



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VIBRAÇÕES E ACÚSTICA**

**KELIENE MARIA SOUSA DE JESUS**

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE**  
**MONITORAMENTO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E**  
**CORRELAÇÃO COM CORRENTE ESTATÓRICA**

**BELÉM**

**2010**

**KELIENE MARIA SOUSA DE JESUS**

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE  
MONITORAMENTO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E  
CORRELAÇÃO COM CORRENTE ESTATÓRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Newton Sure Soeiro.

**BELÉM**

**2010**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA**

S58j

Jesus, Keliene Maria Sousa

Implementação e análise do desempenho de técnicas de monitoramento através de medição de vibração e correlação com corrente estatórica / Keliene Maria Sousa de Jesus; orientador Newton Sure Soeiro. – Belém, 2010.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

1. Vibração 2. Monitoramento 3. Corrente estatórica 4. Diagnóstico de defeitos I. Newton Sure Soeiro, orientador. II. Título

**KELIENE MARIA SOUSA DE JESUS**

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE TÉCNICAS DE  
MONITORAMENTO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO E  
CORRELAÇÃO COM CORRENTE ESTATÓRICA.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários, para a obtenção do título de Mestre.

Data de Aprovação: 16 de junho de 2010,

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Newton Sure Soeiro – UFPA – Orientador

---

Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita – UFPA –  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Petrônio Vieira Junior – UFPA – Membro Externo

---

Prof. Dr. Gustavo da Silva de Melo – UFPA – Suplente

*Dedico esse trabalho a todas aquelas pessoas que acreditaram em mim e por isso me apoiaram incondicionalmente, sem elas meu caminho para concluir esse ciclo de vida teria sido muito mais difícil.*

*Em especial dedico aos meus filhos:*

*João Vitor, por ter superado comigo todas as dificuldades, com a força de um grande homem e a Maria Clara (In memorian), que muito me ensinou e fortaleceu com sua chegada e partida.*

## **AGRADECIMENTOS**

- A Deus por tudo que fez em minha vida. Nos momentos difíceis me deu força para superar, na dúvida me conduziu a certeza, na tristeza me deu força para buscar a alegria e na fraqueza foi a minha fortaleza.
- Ao meu orientador, Professor Newton Sure Soeiro pela orientação e oportunidade de trabalharmos juntos. Seu comprometimento e dedicação profissional representam referências em minha vida.
- À minha família.
- À minha amiga Diana dos Santos Moraes e sua família, pelo apoio em um dos momentos mais difíceis durante a elaboração desse trabalho.
- Ao Professor Petrônio Vieira Junior coordenador do Projeto de Pesquisa ao qual o trabalho estava vinculado.
- Aos amigos, Roberta Tamara, Walter Sousa, Alexandre Sá, Adriano da Silva, Márcio Mafra, Adry Kleber e Fábio Setubal, pelo apoio durante as realizações dos ensaios experimentais.
- Aos professores, funcionários e colegas de pós-graduação da UFPA e em especial ao prof. Gustavo Vieira de Melo e Alexandre Luiz Amarante Mesquita, pelo convívio e aprendizado.
- Ao técnico Odilon Oliveira Silva pela ajuda significativa na elaboração dos ensaios experimentais.
- Ao GVA (Grupo de Vibração e Acústica) pelo apoio durante minha formação acadêmica.
- À Faculdade de Engenharia Elétrica da UFPA pela liberação do Laboratório onde foram realizados os testes experimentais.
- À Eletronorte pelo apoio financeiro na execução do trabalho.
- Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.
- À todas as pessoas que não foram citadas aqui, mas que muito contribuíram na elaboração desse trabalho.

## RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica aliada à grande importância deste setor para o sistema econômico nacional tem levado o governo e empresas particulares a investirem em estudos que possibilitem melhorar o desempenho dos sistemas envolvidos nesse processo, em virtude dos relevantes ganhos que esta iniciativa pode produzir. Neste contexto, esse trabalho é uma contribuição ao estudo do desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de defeitos para a máquina hidrogeradora número 3 da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, localizada no Estado do Amapá. Em muitas situações os métodos de análise de vibrações são utilizados para detectar a presença de falhas nesse tipo de máquina, neste trabalho também será utilizada a análise dos sinais de corrente para fornecer indicações similares. Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de diagnóstico de defeito em máquinas elétricas através dos sinais de vibração e correlação com a análise da corrente do estator. No decorrer deste trabalho apresenta-se uma revisão bibliográfica das técnicas de monitoramento e diagnóstico das condições das máquinas elétricas, através dos ensaios de vibração correlacionados com as características da corrente estatórica. O resultado da correlação da medição de vibração com a medição de corrente se baseia em uma metodologia implementada por um sistema de aquisição e de processamento de dados desenvolvido na plataforma LabView. Os resultados experimentais foram obtidos a partir de defeitos mecânicos (desbalanceamento mecânico e defeitos nas pistas, externa e interna dos rolamentos) induzidos em uma bancada experimental concebida com intuito de representar um sistema de geração. Finalizando, os sinais de vibração e corrente foram analisados e comparados para verificar se os defeitos que foram evidenciados pelo método convencional de vibração alteravam o comportamento dos sinais de corrente. Os bons resultados desse trabalho mostram a viabilidade em estudos futuros nesta área.

