976 apud DATE, 2000, p. 370) define um relacionamento como “uma associação entre entidades”.

possibilidade de operações de exclusão ou alteração de registros, realizadas de forma acidental. Por exemplo, caso o usuário tenha permissão de exclusão e tente excluir um registro de uma tabela e este esteja relacionado a outro registro de outra tabela, o sistema emitirá uma mensagem de erro, impedindo a ação. Algumas tabelas e os respectivos relacionamentos são ilustrados esquematicamente na Figura 31.

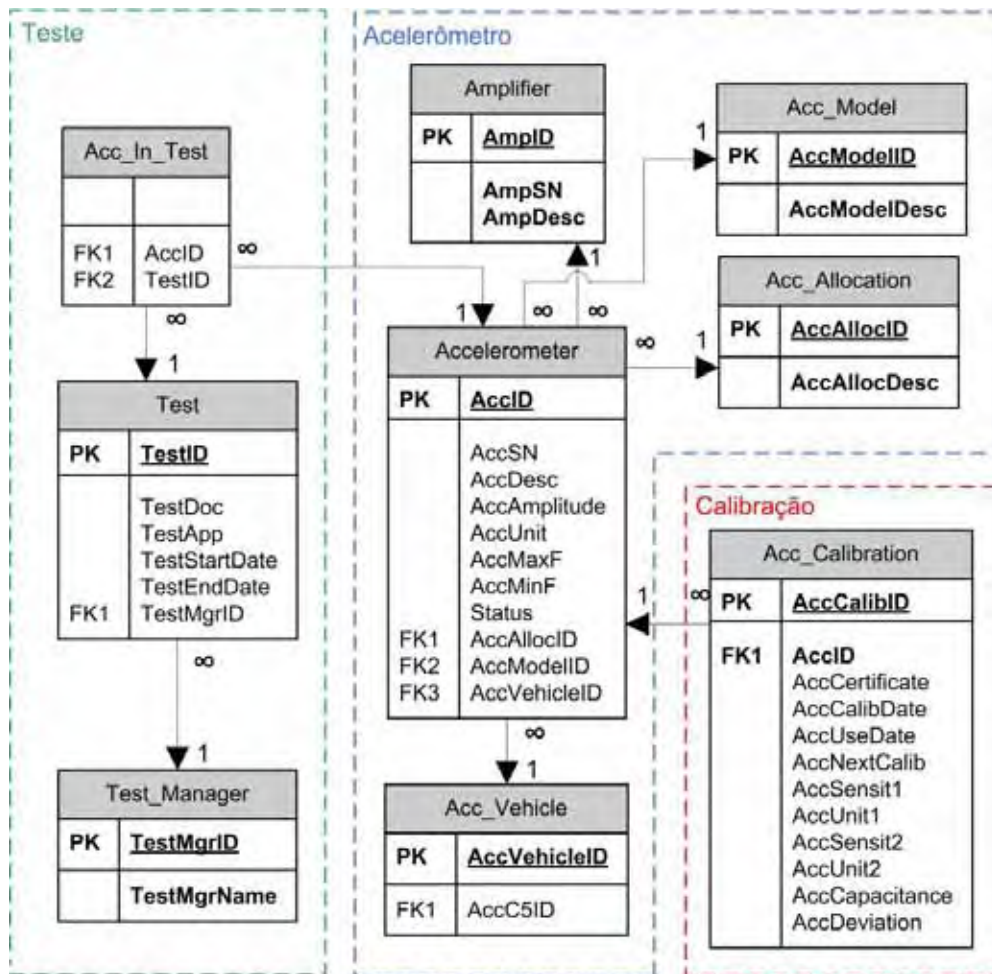


Figura 31 – Esquema do banco de dados do sistema com as principais tabelas e relacionamentos.

4.2.3 Implementação do sistema

Nesta etapa do desenvolvimento, o projeto de software é implementado como um conjunto de unidades de uma determinada linguagem de programação de computadores, onde o desenvolvedor baseia-se totalmente na disponibilidade de ferramentas e/ou ambientes de apoio à programação (VASCONCELOS et al., 2006, p. 64). Há inúmeras técnicas de implementação de software entre as quais se destacam: programação básica em linguagens (como Java e Delphi, por exemplo), programação de banco de dados, geração de programas a partir de ferramentas de engenharia de software auxiliada por computador (CASE)¹⁵ e engenharia de software baseada em reuso.

Os métodos empregados especificamente no desenvolvimento do sistema em estudo são o Desenvolvimento Rápido de Software (RAD) utilizando a linguagem Delphi e a programação de banco de dados utilizando a linguagem SQL.

4.2.3.1 Desenvolvimento rápido de software utilizando o Delphi

Os processos do método RAD objetivam criar software útil com agilidade. Geralmente são processos iterativos nos quais as fases de especificação de requisitos, de projeto e de desenvolvimento de software se intercalam. Neste método o software é desenvolvido em uma série de incrementos, e cada incremento apresenta uma nova funcionalidade da aplicação (SOMMERVILLE, 2007, p. 260).

A interface da aplicação foi desenvolvida em linguagem Delphi, da Borland, em sua sétima versão. Esta ferramenta pertence ao grupo de ferramentas para desenvolvimento rápido de aplicativos, que simplificam o desenho de telas para permitir que o desenvolvedor se atenha mais à análise, projeto e codificação do sistema. Dessa forma, operações essenciais que compõem o processo de desenvolvimento, como a habilitação da conexão entre software e banco de dados, por exemplo, são realizadas de forma mais rápida. A Figura 32 ilustra o ambiente integrado de desenvolvimento (IDE – Integrated Development Environment) do Delphi 7.

¹⁵ A Engenharia de Software Auxiliada por Computador (CASE – Computer-Aided Software Engineering) é o nome empregado à ferramenta computacional utilizada no apoio às atividades que compõem o processo de desenvolvimento de software, como engenharia de requisitos, projeto e desenvolvimento. Incluem, portanto, editores de diagramas, dicionários de dados, compiladores, ferramentas de construção de sistemas, etc. (SOMMERVILLE, 2007, p. 56).

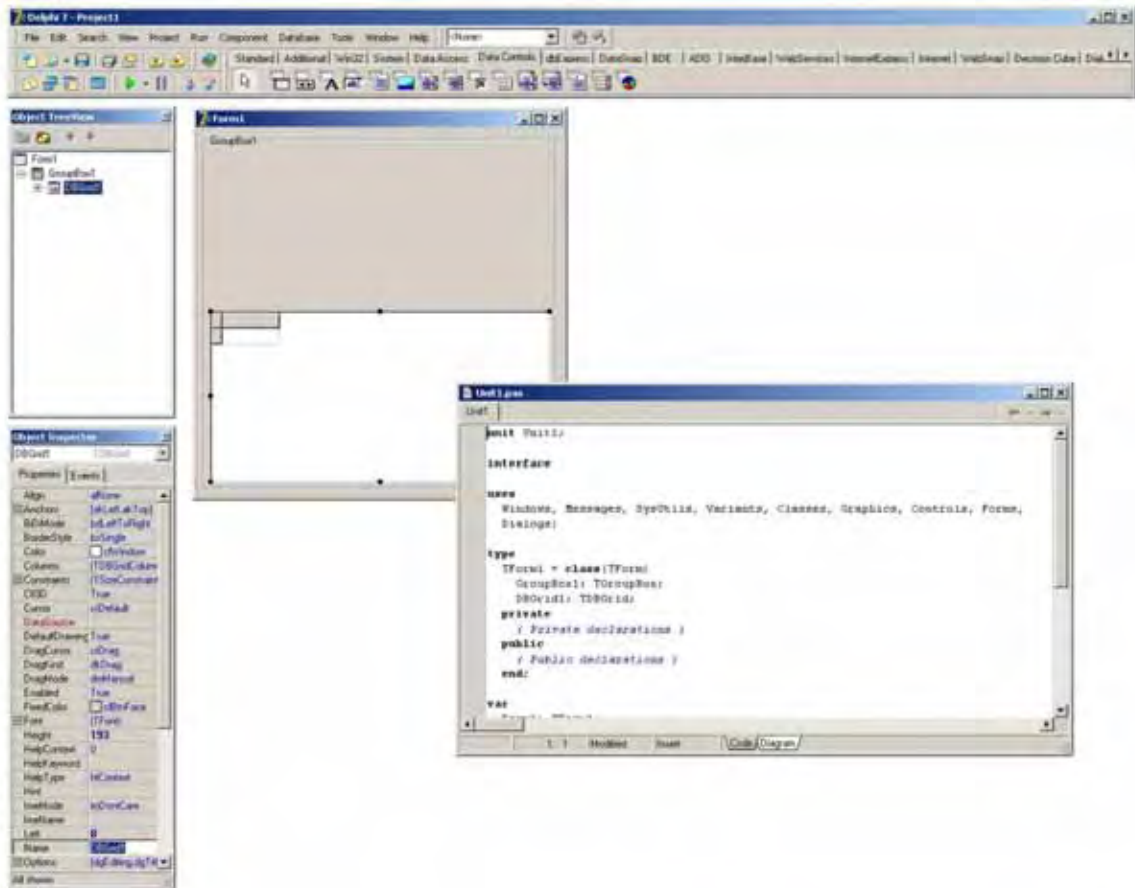


Figura 32 – Ambiente integrado de desenvolvimento do Delphi 7.