**Palavras-chave:** Hidrelétrica, diagnóstico, defeitos, vibração, corrente estatórica.

## ABSTRACT

The growing demand for electricity coupled with the great importance of this sector to the national economic system has led the government and private companies to invest in studies for improving the performance of the systems involved in this process, given the important gains that this initiative can produce. In this context, this work is a contribution to the study of the development of a methodology for diagnosis of defects to the machine number three hydro Hydropower Plant Coaracy Nunes, located in Amapa State. In many situations the methods of vibration analysis is used to detect the presence of faults in this type of machine, this work will also be used to analyze the current signals to provide similar indications. This work aims to present a methodology for fault diagnosis in electrical machines using the vibration signals and correlation with the analysis of the stator current. Throughout this work presents a review of techniques for monitoring and diagnosis of the condition of electrical machinery, through vibration tests correlated with the characteristics of the stator current. The result of the correlation of vibration measurement with the current measurement is based on a methodology implemented by a system of acquisition and data processing platform developed in LabView. The experimental results were obtained from mechanical defects (unbalance and mechanical defects on the slopes, and internal bearings) induced in an experimental device designed with the intention to represent a generation system. Finally, the vibration and current signals were analyzed and compared to verify that the defects that were detected by the conventional vibration altered the behavior of current signals. The good results of this study demonstrate the feasibility of future studies in this area.

**Keywords:** Hydroelectric, diagnosis, fault, vibration, stator current.



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	20
1.1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	20
1.2.	OBJETIVOS.....	22
1.2.1.	<i>Objetivo Geral</i> .....	22
1.2.2.	<i>Objetivo Específico</i> .....	23
1.3.	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	23
1.4.	METODOLOGIA DO TRABALHO.....	24
1.5.	DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	25
1.6.	HISTÓRICO DA USINA DE COARACY NUNES.....	26
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	32
2.1.	INTRODUÇÃO.....	32
2.2.	MONITORAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E CORRENTE PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	32
2.3.	REVISÃO SOBRE TÉCNICAS DE ANÁLISES DE SINAIS.....	35
2.3.1.	<i>Nível Global (RMS)</i> .....	36
2.3.2.	<i>Fator de Crista (F<sub>c</sub>)</i> .....	36
2.3.3.	<i>Curtose (K)</i> .....	37
2.3.4.	<i>Análise Espectral</i> .....	37
2.3.5.	<i>Técnica do Envelope</i> .....	38
2.3.6.	<i>Cepstrum</i> .....	39
2.4.	SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS.....	40
2.5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
<b>3.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	44
3.1.	INTRODUÇÃO.....	44
3.2.	GERADORES SÍNCRONOS.....	44
3.2.1.	<i>Princípio de Funcionamento</i> .....	45
3.3.	FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO.....	52
3.4.	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS.....	55
3.4.1.	<i>Nível Global (rms)</i> .....	56
3.4.2.	<i>Fator de Crista (F<sub>c</sub>) e Fator K (F<sub>K</sub>)</i> .....	56
3.4.3.	<i>Curtose (K)</i> .....	58
3.4.4.	<i>Análise Espectral</i> .....	59

3.4.4.1. Obtenção do Espectro de Frequência.....	59
3.4.4.2. Identificação dos principais defeitos através da Análise Espectral.....	65
3.4.5. Técnica do Envelope.....	72
3.4.6. Cepstrum.....	74
3.4.7. Análise do Espectro de Corrente.....	75
3.4.7.1. Desbalanceamento (Excentricidade Dinâmica).....	75
3.4.7.2. Defeitos em Mancais de Rolamento.....	76
<b>4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICOS DE DEFEITOS ATRAVÉS DE VIBRAÇÕES E CORRENTE.....</b>	<b>77</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	77
4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO (HARDWARE).....	78
4.2.1. Descrição dos Instrumentos do Sistema de Aquisição.....	79
4.3. SISTEMA AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS (SOFTWARE).....	80
4.3.1. Metodologia do Sistema.....	81
4.3.2. Aquisição do Sinal.....	81
4.3.3. Visualização dos Sinais .....	83
4.3.4. Análise dos Sinais.....	85
4.3.5. Simulação de Defeito.....	86
4.4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	90
4.4.1. Calibração do Sistema de Aquisição de Sinais de Vibração.....	90
4.4.2. Calibração do Sistema de Aquisição de Sinais de Corrente.....	93
<b>5. ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>94</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	94
5.2. BANCADA EXPERIMENTAL.....	94
5.2.1. Descrição da Bancada.....	94
5.2.2. Aquisição dos Sinais e Disposições dos Sensores.....	97
5.3. APLICAÇÃO DOS DEFEITOS.....	98
5.3.1. Desbalanceamento Mecânico.....	99
5.3.1.1. Determinação do Desbalanceamento Residual.....	101
5.3.1.2. Análise Estática através de MEF .....	103
5.3.1.3. Adição da Massa de Desbalanceamento.....	109
5.3.2. Aplicação dos Defeitos nos rolamentos.....	110
5.3.2.1. Identificação das Frequências de Ressonância.....	111