A conexão lógica entre software e banco de dados é realizada por meio de componentes do Delphi que utilizam a tecnologia ActiveX Data Objects (ADO), da Microsoft. Essa tecnologia permite ao desenvolvedor criar sistemas de acesso a banco de dados de forma rápida, além de contribuir para um baixo tráfego de dados na RCD e um melhor desempenho da aplicação.

4.2.3.2 Programação de banco de dados utilizando SQL

De acordo com Date (2000, p. 7), entre o banco de dados físico (onde os dados estão armazenados) e os usuários do sistema há uma camada de software conhecida como Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD). Dessa forma, solicitações de acesso ao banco de dados são tratadas pelo SGBD e operações como inclusão, remoção, busca e atualização de dados de tabelas e registros são recursos fornecidos pelo SGBD. A Figura 33 ilustra a interface de administração do SGBD SQL Server.

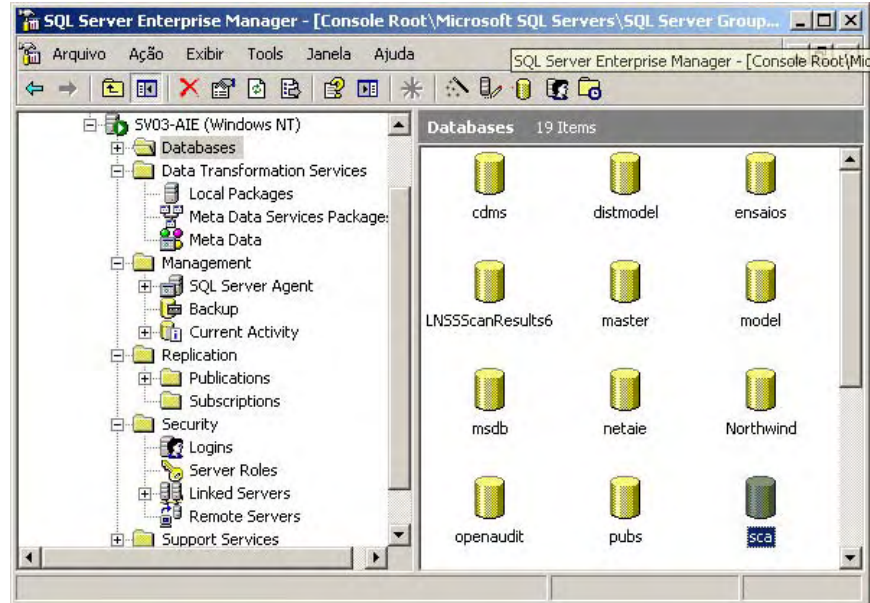


Figura 33 – Interface de administração do SGBD SQL Server.

O SQL Server é um SGBD desenvolvido e comercializado pela Microsoft e é utilizado atualmente pelo IAE por possuir características como:

- Integridade de dados: uma das tarefas de um SGBD é identificar dados inconsistentes e rejeitar seu armazenamento em um banco de dados;
- Controle concorrente: um SGBD é um software multiusuário, ou seja, muitas aplicações de usuário podem acessar um mesmo banco de dados simultaneamente;
- Segurança e autorização: significa que os dados armazenados em um banco de dados são protegidos contra acesso não autorizado e também contra uso indevido por parte dos usuários.

4.2.3.3 Implementação de recursos de segurança para acesso ao banco de dados

Em termos de segurança do banco de dados fez-se necessária a implantação de algumas restrições de acesso a informações relacionadas à calibração do acelerômetro. O acesso é permitido a um determinado número de usuários para que os efeitos de possíveis erros na entrada ou atualização de dados, por exemplo, sejam minimizados. As funcionalidades que envolvem aspectos de segurança como autenticação, políticas de autorização e controle de transações não são gerenciadas pela aplicação desenvolvida, mas pelo SGBD integrado ao serviço de diretório configurado no computador controlador do domínio.

Spealman, Hudson e Craft (2006) descrevem o diretório como um repositório de informações relacionadas a objetos. Um objeto é um conjunto distinto de atributos que representam um recurso da rede de comunicação de dados. Em um sistema computacional distribuído ou em uma rede de computadores há muitos objetos armazenados em um diretório, como, por exemplo, servidores de arquivos, aplicações, bancos de dados e usuários. Administradores de rede devem estar aptos a gerenciar a utilização destes objetos.

O Active Directory (AD) é o serviço de diretório nativo no sistema operacional Windows Server 2003 e apresenta as seguintes características:

- Segurança integrada ao sistema operacional, onde o controle de acesso pode ser definido por cada objeto do diretório;
- Compatibilidade com Lightweight Directory Access Protocol (LDAP), um protocolo padrão que possibilita o acesso a diretórios em uma rede de comunicação de dados;
- Validação e encriptação de todo o tráfego LDAP, garantindo que a origem dos dados empacotados seja conhecida e que os dados não sejam violados.

O núcleo da estrutura lógica do AD é denominado domínio, o qual pode armazenar milhares de objetos considerados essenciais em uma RCD. O controlador de domínio é o computador que armazena uma réplica do diretório de domínio e gerencia aspectos da interação entre usuário e domínio, como, por exemplo, a validação de tentativas de autenticação de usuários no sistema.

A segurança do SQL Server é baseada em dois modos de autorização. A permissão de acesso aos dados é concedida pelo controlador de domínio ou pelo subsistema de segurança próprio do SGBD. No acesso à aplicação a autorização é concedida pelo controlador de domínio. Neste caso, a integração entre o SGBD SQL Server e o Serviço de Diretório AD dispensa o operador do sistema de realizar uma nova autenticação para obter acesso à ferramenta.

O serviço de autenticação é realizado apenas pelo sistema operacional junto ao controlador de domínio, ou seja, o usuário deve obrigatoriamente ter uma conta válida no domínio para obter acesso ao sistema. Quando o aplicativo é executado, o SGBD procura pela conta de usuário do domínio em sua lista de contas de acesso. Se a conta existir, o identificador de acesso ao banco de dados passa a ser a conta de usuário com a qual ele efetuou acesso ao sistema operacional. O SGBD não verifica uma senha correspondente porque o controlador de domínio já o fez. Caso a conta não exista no SGBD, o acesso ao

banco de dados é negado. A principal vantagem deste modo de autorização é a utilização de apenas uma conta de usuário com a respectiva senha para acessar tanto o sistema operacional quanto o banco de dados. A Figura 34 ilustra esquematicamente o fluxo de processos de acesso a aplicação desenvolvida, com o controle de acesso aos dados constituído pela integração entre os recursos da RCD.

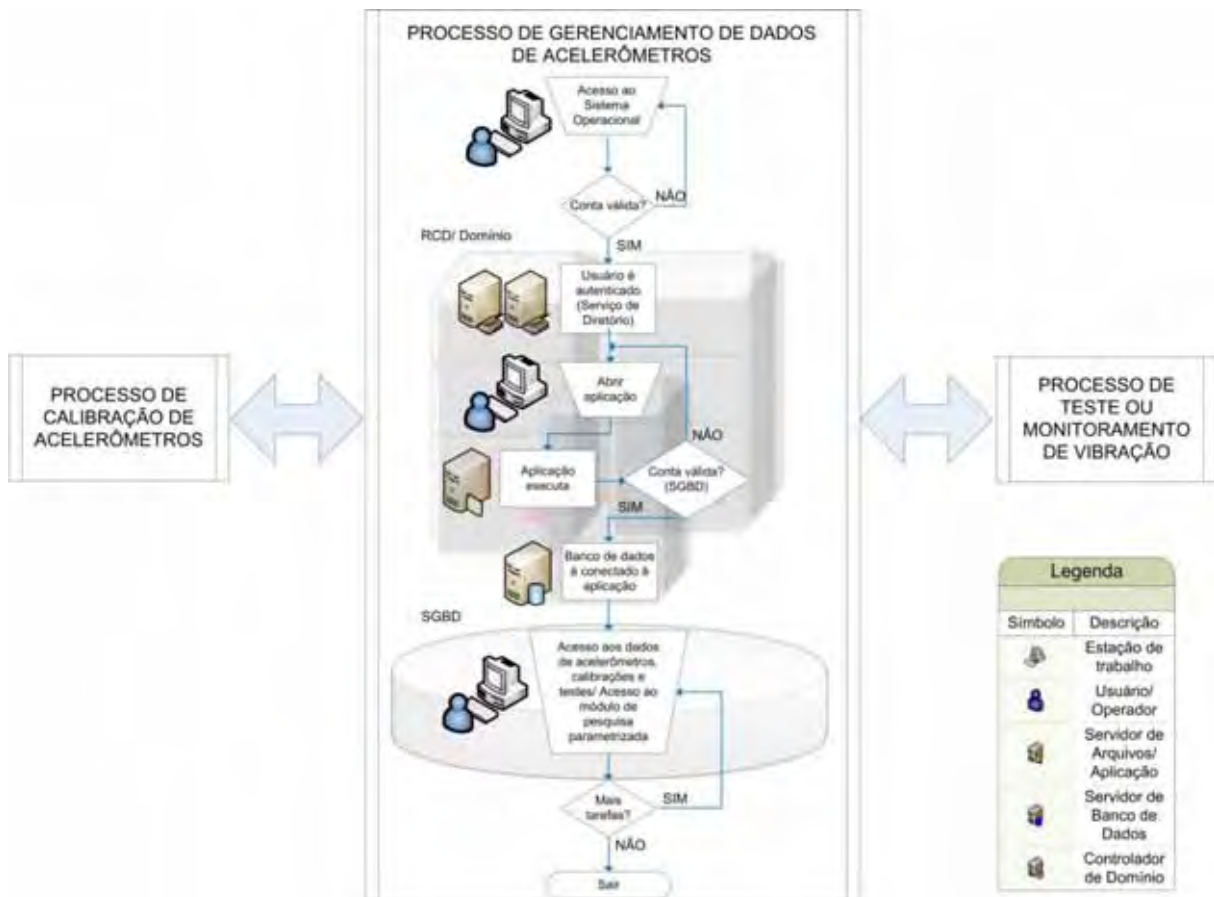


Figura 34 – Ilustração do fluxo de processos do gerenciamento de dados de acelerômetros.