<b>6.</b>	<b>ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>116</b>
6.1.	INTRODUÇÃO.....	116
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DA CONDIÇÃO NORMAL DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR.....	116
6.3.	DETECÇÃO DOS DEFEITOS. NOS ROLAMENTOS.....	120
<b>6.3.1.</b>	<b><i>Detecção dos Defeitos nos Rolamentos por Análise de Vibração.....</i></b>	<b>120</b>
6.3.1.1.	<i>Análise no Domínio do Tempo.....</i>	120
6.3.1.2.	<i>Análise Espectral.....</i>	121
6.3.1.3.	<i>Técnica do Envelope.....</i>	126
6.3.1.4.	<i>Técnica de Cepstrum.....</i>	129
<b>6.3.2.</b>	<b><i>Detecção dos Defeitos nos Rolamentos por Análise da Corrente do Estator.....</i></b>	<b>131</b>
6.3.2.1.	<i>Análise Espectral.....</i>	132
6.3.2.2.	<i>Técnica de Cepstrum.....</i>	134
6.4.	DETECÇÃO DO DEFEITO DE DESBALANCEAMENTO MECÂNICO.....	137
<b>6.4.1.</b>	<b><i>Detecção do Desbalanceamento por Análise de Vibração.....</i></b>	<b>137</b>
6.4.1.1.	<i>Análise no Domínio do Tempo.....</i>	137
6.4.1.2.	<i>Análise Espectral.....</i>	138
<b>6.4.2.</b>	<b><i>Detecção do Desbalanceamento por Análise da Corrente do Estator.....</i></b>	<b>138</b>
6.4.2.1.	<i>Análise Espectral.....</i>	138
6.4.2.2.	<i>Técnica de Cepstrum.....</i>	140
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>	<b>141</b>
7.1.	CONCLUSÕES DO TRABALHO.....	141
7.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>144</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>150</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Vistas da UHE de Coaracy Nunes (Fonte: Eletronorte).	26
Figura 1.2	Instrumentação Virtual do Sistema Monithidro Coaracy Nunes (Fonte: Cepel, (2006)).	28
Figura 1.3	Arquitetura da Rede do Sistema Monithidro Coaracy Nunes (Fonte: Cepel, (2006)).	29
Figura 1.4	Metodologia do Sistema DIAHGER.	29
Figura 1.5	Janela do Sistema DIAHGER.	30
Figura 1.6	Diagrama de localização dos Sensores da Unidade geradora 3 da UHE de Coaracy Nunes.	31
Figura 2.1	Esquema de um sistema de aquisição de dados.	41
Figura 2.2	Painel frontal, (Fonte: National Instruments, <i>LabView – User Manual</i> , 2000).	42
Figura 2.3	Painel frontal.	42
Figura 2.4	Diagrama de bloco.	43
Figura 3.1	(a) Gerador síncrono. (b) Rotor. (c) Estator (armadura com condutores)	45
Figura 3.2	Arranjo esquemático de uma máquina síncrona, trifásica, de pólos Salientes.	46
Figura 3.3	Fluxo magnético, forma senoidal.	47
Figura 3.4	Distribuição do fluxo enlaçado pelas bobinas e fluxo disperso.	48
Figura 3.5	Fluxo e tensão induzida no estator, forma senoidal.	48
Figura 3.6	Diagrama de fluxo e tensão.	49
Figura 3.7	Campo magnético $\Phi_f$	49
Figura 3.8	Tensão induzida na armadura $E_f$	50
Figura 3.9	Campo de reação da armadura $\Phi_{ra}$	50
Figura 3.10	Tensão induzida $E_{ra}$	50
Figura 3.11	Tensão induzida na armadura $E_f$	51
Figura 3.12	Tensão terminal do gerador $E_t$	51
Figura 3.13	Representação de um movimento harmônico.	53
Figura 3.14	Frequência angular.	53
Figura 3.15	Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração de um movimento Harmônico.	54