As permissões relacionadas aos dados que o usuário poderá visualizar e manipular são definidas pelo administrador do SGBD. Há três estados possíveis para as permissões: concedida (ou positiva), negada (ou negativa) e nenhuma (PETKOVIC, 2002, p.335).

Um usuário de banco de dados só pode executar atividades a ele concedidas. Neste caso, há uma entrada correspondente na tabela de sistema *sysprotects* do SGBD. A entrada negativa na mesma tabela impede que os usuários executem tais atividades. No último caso (nenhuma), o usuário não tem privilégios explícitos, mas pode executar uma atividade se um papel ao qual pertence tem a permissão apropriada.

No exemplo da Figura 35, o usuário de domínio “AIE0-IAE/fabio” possui permissão para visualização, inserção, edição e deleção dos dados constantes na tabela enquanto os demais usuários públicos poderão somente visualizar os dados.

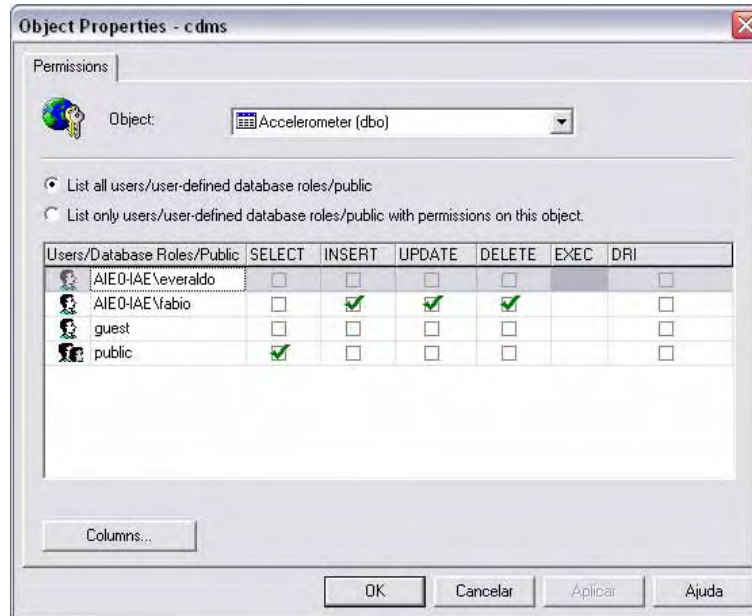


Figura 35 – Configuração de controle de acesso aos registros e tabelas do SGBD.

Opcionalmente, a segurança de acesso aos dados poderia também ser implementada na própria aplicação, o que permitiria ao usuário administrador do sistema definir a acessibilidade de cada operador no código fonte da aplicação. Porém, por já haver uma infraestrutura de RCD que permite o gerenciamento de acesso aos dados pela conta de usuário, optou-se por utilizá-la. Neste caso, para haver controle sobre as ações do usuário, o administrador do SGBD deve receber a autorização do representante do LCC de Acelerômetros por meio de documento contendo as tabelas do banco de dados do sistema e os respectivos níveis de acessibilidade dos usuários.

5 RESULTADOS DA PESQUISA

Neste capítulo são apresentados como resultados da pesquisa: as funcionalidades do sistema desenvolvido que auxiliam o corpo laboratorial do LCC de Acelerômetros do COMAER no controle de dados dos acelerômetros no que tange à calibração e testes; e os requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) atendidos pelo laboratório por meio da implementação da aplicação, que podem contribuir para a acreditação do laboratório junto ao INMETRO.

5.1 Apresentação da aplicação

As opções de controle do sistema são separadas em pastas denominadas *Acelerômetros*, *Pesquisa* e *Testes*, e incluem os dados descritivos do acelerômetro, informações sobre sua localização tanto no laboratório quanto na estrutura que será submetida ao teste ou monitoramento de vibração, dados de calibração secundária, dados descritivos do respectivo condicionador de sinais com seus registros de calibração e o controle sobre o emprego dos acelerômetros em testes.

A pasta utilizada para o cadastro de informações dos acelerômetros, ilustrada na Figura 36, é acessada por meio da aba *Acelerômetros*. Nesta aba, a opção *Cadastro* no quadro *Opções* permite ao usuário cadastrar ou editar informações do acelerômetro enquanto que a opção *Procura por número de série* permite uma consulta rápida aos dados de um determinado acelerômetro por meio de seu número de série selecionado. Estas informações são visualizadas no quadro inferior e referem-se tanto à identificação do acelerômetro quanto às suas características de medição.

Os acelerômetros são armazenados em armários específicos dentro das instalações do laboratório e as informações sobre sua localização física podem ser visualizadas na aplicação. A interface desta apresenta um componente denominado caixa de combinação que permite ao usuário selecionar o número de série do amplificador correspondente que deverá ser utilizado na atividade de calibração. Abaixo da caixa de combinação há um quadro contendo cinco códigos que, em sequência, formam um identificador único de localização do transdutor no veículo VLS-1. O status do acelerômetro informa se este está sendo utilizado em um determinado teste.

O cadastro do processo de calibração do acelerômetro é complementado por meio do quadro *Dados de calibração de acelerômetros*, que na sequência inclui o número do

certificado de calibração, a data da calibração, a data a partir da qual o acelerômetro passou a ser utilizado após a calibração, o valor da sensibilidade para uma frequência fixa, em unidades de pC/g e mV/g, o valor da capacitância, em unidades de pF, o desvio¹⁶ máximo da curva de sensibilidade relativa e o valor da sensibilidade para uma frequência fixa, em unidades de pC/ms⁻² e mV/ms⁻². O histórico das calibrações efetuadas com o transdutor é registrado neste quadro, que inclui ainda a data prevista para a próxima calibração para uma periodicidade de calibração de doze meses após a data de utilização do acelerômetro e a variação percentual da sensibilidade em relação à última calibração realizada.

As informações relacionadas ao amplificador correspondente encontram-se no quadro inferior da tela, incluindo número de série, descrição, modelo e localização física de armazenagem. Podem ser visualizados os dados referentes à calibração do amplificador que incluem data de calibração, data de utilização, ajuste de sensibilidade e unidade de grandeza. O quadro localizado na extremidade inferior da tela informa o usuário autenticado no sistema operacional.

Figura 36 – Módulo da aplicação para o controle de dados de acelerômetros.

¹⁶ Desvio é a variação entre o nível de vibração medido e o nível de vibração real aplicada à base do acelerômetro (SERRIDGE; LICHT, 1987).

A opção de pesquisa disponível na aplicação é acessada por meio da pasta *Pesquisa*. No quadro de procura, o usuário pode realizar uma pesquisa parametrizada de informações relacionadas tanto aos acelerômetros quanto aos amplificadores. Caso os primeiros sejam selecionados, será exibido um conjunto de indexadores que permitirão ao usuário efetuar uma pesquisa na base de dados por meio dos seguintes critérios de seleção: número de série, descrição, modelo, localização dentro de um armário específico para alojar acelerômetros, identificação do transdutor no veículo, existência ou não de amplificador e a data limite para a próxima calibração. Ao escolher um indexador e clicar no botão *Pesquisa*, o sistema fornecerá ao usuário uma relação dos acelerômetros classificada segundo o indexador selecionado para a pesquisa. Como exemplo, a Figura 37 ilustra a relação de 85 acelerômetros de vibração estrutural selecionado por meio do indexador modelo 4517-W-004 e ordenado pelo número de série, podendo ainda ser impressa por meio do botão *Imprimir* contido no quadro inferior. Há a opção de impressão resumida, onde são listados dados dos acelerômetros com os respectivos amplificadores e o modo de impressão detalhada, onde os dados de calibração correspondentes também são impressos. Uma nova pesquisa pode ser realizada por meio do botão *Limpar*. Caso o usuário opte pela pesquisa por amplificador, ele poderá adotar os seguintes critérios de seleção: número de série do amplificador, descrição, modelo e localização dentro de um armário específico para alojar amplificadores.

Sistema Gerenciador de Dados de Calibração de Acelerômetros

Acelerômetros Pesquisa Testes

Pesquisa por: Acelerômetro Amplificador

Parâmetros de pesquisa:

Número de Série: Descrição: Modelo: 4517-W-004 Local:

Identificação do acelerômetro no veículo:

ST: OMC: Tipo: Módulo:

Com amplificador: Sim Não

Data limite:

Resultado da pesquisa

Ordenar por: Série

Série	Descrição	Modelo	Amplif	Unid	PMN	PMN2	C1	C2	C3	C4	C5	Local
50716	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				400 A
50725	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				405 B17
50726	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				404 B17
50727	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	50 g	S	1200 T	1	V	CT				402 B17
50731	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	50 g	S	1200 T	1	V	CT				401 B17
50734	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				403 B17
50735	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				402 B17
50739	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	60 g	S	1200 T	1	V	CT				401 B17
50739	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	20 g	S	1200 T	1	V	BE				408 B17
50744	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	20 g	S	1200 T	1	V	BE				407 B17
50745	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	20 g	S	1200 T	1	V	BE				405 B17
50745	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	20 g	S	1200 T	1	V	BE				404 B17

Registros encontrados: 85

Imprimir: Resumido Detalhado (Dados de calibração)

Usuário: fulano

Figura 37 – Módulo da aplicação para a pesquisa por dados de acelerômetros.