Figura 3.16	Desbalanceamento mecânico rotativo.	55
Figura 3.17	Valor RMS e valor de pico de um sinal (modificado, Mesquita, 2005).	56
Figura 3.18	Fator de crista (Ponci e Cunha).	57
Figura 3.19	Variação do fator $K$ .	58
Figura 3.20	Discretização de um sinal analógico (modificado, Mesquita, 2005).	62
Figura 3.21	Fenômeno de <i>Aliasing</i> (a) Sinal com $f_s > 2 f_n$ ; (b) Sinal com $f_s < 2 f_n$ .	63
Figura 3.22	(a) Sinal com números inteiro de ciclos; (b) Sinal sem números inteiro de ciclos; (c) Multiplicação do sinal com a função janela Hanning; (d) Sinal após a utilização da função janela Hanning (modificado, Mesquita, 2005).	65
Figura 3.23	(a) Desenho esquemático de uma máquina desbalanceada. (b) Espectro de frequência (modificado, Mesquita, 2005).	66
Figura 3.24	Tipos de desalinhamento (modificado, Mesquita, 2005).	67
Figura 3.25	Espectro de uma máquina desalinhada (modificado, Mesquita, 2005).	67
Figura 3.26	Componentes do rolamento.	68
Figura 3.27	Descrições dimensionais do rolamento.	69
Figura 3.28	Evolução dos defeitos nos rolamentos (Almeida e Góz, 2002).	71
Figura 3.29	Representação de um sinal de vibração de um rolamento defeituoso.	72
Figura 3.30	Modulação de amplitude do sinal.	72
Figura 3.31	Procedimentos da técnica do envelope.	73
Figura 4.1	Arquitetura do sistema de aquisição e processamento de sinal.	78
Figura 4.2	(a) Sensores de corrente; (b) Sensor de vibração.	79
Figura 4.3	Condicionador de sinais.	80
Figura 4.4	Visualização do conjunto (interface + placa de aquisição + computador).	80
Figura 4.5	Metodologia do sistema de aquisição e análise de sinais ( <i>Software</i> ).	81
Figura 4.6	Painel frontal do módulo de aquisição dos sinais.	82
Figura 4.7	Diagrama de bloco do modulo de aquisição.	83
Figura 4.8	Tela de visualização dos sinais de vibração e corrente.	84
Figura 4.9	Diagrama de blocos do VI de visualização.	85
Figura 4.10	Sinal no domínio do tempo do defeito da pista externa do rolamento.	87
Figura 4.11	Sinal da máquina com defeito no domínio de tempo.	87
Figura 4.12	Espectro do sinal com defeito.	88
Figura 4.13	Envelope do sinal simulado.	89

Figura 4.14	Espectro do Envelope do sinal simulado.	89
Figura 4.15	<i>Cepstrum</i> do sinal do defeito simulado.	89
Figura 4.16	Cadeia de calibração.	91
Figura 4.17	Calibração do sistema de aquisição.	93
Figura 5.1	Bancada experimental. (Motor CC e Gerador Síncrono).	95
Figura 5.2	Banco de resistência.	95
Figura 5.3	Mecanismos de acionamento e controle da bancada.	96
Figura 5.4	Disposições dos acelerômetros.	97
Figura 5.5	Desbalanceamento mecânico rotativo.	99
Figura 5.6	Tipos de desbalanceamento: (a) estático; (b) semi-estático; (c) dinâmico puro; (d) dinâmico (Modificado, Sousa, 2005).	100
Figura 5.7	Elemento BEAM 189.	103
Figura 5.8	Modelo esquemático do gerador e suas respectivas seções.	104
Figura 5.9	Rotor do Gerador com eixo (1), ventilador (2), as chapas de aço (3) e rotor da excitatriz (4).	105
Figura 5.10	Modelo computacional do rotor.	106
Figura 5.11	Modelo do eixo com aplicação dos carregamentos e as restrições.	107
Figura 5.12	Distribuição de tensões no rotor do gerador.	108
Figura 5.13	Deformação eixo do gerador.	108
Figura 5.14	– Posicionamento da massa de desbalanceamento.	109
Figura 5.15	Rolamento dianteiro SKF 6209.	110
Figura 5.16	Cadeia de medição.	112
Figura 5.17	Procedimento experimental para obtenção da frequência de ressonância.	113
Figura 5.18	Função de resposta em frequência do sistema.	113
Figura 5.19	Gráfico da fase da FRF identificando a frequência de ressonância de 820 Hz.	114
Figura 5.20	Gráfico da fase da FRF identificando a frequência de ressonância de 1017 Hz.	114
Figura 5.21	Diagrama de fase para identificar a frequência de ressonância de 1168 Hz.	115
Figura 5.22	Função de coerência do sistema.	115
Figura 6.1	Sinal de vibração no domínio do tempo para o gerador em condição normal de funcionamento.	118
Figura 6.2	Espectro de vibração do gerador em condição normal de funcionamento,	

	em aceleração.	118
Figura 6.3	Espectro de vibração do gerador em condição normal de funcionamento, em velocidade.	118
Figura 6.4	Espectro de vibração do gerador em condição normal de funcionamento, em deslocamento.	119
Figura 6.5	(a)– Espectro de corrente do estator para o gerador em condição normal de funcionamento; (b) – Zoom no espectro de corrente do estator do gerador em condição normal de funcionamento.	119
Figura 6.6	Espectros gerais do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento 6209.	123
Figura 6.7	Espectros filtrados do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento 6209.	123
Figura 6.8	Espectros gerais do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6209.	124
Figura 6.9	Espectros filtrados do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6209.	124
Figura 6.10	Espectros gerais do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento 6211.	125
Figura 6.11	Espectros filtrados do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento 6211.	125
Figura 6.12	Espectros gerais do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6209.	126
Figura 6.13	Espectros filtrados do rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6211.	126
Figura 6.14	Espectros de envelope de aceleração do sinal sem defeito (preto) e sinais com defeito na pista externa (vermelho), o rolamento 6209. Filtro passa – banda de 700 a 2000 Hz.	127
Figura 6.15	Espectros do envelope de aceleração do sinal sem defeito (preto) e sinais com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6209.	128
Figura 6.16	Espectros do envelope de aceleração do sinal sem defeito (preto) e sinais com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento 6211. Filtro de 1500 a 2000 Hz.	128
Figura 6.17	Espectros do envelope de aceleração do sinal sem defeito (preto) e sinais com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento 6211. Filtro	

	de 1500 a 2000 Hz.	129
Figura 6.18	<i>Cepstrum</i> do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho).	129
Figura 6.19	<i>Cepstrum</i> do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho).	130
Figura 6.20	<i>Cepstrum</i> do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho).	130
Figura 6.21	<i>Cepstrum</i> do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho).	131
Figura 6.22	Espectro geral de corrente para o rolamento com defeito na pista externa.	132
Figura 6.23	Espectro de corrente para o rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho).	133
Figura 6.24	Espectro de corrente para o rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho).	133
Figura 6.25	Espectro de corrente para o rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho).	134
Figura 6.26	Espectro de corrente para o rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho).	134
Figura 6.27	<i>Cepstrum</i> do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho).	135
Figura 6.28	<i>Cepstrum</i> do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho).	136
Figura 6.29	<i>Cepstrum</i> do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho).	136
Figura 6.30	<i>Cepstrum</i> do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal do rolamento com defeito na pista interna (vermelho).	136
Figura 6.31	Espectro de vibração em aceleração, do gerador desbalanceado.	138
Figura 6.32	Espectro de corrente do estator do gerador sem defeito e com Desbalanceamento.	139
Figura 6.33	Zoom no espectro de corrente do estator do gerador sem defeito e com Desbalanceamento.	139
Figura 6.34	<i>Cepstrum</i> do sinal de corrente do estator do gerador com desbalanceamento.	140



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Valores de $X_{pico}$ , $X_{rms}$ , $F_c$ , $F_k$ e $K$ .	88
Tabela 4.2	Constantes de calibração dos acelerômetros nas frequências de 30, 60 e 150 Hz.	92
Tabela 4.3	Constantes de calibração dos sensores de corrente.	93
Tabela 5.1	Especificações Técnicas do motor cc e do gerador síncrono.	96
Tabela 5.2	Disposição dos acelerômetros.	97
Tabela 5.3	Características geométricas do modelo do eixo do gerador.	104
Tabela 5.4	Propriedade dos materiais.	105
Tabela 5.5	Carregamentos utilizados na análise estática do rotor.	106
Tabela 6.1	Limites de vibração conforme IEC60034-14, (Fonte: Catálogo Weg).	117
Tabela 6.2	Valores de $X_{pico}$ , $X_{rms}$ , $F_c$ , $F_k$ e $K$ para o gerador em condição normal de funcionamento.	117
Tabela 6.3	Valores de $X_{pico}$ , $X_{rms}$ , $F_c$ , $F_k$ e $K$ , para o rolamento 6209 sem defeito e com defeito nas pistas externa e interna.	121
Tabela 6.4	Valores de $X_{pico}$ , $X_{rms}$ , $F_c$ , $F_k$ e $K$ , para o rolamento 6211 com e sem defeito.	121
Tabela 6.5	Frequências de defeito dos rolamentos.	122
Tabela 6.6	Características dos rolamentos.	122
Tabela 6.7	Comparação dos valores de $X_{pico}$ , $X_{rms}$ , $F_c$ , $F_k$ e $K$ , para o gerador sem defeito e com desbalanceamento.	137

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Posição instantânea do rotor
$\omega$	Velocidade angular do rotor em rad/s
$i_f$	Corrente CC
$H$	Campo magnético
$B$	Indução magnética
$\phi$	Fluxo magnético
$\phi_M$	Fluxo magnético máximo
$\phi_a(\theta)$	Fluxo magnético da fase a
$\phi_f(t)$	Fluxo magnético enlaçado pelas bobinas do estator
$N$	Número de espiras da armadura da fase a
$\Phi_f$	Fasor associado a $\phi_f(t)$
$E_f$	Fasor associado a $e_f(t)$
$e_f(t)$	Força eletromotriz interna da máquina
$i_a, i_b e i_c$	Corrente da armadura fases a, b e c
$A$	Amplitude em m
$\varphi$	Ângulo de fase
$x(t)$	Sinal de vibração em deslocamento
$\dot{x}(t)$	Sinal de vibração em velocidade
$\ddot{x}(t)$	Sinal de vibração em aceleração
$T$	Período em segundos
$f$	Frequência em Hz
$F_{desb}$	Força de desbalanceamento
$X_{rms}$	Valor RMS do sinal em
$X_{pico}$	Valor de pico do sinal em
$F_c$	Fator de crista
$F_k$	Fator K
$k$	Curtose
$p(x)$	Densidade de probabilidade
$\mu$	média
$\sigma$	Desvio padrão
$m$	Momento estatístico