A pasta denominada *Testes* permite ao usuário do sistema gerenciar a retirada de acelerômetros do estoque para uso em teste ou monitoramento de vibração, conforme indicado na Figura 38. Nesta opção de controle, o quadro *Dados de teste* deve ser preenchido com o nome do solicitante, o número do documento, o nome do teste, a data de início e a data de conclusão do teste. A tabela (grid) contida no quadro *Acelerômetros utilizados no teste* é preenchida por meio do botão *Acelerômetros*. Todas estas informações podem ser impressas por meio do botão *Imprimir*.

The screenshot shows the 'Sistema Gerenciador de Dados de Calibração de Acelerômetros' interface. The 'Testes' tab is selected. The 'Dados de Teste' section contains the following fields:

- Código:** 1
- Responsável:** Gerente de Banco
- Documento:** ZE 033A54-LQ10
- Aplicação:** Experimental Modal Analysis of VABT Actual
- Data de início:** 7/6/2010
- Data final:** 30/6/2010

Navigation buttons include: Novo, Confirmar, Cancelar, Excluir, Primeiro, Anterior, Próximo, Último, and Imprimir.

The 'Acelerômetros utilizados no teste' table is as follows:

Índice	Sensibilidade (1)	Unidade (1)	Sensibilidade (2)	Unidade (2)	Capacidade (µF)	Densidade (%)	Préc. Calibração
00020	1,843 µC/g		0,167 µC/cm ²		730	4	
00030	1,851 µC/g		0,168 µC/cm ²		730	3	
00021	1,822 µC/g		0,165 µC/cm ²		730	3	
00032	1,822 µC/g		0,165 µC/cm ²		730	3	
00033	1,814 µC/g		0,165 µC/cm ²		730	3	
00034	1,786 µC/g		0,159 µC/cm ²		730	3	
00035	1,738 µC/g		0,177 µC/cm ²		730	3	
00036	1,815 µC/g		0,165 µC/cm ²		730	4	
00021	1,817 µC/g		0,165 µC/cm ²		730	3	
00022	1,73 µC/g		0,178 µC/cm ²		730	3	
00023	1,75 µC/g		0,178 µC/cm ²		730	3	
00024	1,771 µC/g		0,18 µC/cm ²		730	3	
00025	1,789 µC/g		0,182 µC/cm ²		730	3	
00022	1,783 µC/g		0,181 µC/cm ²		730	3	
00033	1,803 µC/g		0,184 µC/cm ²		730	2	
00034	1,783 µC/g		0,178 µC/cm ²		730	3	
00035	1,715 µC/g		0,174 µC/cm ²		730	2	
00036	1,836 µC/g		0,187 µC/cm ²		730	3	
00038	1,806 µC/g		0,184 µC/cm ²		730	3	

Figura 38 – Módulo do sistema para gerenciamento de acelerômetros utilizados em teste.

Ao ser clicado o botão *Acelerômetros*, uma janela é aberta e toda a base de dados dos acelerômetros é disponibilizada ao usuário. A seleção dos acelerômetros é obtida por meio do campo *Utilizado*, localizado no quadro *Acelerômetros disponíveis para o teste* e confirmada pelo botão *Incluir no teste*. Ao ser confirmada a seleção de um determinado acelerômetro, a tabela *Acelerômetros utilizados no momento* é atualizada. O cancelamento de acelerômetros incluídos nesta tabela, quando necessário, é realizado pelo botão *Retirar do teste*. Como exemplo, a Figura 39 ilustra uma seleção de 2 acelerômetros para o teste solicitado, restando um total de 183 acelerômetros no estoque.

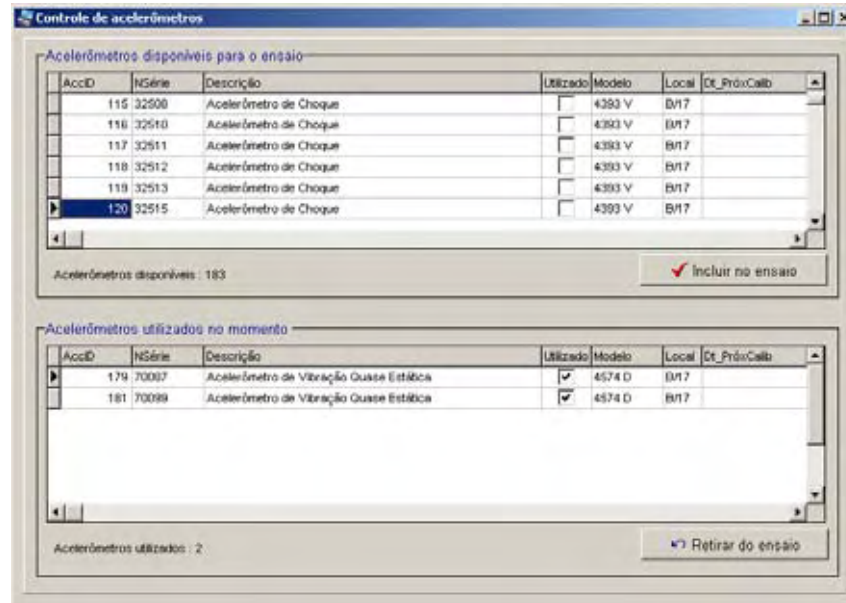


Figura 39 – Módulo da aplicação que permite a seleção de acelerômetros a serem utilizados em testes.

5.2 Itens da norma NBR ISO/IEC17025 atendidos pela aplicação

A norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) especifica os requisitos gerais para a competência em realizar testes e/ou calibrações utilizando métodos normalizados, métodos não normalizados e métodos desenvolvidos pelo laboratório. É aplicável a todas as organizações que realizam testes e/ou calibrações, independentemente do número de pessoas ou do escopo dessas atividades. Esta norma deve ser utilizada por laboratórios no desenvolvimento do seu sistema de gestão para qualidade, operações técnicas e administrativas. No entanto, não tem como objetivo ser utilizada como base para certificação de laboratórios.

Este tópico objetiva estabelecer uma relação entre as práticas laboratoriais apoiadas na utilização da aplicação de banco de dados desenvolvida e os itens da norma atendidos com a implantação da sistemática proposta.

5.2.1 Controle de registros

Quanto ao controle de registros, o item 4.13 da norma determina que:

- O laboratório deve estabelecer e manter procedimentos para identificar, coletar, indexar, acessar, arquivar, armazenar, manter e dispor os registros técnicos;

- Todos os registros devem ser legíveis e devem ser armazenados e preservados de tal forma que possam ser prontamente recuperados, em instalações que ofereçam ambiente adequado, de forma a prevenir danos, deterioração ou perda;
- Todos os registros devem ser mantidos seguros e com confidencialidade;
- O laboratório deve preservar, por um período definido, dados derivados e informações suficientes para estabelecer uma linha de auditoria, registros de calibração, registros do pessoal e uma cópia de cada relatório de teste ou certificado de calibração emitido; e
- Os registros de cada teste ou calibração devem conter informações suficientes para facilitar a identificação de fatores que afetem a incerteza e possibilitar que o teste ou calibração seja repetido em condições o mais próximo possível das condições originais. Os registros podem estar em quaisquer meios, tais como papel ou meio eletrônico.

A aplicação de banco de dados desenvolvida identifica univocamente os registros inseridos, permitindo aos usuários autorizados sua acessibilidade em qualquer momento de forma consistente por meio de uma interface amigável que proporciona clareza na disponibilidade das informações. Os registros podem também ser impressos em forma de relatórios em qualquer momento por operadores autorizados.

Tanto a aplicação como o banco de dados estão hospedados em computadores servidores da RCD que suportam alta demanda de processamento e armazenamento de dados. Estes computadores estão alojados em salas climatizadas de acesso restrito. As informações que trafegam eletronicamente pela RCD por meio da aplicação de banco de dados são disponibilizadas somente a pessoas autorizadas.

5.2.2 Controle de dados

Quanto aos métodos de teste e calibração, e validação destes métodos (item 5.4.7 da norma), quando utilizados computadores ou equipamento automatizado para aquisição, processamento, registro, relato, armazenamento ou recuperação de dados de teste ou calibração, o laboratório deve assegurar que sejam estabelecidos e implementados procedimentos para a proteção dos dados. Estes procedimentos devem incluir a integridade e confidencialidade da entrada; e armazenamento, transmissão e processamento dos dados.

Os procedimentos adotados para proteção da informação, que é armazenada em computadores servidores e trafega pela RCD, envolvem a implementação de soluções que

objetivam garantir a segurança da informação. A rede corporativa é protegida por firewall, configurado para restringir tentativas de conexão oriundas de computadores e serviços estranhos às regras definidas pela administração da RCD, conforme norma interna de segurança da informação. Além disso, tanto os computadores servidores quanto as estações de trabalho possuem software antivírus atualizados diariamente de forma a minimizar ações de códigos maliciosos de origem desconhecida.