$C_n$	Coefficiente de Fourier
$N_f$	Número inteiro de frequência
$f_s$	Frequência de amostragem
$f_n$	Frequência de Nyquist
$S$	Diferença entre a frequência de rotação da pista interna e a frequência de rotação da pista externa
$S_e$	Frequência de rotação da pista externa
$S_i$	Frequência de rotação da pista interna
$d$	Diâmetro do elemento rolante
$D$	Diâmetro primitivo do rolamento
$\theta_p$	Ângulo de Pressão
$C(\tau)$	<i>Cepstrum</i> do sinal
$\pi$	Constante matemática de valor 3,1459.....
$x(f)$	Espectro de potencia do sinal
$f_{rm}$	Velocidade de rotação da máquina em Hz
$f_e$	Frequência fundamental da corrente elétrica
$f_{rol}$	Harmônicos da corrente da frequência de defeito do rolamento
$f_v$	Frequência de defeito do sinal de vibração
$e$	Excentricidade
$f_{desb}$	Frequência característica do defeito de desbalanceamento
$m_{desb}$	Massa desbalanceadora
$E$	Módulo de elasticidade
$n$	Número de elementos rolantes
$P$	Número de pólos do rotor
$U_{adm}$	Desbalanceamento residual admissível
$e_{adm}$	Desbalanceamento específico admissível
$r$	Raio de posicionamento da massa desbalanceadora

## LISTA DE ABREVEATURAS

Acel	Acelerômetro
ADC	Conversor analógico Digital
BPFI	Frequência de Defeito na Pista Interna ( <i>Ball pass Frequency of the Inner race</i> )
BPFO	Frequência de Defeito na Pista Externa ( <i>Ball pass Frequency of the Outer race</i> )
BSF	Frequência do Elemento Rolante ( <i>Ball Spin Frequency</i> )
CA	Corrente Alternada
CBT	Cabeçote
CC	Corrente Contínua
DFT	Transformada Discreta de Fourier
FFT	Fast Fourier Transform
FTF	Frequência de Defeito na Gaiola ( <i>Fundamental Train Frequency</i> )
GER	Gerador
Lacen	Laboratório Central da Eletronorte
ME	Mancal de Escora
MEF	Método de Elementos Finitos
MGG	Mancal Guia do Gerador
MGT	Mancal Guia da Turbina
PRES	Pressão
RMS	Raiz média quadrática
SKF	Indústria de rolamentos
UHE	Usina Hidrelétrica
VI	Instrumento Virtual
WEG	Indústria de motores e geradores

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos anos na região norte, assim como em todo o Brasil, o consumo de energia elétrica vem crescendo em decorrência de diversos fatores. Diante desse cenário, as empresas responsáveis pelos sistemas de geração e transmissão de energia vêm concentrando esforços na atualização e otimização de projetos, visando ponderar o custo da elevação de potência com o custo da energia gerada por fonte de geração térmica (Horta et al., 2001).

No Brasil, boa parte da energia gerada é fornecida pelas usinas hidrelétricas UHE's. Considerando então a importância dessas unidades para o setor elétrico, o monitoramento das condições de máquinas elétricas tem recebido uma considerável atenção nos últimos anos. Muitas técnicas de monitoramento para detecção de defeitos vêm sendo propostas. Tais técnicas incluem a medição de tensão e corrente estatórica, medição da distância entre rotor e estator (entreferro), densidade de fluxo magnético, vibração, torque de saída e temperatura externa e interna, dentre outros (Liang et al., 2003).

Dentre as empresas operadoras de UHE's no Brasil, destaca-se a Eletronorte, concessionária responsável pelo sistema de geração e transmissão de energia na região Norte, que vem desenvolvendo inúmeros projetos, a fim de atender à demanda de energia que lhe é exigida, e ainda garantir a melhoria na prestação de seus serviços.

Atualmente, a Eletronorte se depara com um problema na usina de Coaracy Nunes, onde uma das unidades que entrou em operação em março/2000 apresentou vibrações excessivas no cabeçote Kaplan, bem como aquecimento irregular no mancal guia. Tais problemas foram analisados em conjunto com o fabricante e chegou-se à conclusão de que estas anormalidades eram causadas por uma irregularidade na circularidade do estator e deslocamento de pólos do rotor. Apesar de terem sido realizadas as devidas correções, houve a necessidade de monitoração do entreferro para manter um maior controle sobre o comportamento dinâmico da estrutura do rotor e estator da máquina. O grande problema é que os sensores atualmente usados estão instalados entre os pólos da máquina, em local de difícil acesso. Em virtude disso, a necessidade de se inspecionar ou fazer a troca de tais sensores

exigem a parada da máquina de pelo menos um dia, o que gera para a empresa um elevado custo, pois para atender à demanda se faz necessário completar o fornecimento de energia com a utilização de uma central termoelétrica.