5.2.3 Equipamentos

Os equipamentos estão entre os fatores que determinam a correção e a confiabilidade dos testes ou calibrações realizados pelo laboratório. Devem ser mantidos registros de cada item do equipamento e do seu software que sejam significativos para os testes ou calibrações realizados. De acordo com o item 5.5.5 da norma, os registros devem incluir pelo menos o seguinte:

- nome do item do equipamento;
- nome do fabricante, identificação do modelo e número de série ou outra identificação unívoca;
- localização atual, onde apropriado;
- datas, resultados e cópias de relatórios e certificados de todas as calibrações, ajustes, critério de aceitação e a data da próxima calibração;

Além disso, todo o equipamento sob o controle do laboratório que necessitar de calibração deve ser etiquetado, codificado ou identificado de alguma outra forma, para indicar a situação de calibração, incluindo a data da última calibração e a data ou critério de vencimento da calibração (item 5.5.8 da norma).

E em casos em que as calibrações derem origem a um conjunto de fatores de correção, o laboratório deve ter procedimentos que assegurem que as cópias (por exemplo: em software de computador) sejam atualizadas corretamente (item 5.5.11 da norma).

As tabelas do banco de dados da aplicação foram modeladas de forma a permitir ao operador inserir informações relevantes relacionadas às características do transdutor. Entre essas informações há um identificador único gerado pelo sistema, o número de série do acelerômetro, a descrição, o modelo, a localização do item tanto no laboratório quanto na estrutura em que será testada (quando necessário), dados sobre todas as calibrações realizadas e a data da próxima calibração.

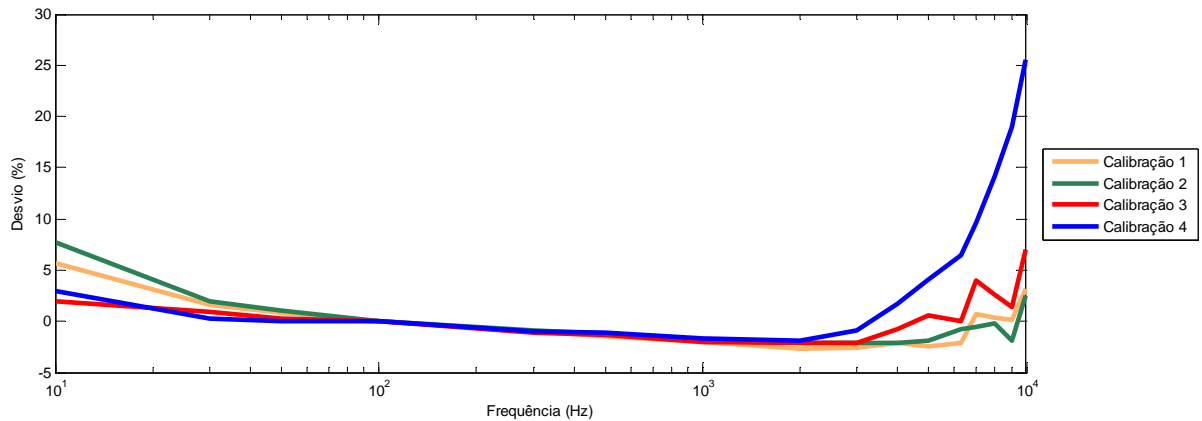
Os acelerômetros do laboratório possuem o número de série gravado em sua estrutura e as datas de última calibração e próxima calibração estão impressos na etiqueta do estojo onde é armazenado fisicamente. Essas informações estão armazenadas eletronicamente no banco de dados do sistema gerenciador de acelerômetros.

Quanto às atualizações de cópias de registros recomendadas pela norma NBR ISO/IEC 17025 (2005), a RCD que abrange o LCC de Acelerômetros é composta por computadores servidores que executam serviços de backup programados semanalmente. As cópias de segurança são transferidas para um dispositivo externo de armazenamento e para um servidor de backups.

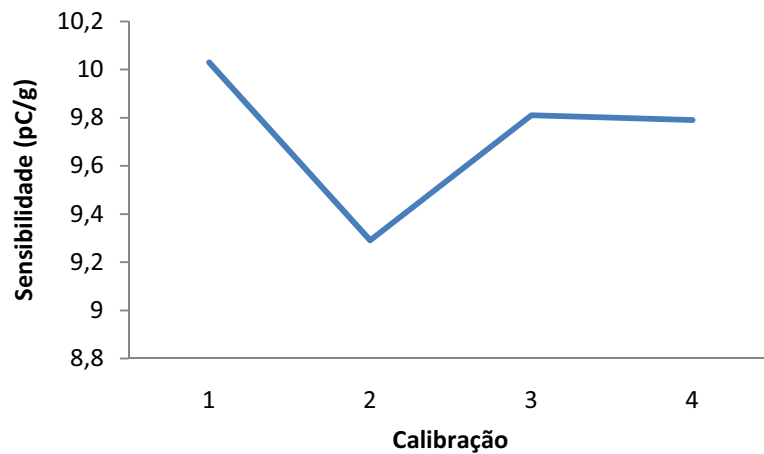
5.2.4 Rastreabilidade de medição

Outro fator que pode determinar a correção e confiabilidade do trabalho realizado pelo laboratório é a rastreabilidade da medição. O item 5.6.1 da norma estabelece que todo equipamento utilizado em testes ou em calibrações, incluindo os equipamentos para medições auxiliares que tenham efeito significativo sobre a exatidão ou validade do resultado do teste, calibração ou amostragem, deve ser calibrado antes de entrar em serviço. O laboratório deve estabelecer um programa e procedimento para a calibração dos seus equipamentos.

O acelerômetro e o respectivo condicionador de sinais utilizados em teste e monitoramento de vibração são calibrados antes de entrar em serviço, assim como os demais itens que compõem o sistema de calibração. O sistema gerenciador de acelerômetros armazena informações relacionadas à calibração de acelerômetros e à calibração de condicionadores de sinais, permitindo, desse modo, a rastreabilidade da medição de ambos. A Figura 40 (a) ilustra a rastreabilidade das respostas das calibrações secundárias realizadas em um acelerômetro piezoelétrico e a Figura 40 (b) ilustra a variação de sensibilidade entre as calibrações.



(a)



(b)

Figura 40 – Rastreabilidade de medição: (a) curvas de resposta das calibrações secundárias realizadas em um acelerômetro piezoelétrico; (b) variação de sensibilidade entre as calibrações.

5.2.5 Manuseio de itens de teste e calibração

De acordo com o item 5.8.2 da norma, o laboratório deve ter um sistema para identificação de itens de teste ou calibração. A identificação deve ser mantida durante a permanência do item no laboratório. O sistema deve ser projetado e operado de forma a assegurar que os itens não sejam confundidos fisicamente nem quando citados em registros ou outros documentos. O sistema deve possibilitar o agrupamento de itens para a transferência destes tanto internamente quanto no âmbito externo ao laboratório.

Tanto os acelerômetros quanto os respectivos condicionadores de sinais possuem um código único e informações (como número de série, descrição e modelo, por exemplo) que possibilitam sua identificação no sistema, independente do local onde estejam alocados. A aplicação permite aos usuários o agrupamento de acelerômetros na saída destes do laboratório para utilização em teste ou monitoramento de vibração e na reentrada ao laboratório, quando devem ser posicionados em seus locais de origem.

5.2.6 Apresentação de resultados

Os resultados de cada calibração ou teste devem ser relatados, normalmente, em um relatório de teste ou em um certificado de calibração e devem incluir informações solicitadas pelo cliente necessárias à interpretação dos resultados do teste ou calibração e informações requeridas pelo método utilizado. No caso de testes ou calibrações realizadas para clientes internos ou no caso de um acordo escrito com o cliente, os resultados podem ser relatados de forma simplificada. De acordo com o item 5.10.2 da norma, cada relatório de teste ou certificado de calibração deve incluir pelo menos as seguintes informações:

- Um título (por exemplo: "Relatório de teste" ou "Certificado de calibração");
- Uma descrição, condição e identificação não ambígua, dos itens testados ou calibrados;
- Data do recebimento dos itens de teste ou de calibração, quando isso for crítico para a validade e aplicação dos resultados, e as datas da realização do teste ou calibração;
- Resultados do teste ou calibração com as unidades de medida, onde apropriado;

Quando for necessária a interpretação dos resultados da calibração, os certificados de calibração devem incluir a evidência de que as medições são rastreáveis.

A norma informa que relatórios de teste e certificados de calibração são, algumas vezes, denominados, respectivamente, certificados de testes e relatórios de calibração. Além disso, os relatórios de teste ou certificados de calibração podem ser emitidos como impressos em papel ou por transferência eletrônica de dados, desde que sejam atendidos os requisitos.

Em adição ao certificado de calibração gerado pelo sistema de calibração TMS 9155C e ilustrado no Apêndice A, o sistema gerenciador de dados de calibração possibilita a impressão sintetizada de informações dos acelerômetros, ilustrada no Apêndice B, ou detalhada dos resultados de cada calibração de um acelerômetro ou de vários, de acordo com o critério adotado pelo usuário, conforme ilustrada no Apêndice C. O mesmo se aplica aos dados de

condicionadores de sinais utilizados com os acelerômetros. Inicialmente os dados de calibração de interesse do usuário são apresentados na tela do sistema, sendo oferecida posteriormente a opção pela impressão em papel. O material impresso é intitulado “Relatório de calibração” e possui informações relevantes como números de série do acelerômetro e do respectivo condicionador de sinais, além da descrição, sensibilidade, unidades de medida e datas de calibração e de utilização. Dessa forma, tanto os dados de calibração dos acelerômetros quanto dos condicionadores de sinais podem ser rastreados.

No que concerne aos testes ou monitoramentos de vibração realizados, informações referentes aos acelerômetros empregados também podem ser impressas no formato de relatório, conforme ilustrado no Apêndice D.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma sistemática que, por meio de uma aplicação de banco de dados desenvolvida, auxilia o corpo laboratorial do LCC de Acelerômetros do COMAER no gerenciamento de dados referentes a centenas de transdutores. Neste capítulo serão apresentados os aspectos positivos e negativos da implementação desta sistemática, além de propostas de trabalhos futuros.

6.1 Aspectos positivos da implementação da sistemática

O corpo laboratorial tem acesso não somente as atividades recentes de calibração e testes, mas também a descrições cronológicas das operações de anos anteriores. Essas informações estão armazenadas em formato eletrônico por meio de tabelas de banco de dados gerenciadas pelo SGBD, sendo que o acesso por meio impresso também é disponibilizado. Um grande número de calibrações registradas possibilita o tratamento estatístico dos dados, permitindo ao corpo laboratorial, por exemplo, a análise da variação da sensibilidade entre as calibrações.

A aplicação supre as necessidades dos operadores no que tange ao armazenamento, identificação e organização dos dados. Além disso, a infraestrutura da RCD garante a confidencialidade das informações, uma vez que estas são acessíveis somente aos operadores autorizados, com as respectivas contas de acesso e senhas.

Sendo o sistema de gerenciamento de dados um complexo de componentes de hardware e software sob uma infraestrutura de RCD, os processos de armazenamento, processamento e distribuição da informação tendem a ser executados de forma harmoniosa pelos usuários, mesmo com um grande número de acessos simultâneos à aplicação.

O desenvolvimento desta aplicação foi estimulado pela busca à automatização dos processos do laboratório, objetivando a agilidade nos processos do LCC de Acelerômetros e a implantação definitiva de um sistema de garantia da qualidade. Verificou-se que o gerenciamento de informações relacionadas à calibração de acelerômetros e ao emprego destes em testes e monitoramentos de vibração é requisito para o início da implantação de um sistema de gestão da qualidade e posterior acreditação do laboratório junto ao INMETRO.

O gerenciamento das atividades laboratoriais por meio de um banco de dados permite que, com o decorrer do tempo e conseqüente desatualização do hardware e software empregados nas atividades laboratoriais, a aplicação seja substituída por uma nova solução

sem grande dificuldade, seja a ferramenta desenvolvida ou adquirida, por meio da simples migração dos dados existentes armazenados do sistema antigo para o novo sistema instalado.

Finalmente, detectou-se que a solução proposta, por meio de adaptações computacionais apropriadas, pode ser útil para o gerenciamento de transdutores diversos utilizados em outros tipos de monitoramentos e testes, como os realizados no domínio da acústica, por exemplo.

6.2 Aspectos negativos da implementação da sistemática

O fato de não haver integração entre os sistemas de aquisição de dados e de gerenciamento de acelerômetros faz com que a aplicação desenvolvida esteja suscetível a erros operacionais, como falhas de digitação, por exemplo. Além disso a falta de conexão entre esses sistemas ocasiona a duplicidade de informações, ou seja, a entrada de determinada informação requerida em ambos os sistemas, é realizada duas vezes, pois os sistemas são independentes. Mesmo não afetando os resultados de calibração, por exemplo, este retrabalho pode gerar desmotivação no corpo laboratorial.

6.3 Trabalhos futuros

Com o desenvolvimento do sistema para gerenciamento de acelerômetros utilizados em testes, verificou-se que determinados processos do laboratório foram otimizados. Dessa forma, a expansão deste gerenciamento a outros processos torna-se viável.

A automatização completa dos processos do LCC de Acelerômetros envolveria a integração entre os já existentes sistemas de aquisição de dados e de gerenciamento de acelerômetros a um sistema de gestão organizacional e da qualidade, desenvolvido ou adquirido, voltado ao gerenciamento de processos e projetos laboratoriais pela alta direção institucional. Entre os vários benefícios detectados no desenvolvimento dessa proposta, destacam-se a maior proteção do sistema laboratorial a erros humanos devido a menor interação homem-sistema e a elevação dos dados extraídos ao nível gerencial, fornecendo a alta direção subsídios para tomadas de decisão.

Além disso, verificou-se a necessidade do atendimento a um maior número de itens da norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) para a implantação eficiente de um sistema de gestão da qualidade laboratorial. É necessário que os documentos e procedimentos atinentes à calibração, teste e monitoramento de vibração também sejam incorporados a uma base de

dados de forma a tornar exequível a rastreabilidade e verificação da conformidade aos requisitos do sistema de gestão da qualidade.

Portanto, as propostas de trabalhos futuros envolveriam a automatização dos processos do laboratório por meio da integração de bancos de dados de aquisição, gerenciamento de acelerômetros e gestão organizacional; e a implantação de uma sistemática de maior abrangência que vise atender ao maior número de requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025 (2005) por parte do LCC de Acelerômetros do COMAER, auxiliando o decurso de sua qualificação junto ao INMETRO.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. **Programa Nacional de Atividades Espaciais – PNAE 2005-2014**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. 114 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005.

BARROS, E. de. **Implementação de um sistema de aquisição de dados para ensaios mecânicos de vibrações**. 2001. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Dinâmica de Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

BARROS, E. de; JULIANI, F.; MATHIAS, M. H. Uma metodologia para o controle de calibração de acelerômetros. In: **IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING**, 26., 2005, Guarapari. Proceedings of the XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. Guarapari: ABMEC & AMC, 2005. 1 CD-ROM.

BATAGELJ, V; BOJKOVSKI, J; DRNOVSEK, J. Software integration in national measurement-standard laboratories. **Science, Measurement & Technology, IET.v.2** , n.2, p. 100-106, 2008.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML – guia do usuário**. Rio de Janeiro: Campus, 2000. 472 p.

BRANDT, A. **Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 438 p.

BUZDUGAN, G.; MIHĂILESCU, E.; RADES, M. **Vibration measurement**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 347 p.

CAMPOS, A. N. **Avaliação metrológica de um sistema de calibração de acelerômetros por choque**. 2010. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2010.

CARLETON, C. J.; DAHLGREN, R. A.; TATE, K. W. A relational database for the monitoring and analysis of watershed hydrologic functions: II. Data manipulation and retrieval programs. **Computers & Geosciences**. v. 31, n.4, p. 403-413, 2005.

CRITCHLOW, T. Data Foundry: information management for scientific data. **IEEE transactions on information technology in biomedicine**. v.4, n.1, p. 52-57, 2000.

DATE, C. J. **Introdução a sistemas de bancos de dados**. Rio de Janeiro: Campus, 2000. 803 p.

DAVIS, A. M. **Software requirements: objects, functions and states**. Englewood-Cliffs: Prentice Hall, 1993. 521 p.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL. **NSCA 9-1: Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA)**. São José dos Campos, 2012.

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL. **NSCA 9-4: Estrutura Funcional do Sistema de Metrologia Aeroespacial (SISMETRA)**. São José dos Campos, 2009.

EWINS, D. J. **Modal testing: theory and practice**. Taunton: Research Studies Press, 1984. 269 p.

FRENCH, A.P. **Vibrações e ondas**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001. 384 p.

FULLER, C. R.; ELLIOTT, S. J.; NELSON, P. A. **Active control of vibration**. London: Academic Press Limited, 1996. 332 p.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2009.

GODOY, A. S. **Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n.2, p. 57-83, mar./ abr. 1995.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. **Harris' shock and vibration handbook**. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 1568 p.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; FRANCO, F. M. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva; 2001.

IEEE Std. 830. **IEEE Guide to software requirements specification**. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1984.

INMAN, D. J. **Engineering vibration**. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008. 669 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16063-21: Methods for the calibration of vibration and shock transducers – Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer**. Switzerland: ISO, 2003.

JUNG, Carlos Fernando. **Pesquisa e desenvolvimento**. Porto Alegre: PPGEP/UFRGS, 2011. Disponível em: <http://www.metodologia.net.br>. Acesso em: 11/09/2012.

KJELDSEN, H.; OLSEN, J.; HEINEMEIER, J. An integrated data-analysis and database system form AMS¹⁴. **C. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**. v. 268, n.7-8, p. 980-984, 2010.

MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. **Theoretical and experimental modal analysis**. Taunton: Research Studies Press, 1997. 468 p.

McCONNELL, K. G. **Vibration testing: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 606 p.

McLEOD, R.; SCHELL, G. P. **Management information systems**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. 447 p.

NEWLAND, E. D. **An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis**. Harlow: Addison Wesley Longman Limited, 1997. 477 p.

PETKOVIC, D. **SQL Server 2000 – Guia Prático**. São Paulo: Makron Books, 2002, 555 p.

PRESSMAN, R. S. **Software engineering – a practitioner’s approach**. New York: McGraw-Hill, 2010, 895 p.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital signal processing – principles, algorithms, and applications**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996.

RANDALL, R. B. **Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. 289 p.

RANGEL, E. G. L. **Normalização em metrologia no Comando da Aeronáutica: diagnóstico e considerações sobre um modelo integrado**. 2005. 196 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 424 p.

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO: banco de dados. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rbc/lista_laboratorios.asp?acao=consulta>. Acesso em 30 out. 2012.

SCHEFFER, C.; GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis & predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004. 255 p.

SERRIDGE, M.; LICHT, T. R. **Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook**. Glostrup: K. Larsen & Son A/ S, 1987. 151 p.

SHIN, K.; HAMMOND, J. **Fundamentals of signal processing for sound and vibration engineers**. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 403 p.

SIKORSKA, J. Z.; KELLY, P. J.; PAN, J. Development of an AE data management and analysis system. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.20, n.8, p. 2321-2339, 2005.