Dessa forma, o propósito do trabalho é apresentar uma metodologia de identificação de defeitos em máquinas elétricas através do método de vibração e a correlação com a análise da corrente elétrica. Embora em muitas situações os métodos de análise de vibrações sejam utilizados para detectar a presença de falhas em máquinas elétricas, a análise do espectro de corrente pode fornecer indicações similares. Porém, a vantagem de se analisar o espectro de corrente está relacionada, principalmente, ao fato de não ser necessária instalação de sensores no interior ou exterior da máquina, pois, a medição de corrente pode ser realizada diretamente no barramento.

Assim, o objetivo do estudo é a apresentação e validação da metodologia proposta, a fim de subsidiar futuros trabalhos com aplicabilidades em hidrogeradores.

É importante salientar, que o início do desenvolvimento desse trabalho tem origem em um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) realizado em parceria entre as Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A. (Eletronorte) e a Universidade Federal do Pará (UFPA), onde o objeto de estudo era a máquina 3 da UHE de Coaracy Nunes, e que por isso, as atividades necessárias para a execução do trabalho foram planejadas de acordo com as paradas que já haviam sido programadas para essa máquina, o que a disponibilizaria para serem realizadas as atividades. Assim, estavam previstas duas paradas, na primeira foi realizado um levantamento de campo sobre o sistema de monitoramento existente, e na segunda que era para serem instalados os equipamentos que permitiriam as medições dos espectros de corrente para se correlacionar com as vibrações do gerador, mas não foi possível, devido a viabilidades técnicas e econômicas.

Em virtude disso, para que o trabalho tivesse continuidade foi então concebida uma bancada experimental, que tem como objetivo representar o funcionamento da unidade em estudo.

Ressalta-se que a bancada experimental construída não tem o propósito de simular o comportamento dinâmico do hidrogerador. Portanto, a concepção da bancada é permitir um conjunto de situações e comportamentos mecânicos e elétricos, provocados pela indução de defeitos na bancada, de modo a propiciar dados para o desenvolvimento da metodologia de monitoração para estabelecimento de diagnóstico de falhas em máquinas elétricas.

Mais precisamente, essa bancada se propõe a analisar o comportamento vibratório estimulado pela indução de defeitos mecânicos e estabelecer uma possível correlação com a

corrente do estator, de modo a definir uma metodologia de diagnóstico de defeitos semelhante à que seria aplicada no caso do hidrogerador, respeitando suas particularidades.

Dessa forma, durante os ensaios algumas considerações devem ser observadas, pois a bancada experimental opera com uma rotação de 1800 RPM e o hidrogerador com a rotação em torno de 200 RPM. Apesar dessa diferença na condição de operação, o princípio eletromagnético em ambos os casos são semelhantes.

Outro aspecto a ser considerado nos ensaios desenvolvidos na bancada é quanto aos mancais do gerador, já que no caso do hidrogerador eles são de deslizamento e na bancada são de rolamento. Porém os defeitos induzidos nos mancais de rolamento podem em alguns casos contribuir para o desenvolvimento da metodologia no caso do hidrogerador, pois defeitos localizados nas pistas (interna e externa) e nos elementos rolantes do rolamento produzem vibrações na direção radial, ocasionando o deslocamento radial entre o rotor e o estator do gerador, provocando variações no entreferro (*air gap*), conseqüentemente na densidade do fluxo magnético, modificando assim os harmônicos de corrente (Shoen et al., 1995).

Dessa forma, em analogia com o caso do hidrogerador, os defeitos em mancais de rolamento podem ser estudados como um tipo de excentricidade dinâmica do entreferro, já que dependem da posição do rotor (Shoen et al., 1995). Assim, estudar esse tipo de defeito na bancada se fez necessário visto que, no hidrogerador esse tipo de excentricidade pode ser causado por outros fatores, como é o caso de desbalanceamento mecânico também analisado neste trabalho.

## 1.2. OBJETIVOS

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver uma metodologia de diagnóstico de defeitos a partir da correlação dos sinais de vibração e de corrente estatórica.

### *1.2.3. Objetivos Específicos*

- Realizar um levantamento bibliográfico, sobre pesquisas desenvolvidas que utilizam o método convencional de vibração e correlação com a corrente elétrica, na detecção de defeitos em máquinas elétricas;
- Estudar as técnicas de análise de sinais comumente usadas em programas de manutenção preditiva por análise de vibração;
- Desenvolver um sistema de aquisição e análise de sinais de vibração e corrente, utilizando a plataforma *LabView*;
- Verificar a sensibilidade das técnicas de análise de sinais na detecção dos defeitos induzidos na bancada experimental, através dos sinais de vibração e corrente;
- Analisar e comparar os sinais de vibrações e corrente obtidos para o gerador em condição normal de funcionamento e com os defeitos impostos no mesmo.