SOMMERVILLE, I. **Engenharia de software**. 8.ed. São Paulo: Pearson Addison-Wesley, 2007. 552p.

SPEALMAN, J.; HUDSON, K.; CRAFT, M. **Planning, implementing, and maintaining a Microsoft Windows Server 2003 Active Directory infrastructure**. Redmond: Microsoft Press, 2006. 704 p.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

VASCONCELOS, A. M. L. de; ROUILLER, A. C.; MACHADO, C. A. F.; MEDEIROS, T. M. M. de. **Introdução à engenharia de software e à qualidade de software**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 154 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Certificado de calibração gerado pelo sistema TMS 9155C

CC 351/ AIE / 2012

Sensor Information

Model Number 4514 B 004
 Serial Number 52805
 Manufacturer: Bruel & Kjaer
 ID Number:
 Description: ICP® Accelerometer

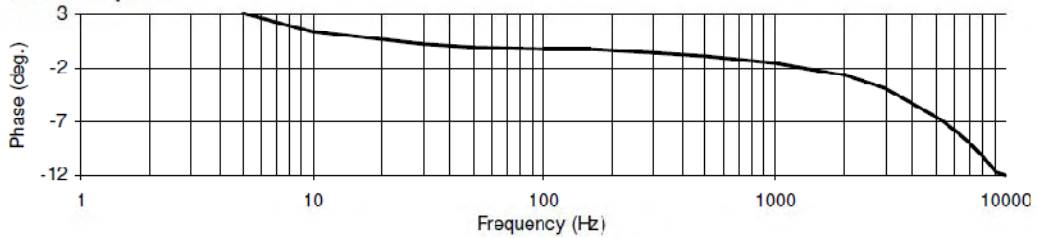
Calibration Data

Sensitivity @ Ref. Freq.: 50,3709 mV/g
 Phase @ Ref. Freq.: -0,4779 deg.
 Test Accel.: 1,00 g

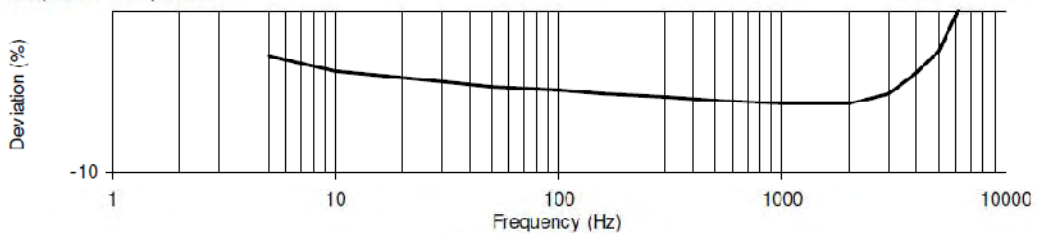
Transducer Specifications

Range: 10,00 +/- g
 Resolution: 0,0000 g
 Temp Range: -51 to 100 °C
 -60 to 212 °F
 Axis: Uniaxial

Phase Response



Amplitude Response



Data Table

Frequency (Hz)	Deviation (%)	Phase (deg)
10,0000	2,6097	1,17
30,0000	1,3328	0,08
50,0000	0,8268	-0,20
100,0000	0,2065	-0,07
159,0000	0,0000	-0,48
300,0000	-0,5686	-0,68
500,0000	-0,8636	-0,98
1000,0000	-1,4384	-1,62
2000,0000	-1,3014	-2,32
3000,0000	-0,0201	-4,14
4000,0000	2,4482	-5,51
5000,0000	5,1897	-6,74
6300,0000	10,3308	-8,33
7000,0000	13,7236	-9,16
8000,0000	19,3471	-10,41
9000,0000	25,1169	-11,82
10000,0000	35,5659	-12,18

Notes

Results relate only to the items calibrated.
 This certificate may not be reproduced except in full, without written permission.
 Back-to-Back Comparison Calibration
 This calibration was performed with TMS 9155c Calibration Workstation version 3.8.1
 Calibration is NIST Traceable through project number C798/2012.
 Calibration is performed in compliance with ISO 9001 and ISO 17025.
 Measurement uncertainty (95% confidence level with coverage factor of 2) at ref. frequency:
 1,1500 %

Customer

User Notes

Unit Condition

As Found:
 As Left:

Lab Conditions

Temperature: 0,00 °C
 32,00 °F
 Humidity: 0,00 %

Approval Information

Technician: Fabio
 Approval:

CalibrationDate: 10/19/2012
 Due Date:

APÊNDICE B

**Relatório sintetizado gerado pela aplicação de banco de dados contendo informações
sobre acelerômetros calibrados**

Relatório de Código x Acelerômetro x Condicionador x Faixas

Parâmetros de pesquisa										
N. Série :		Descrição :								
Modelo : 4517		Arquivo :			C1 :	OMC :	Tipo :	Módulo :	Indexado por:	
Código	Acelerômetro			Condicionador			Faixas			
	N.Série	Descrição	Modelo	N.Série	Descrição	Modelo	Amp.	Un.	Fmin.	Fmáx.
T 2 V 4C 502	58828	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689169	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V 4C 501	58830	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689170	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V 2D 507	58797	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689142	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V 2D 506	58798	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689143	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V 2D 505	58799	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689144	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V 2D 504	58800	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689145	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 2D 503	58801	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689146	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 2D 502	58802	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689147	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 2D 501	58803	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689148	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 3T 502	58804	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689149	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 3T 501	58805	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689151	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 80	g	5	2000	
T 2 V 3P 501	58806	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689152	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 40	g	5	2000	
T 2 V BE 507	58807	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689153	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 200	g	5	2000	
T 2 V BE 506	58809	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689154	Amplificador Carga: sens 5-50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002 20	g	5	2000	

APÊNDICE C

**Relatório detalhado gerado pela aplicação de banco de dados contendo informações
sobre acelerômetros calibrados**

Relatório de Calibração

Parâmetros de pesquisa										
N. Série :		Descrição :								
Modelo : 4517		Arquivo :		C1 :	OMC :	Tipo :	Módulo :		Indexado por:	
Acelerômetro				Condicionador				Faixas		
Código	N.Série	Descrição	Modelo	N.Série	Descrição	Modelo	Amp.	Un.	Fmín.	Fmáx.
T 2 V 4C 502	58828	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689169	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	40	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
21/4/2009 1.898 pC/g 730 3 0.193542pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/pC										
T 2 V 4C 501	58830	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689170	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	40	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
21/4/2009 1.851 pC/g 730 3 0.188749pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/pC										
T 2 V 2D 507	58797	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689142	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	40	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
20/4/2009 1.939 pC/g 730 3 0.1977229pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/g										
T 2 V 2D 506	58798	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689143	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	40	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
20/4/2009 1.773 pC/g 730 2 0.1807956pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/pC										
T 2 V 2D 505	58799	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689144	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	40	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
20/4/2009 1.761 pC/g 730 3 0.1795720pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/pC										
T 2 V 2D 504	58800	Acelerômetro de Vibração Estrutural	4517-W-004	2689145	Amplificador Carga: sens 50mV/pC; freq 5Hz-2kHz	3546-W-002	80	g	5	2000
Dados de calibração do acelerômetro:										
Certificado Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.1 Un.1 Capacit. Desvio Sensib.2 Un.2										
20/4/2009 1.826 pC/g 730 3 0.1862001pC/ms ²										
Dados de calibração do condicionador:										
Dt.Calib. Dt.Utiliz. Sensib.de ajuste Un.										
mV/pC										

APÊNDICE D

Relatório gerado pela aplicação de banco de dados dos acelerômetros utilizados em teste

Relatório de Acelerômetros em Teste

Dados de ensaio							
Número :5	Responsável :Everaldo de Barros			Documento : SE 003/ASA-L/2010			
Aplicação : Análise Modal Experimental do VANT Acauã							
Data de início : 7/5/2010				Data final : 30/6/2010			
Acelerômetros utilizados: 27							

N.Série	Dt.Próx.Calibração	Sensib.(1)	Unid.(1)	Capacitância(pF)	Desvio(%)	Sensib.(2)	Unid.(2)
58828		1,843	pC/g	730	4	0,187	pC/ms ²
58830		1,851	pC/g	730	3	0,188	pC/ms ²
58831		1,822	pC/g	730	3	0,185	pC/ms ²
58832		1,822	pC/g	730	3	0,185	pC/ms ²
58833		1,814	pC/g	730	3	0,185	pC/ms ²
58834		1,766	pC/g	730	3	0,18	pC/ms ²
58835		1,739	pC/g	730	3	0,177	pC/ms ²
58838		1,815	pC/g	730	4	0,185	pC/ms ²
59021		1,817	pC/g	730	3	0,185	pC/ms ²
59022		1,73	pC/g	730	2	0,176	pC/ms ²
59023		1,75	pC/g	730	2	0,178	pC/ms ²
59024		1,771	pC/g	730	3	0,18	pC/ms ²
59025		1,789	pC/g	730	3	0,182	pC/ms ²
59032		1,783	pC/g	730	3	0,181	pC/ms ²
59033		1,903	pC/g	730	2	0,194	pC/ms ²
59034		1,753	pC/g	730	2	0,178	pC/ms ²
59035		1,715	pC/g	730	2	0,174	pC/ms ²
59036		1,836	pC/g	730	2	0,187	pC/ms ²
59038		1,806	pC/g	730	3	0,184	pC/ms ²
59039		1,813	pC/g	730	3	0,184	pC/ms ²
59040		1,76	pC/g	730	3	0,179	pC/ms ²
59041		1,76	pC/g	730	4	0,179	pC/ms ²
58797		1,939	pC/g	730	3	0,197	pC/ms ²
58798		1,773	pC/g	730	2	0,18	pC/ms ²
58799		1,761	pC/g	730	3	0,179	pC/ms ²
58800		1,826	pC/g	730	3	0,186	pC/ms ²
58801		1,812	pC/g	730	4	0,184	pC/ms ²

ANEXOS

ANEXO A

**Informações disponibilizadas pela Rede Brasileira de Calibração sobre os laboratórios
acreditados para a calibração de acelerômetros**

Nome do laboratório	Centro de Tecnologia da Eletronorte - LACEN
Acreditação N°	153
Data da Acreditação	06/09/2000
Data de validade do certificado	01/01/2016
Cidade	Belém-PA
Realiza testes de vibração	Não

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	20 Hz - 5000 Hz	0,7%

Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

Nome do laboratório	CALILAB – Laboratório de calibração e ensaios
Acreditação N°	307
Data da Acreditação	08/07/2005
Data de validade do certificado	01/01/2016
Cidade	São Caetano do Sul-SP
Realiza testes de vibração	Sim

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	10 Hz – 12,5 Hz	1,7 %
	> 12,5 Hz – 25 Hz	1,5%
	>25 Hz – 40 Hz	1,2%
	>40 Hz – 1000 Hz	0,8%
	>1000 Hz – 2000 Hz	1,2%
	>2000 Hz – 3150 Hz	1,5%
	>3150 Hz – 5000 Hz	2,5%
	>5000 Hz – 6300 Hz	3%
	>6300 Hz – 8000 Hz	5%
	>8000 Hz – 10000 Hz	7%

Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

Nome do laboratório	Inter-Metro serviços especiais
Acreditação N°	450
Data da Acreditação	04/11/2009
Data de validade do certificado	04/11/2015
Cidade	São Paulo – SP
Realiza testes de vibração	Não

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	10 Hz – 40 Hz	1,7 %
	50 Hz – 1000 Hz	1,2%
	1250 Hz – 4000 Hz	1,7%
	5000 Hz – 10000 Hz	2,2%

Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

Nome do laboratório	Laboratório de acústica e vibração Brüel&Kjaer
Acreditação N°	305
Data da Acreditação	28/03/2005
Data de validade do certificado	01/01/2016
Cidade	São Paulo - SP
Realiza testes de vibração	Não

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	10 Hz – 40 Hz	1,2 %
	> 40 Hz – 1000 Hz	0,8%
	> 1000 Hz – 5000 Hz	1,2%

Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

Nome do laboratório	Laboratório de integração e testes – LIT/INPE
Acreditação N°	22
Data da Acreditação	14/08/1991
Data de validade do certificado	29/03/2013
Cidade	São José dos Campos - SP
Realiza testes de vibração	Sim

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	10 Hz – 20 Hz	1,4 %
	> 20 Hz – 40 Hz	1,2%
	> 40 Hz – 1000 Hz	0,8%
	> 1000 Hz – 5000 Hz	1,2%
	> 5000 Hz – 10000 Hz	1,7%

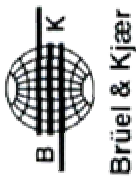
Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

Nome do laboratório	Laboratório MEC-Q
Acreditação N°	149
Data da Acreditação	08/08/2000
Data de validade do certificado	08/08/2016
Cidade	Santo André - SP
Realiza testes de vibração	Não

Descrição do serviço	Faixa	Capacidade de Medição e Calibração (CMC)
Calibração de acelerômetros	10 Hz – 40 Hz	1,6 %
	> 20 Hz – 40 Hz	1,6%
	> 40 Hz – 1000 Hz	1,1%
	> 1000 Hz – 2000 Hz	1,6%

Observação: a capacidade de medição e calibração (CMC) refere-se á menor incerteza que o Laboratório é capaz de obter, com uma probabilidade de abrangência ou nível da confiança de aproximadamente 95%.

ANEXO B**Carta de calibração de um acelerômetro piezoelétrico**



**Calibration Chart for
DeltaTron® Accelerometer
Type 4514-B-004**

Serial No. **52802**

Reference Sensitivity ¹⁾ at 159.2 Hz ($\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$): $20 \text{ ms}^{-2} \text{ RMS}$

4 mA supply current and $23 \pm 2^\circ\text{C}$: $5,495 \dots \text{ mV/ms}^{-2}$ ($50,072 \dots \text{ mV/g}$)

Frequency Range: Amplitude ($\pm 10\%$) 1 Hz to 10 kHz

Mounted Resonance Frequency: 32 kHz

Transverse Sensitivity ²⁾: $\pm 5\%$ (w Reference Sensitivity)

Maximum (at 30 Hz, 100 ms^{-2}): $29 \pm 8 \text{ kHz}$

Quality factor Q_{ref} : 89 ± 8

Amplitude slope: $-2,1 \dots \%$ / decade

High-pass cut-off frequency: $0,25 \text{ kHz}$

Low-pass cut-off frequency: 74 kHz

Measuring Range: $\pm 980 \text{ ms}^{-2}$ peak (s 100 g peak)

Polarity of the signal is positive for an acceleration into the accelerometer mounting surface. For triaxial accelerometers and accelerometers with multiple mounting surfaces, the polarity of the signal is positive for an acceleration in the direction of the arrow on the drawing.

¹⁾ This calibration is obtained on a modified Brüel & Kjær Calibration System Type 9613, Serial No. 1493917, and is traceable to the National Institute of Standards and Technology, USA and Physikalische Bundesanstalt, Germany.
²⁾ The indicated accuracy is $\pm 10\%$ determined in accordance with EN 60180. A coverage factor $k = 2$ is used. This corresponds to a coverage probability of 95% for a normal distribution.

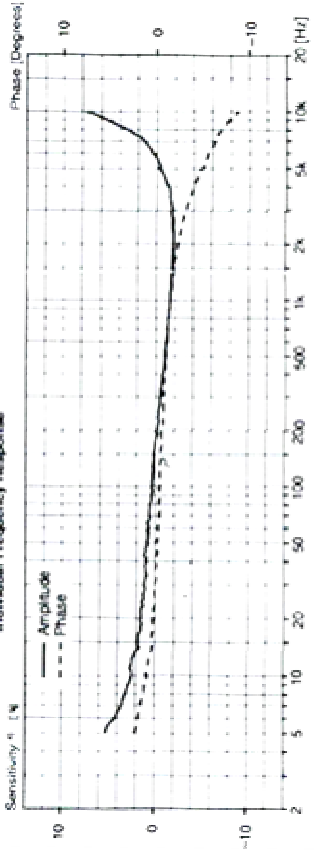
³⁾ The uncertainty is 0.3% of Reference Sensitivity.

⁴⁾ Transducer Electronic Data Sheet according to IEEE P481-4. Built-in Compensation not included.

⁵⁾ Deviation from Reference Sensitivity.



Individual Frequency Response



Electrical:

Low-frequency Roll-off:

at 25°C : 20 dB/decade

Full temperature range: $+ 11 \text{ V to } + 13 \text{ V}$

$+ 8 \text{ V to } + 16 \text{ V}$

$+ 2 \text{ to } + 10 \text{ mA}$

$+ 24 \text{ V to } + 30 \text{ V}$

Power Supply Requirements:

Constant Current:

Unloaded Supply Voltage:

$< 210 \Omega$

$< 3 \text{ s}$

Output Impedance:

Start-up Time:

Inherent Noise (RMS):

Bandwidth (1 Hz to 10 kHz):

$15 \mu\text{V}$

corresponding to $0,003 \text{ ms}^{-2}$ ($300 \mu\text{g}$)

Base Isolated

Isolation:

Recommended cables:

see Product Data Sheet

Environmental:

Temperature Range:

$- 51 \text{ to } + 100^\circ\text{C}$ ($- 60 \text{ to } + 212^\circ\text{F}$)

Temperature Coefficient of Sensitivity:

$+ 0,11 \%/^\circ\text{C}$

Temp. Transient Sensitivity (3 Hz Low Lim. Freq. (-3dB, 6 dB/oct)):

$0,007 \text{ ms}^{-2}/^\circ\text{C}$

Base-strain Sensitivity (at $250 \mu\text{m}$ in base plate):

$0,03 \text{ ms}^{-2}/\mu\text{m}$

Max. Non-destructive Shock:

50 kms^{-2} peak (5000 g peak)

Mechanical:

Case Material:

Titanium

Construction:

Ceramic

Sealing:

Plasma-Seal[▲]

Hermetic

Weight:

8,7 gram (0,31 oz.)

Electrical Connector:

10-32 UNF-2A

Mounting Surface Flatness:

25 μm

Mounting:

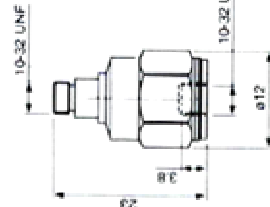
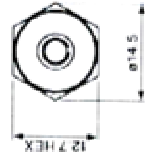
10-32 UNF-2A (Internal Thread)

Depth 3,8 mm

Max. 2,3 Nm (20 lbf in)

Typical 1,7 Nm (15 lbf in)

Mounting Torque:



All dimensions in millimeters

Serial No.: **52802**

Date **26 MAR 2008**, 14:42 Operator **JUBOT**

Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-1969 and parts of ISO 5347
All values are typical at 25°C (77°F), unless measurement uncertainty is specified.