### 1.3. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A proposta do projeto é o estudo das características dinâmicas do grupo hidrogerador número 3 da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes, situada no Estado do Amapá, e que se encontra sobre a administração da Eletronorte. Este conjunto apresenta grandes amplitudes de resposta de deslocamento devido a condições de excitação eletromecânica diversas. Dentre estas condições, a não circularidade entre rotor e estator é uma das prováveis causas que geram disfunções significativas no que diz respeito ao equilíbrio dinâmico do conjunto (Silva, 2007).

Em virtude disso, o projeto em questão visa estudar o comportamento dinâmico do grupo hidrogerador correlacionando dados de natureza mecânica e elétrica. Nesse sentido, é de interesse verificar se a resposta do sistema, quando submetido a perturbações de ordem mecânica, pode ser medida por grandezas elétricas, e vice-versa. Assim, a existência de um desbalanceamento mecânico, que pode ser captado através da medição de vibração do



sistema, poderia também ser captada pela medição da corrente estatórica, que é uma grandeza elétrica.

Considerando a situação exposta, o desenvolvimento do trabalho foi motivado pela necessidade de se estudar o método de análise da corrente estatórica para de detecção de defeito em máquinas elétricas, a fim de nortear estudos mais detalhados para aplicação em hidrogeradores, pois, por razões de dificuldades técnicas e econômicas a parte experimental desse trabalho foi realizada em uma bancada de teste, instalada no Laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.

Destaca-se ainda, que o estudo sobre identificação de defeitos em máquinas elétricas pelo método da análise da corrente estatórica aplicada a geradores, foi motivado por ser um tema pouco explorado no Brasil.

#### 1.4. METODOLOGIA DO TRABALHO

Inicialmente foi feito um levantamento bibliográfico sobre as pesquisas que foram desenvolvidas na área de análise de sinais, destacando-se as técnicas que normalmente são usadas para diagnóstico de defeitos em máquinas. Além disso, pesquisas que correlacionam variações de níveis de vibrações com o nível de corrente elétrica para identificar defeitos em máquinas elétricas, também foram revisadas. Em complemento, descreveu-se a teoria básica necessária para o desenvolvimento do trabalho e a melhor compreensão dos resultados.

Em seguida, foi desenvolvido o sistema de aquisição e análise de sinais de vibração e corrente, no qual foram implementadas as técnicas de análise de sinais estudadas.

Posteriormente, este sistema foi validado em uma bancada experimental de teste utilizada para a aplicação propositada dos defeitos ocasionados por desbalanceamento e/ou trincas nas pistas (interna e externa) dos rolamentos do gerador da bancada.

Na etapa posterior, foram realizadas as medições dos sinais de vibração e corrente para o gerador em condição normal de funcionamento e com defeito.

Por fim, analisaram-se os resultados obtidos, fazendo as considerações e conclusões relativas às análises dos sinais de vibração e corrente do estator, nas situações impostas.

## 1.5. DESCRIÇÃO DO TRABALHO

**Capítulo 1** – Seu objetivo principal é mostrar a importância do trabalho. Neste capítulo, faz-se um breve comentário sobre a importância de se realizar um estudo que correlaciona o método convencional de vibração e o método de análise de sinais da corrente, para diagnóstico de defeitos em máquinas elétricas. Além disso, este capítulo define toda a metodologia do trabalho.

**Capítulo 2** – Nesta seção foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o assunto a ser estudado. Para isso, foram analisados diversos trabalhos sobre identificação de defeitos em máquinas elétricas, pelo método convencional de vibração e pelo método de análise espectral de corrente. Ainda neste capítulo, destacam-se trabalhos que desenvolveram sistema de aquisição e análise de sinais utilizando a plataforma *LabView 7.0*.

**Capítulo 3** – Neste capítulo apresenta-se a fundamentação teórica necessária para o entendimento e aplicação da metodologia proposta para a detecção de defeitos mecânicos por análise de vibração e correlação com a corrente estatórica de máquinas elétricas.

**Capítulo 4** – Neste capítulo, descreve-se o sistema de aquisição e análise de sinais desenvolvido na Plataforma *LabView 7.0*. Além disso, mostra a simulação de um sinal de defeitos de uma máquina, obtido a partir de equações matemáticas, onde o objetivo da simulação era a verificação das técnicas implementadas no sistema. Finalizando, o capítulo mostra o procedimento de calibração do sistema de medição vibração e de corrente.

**Capítulo 5** – Neste capítulo, apresenta-se a bancada experimental e a forma de aplicação a forma de aplicação dos defeitos no gerador. Além disso, mostra-se o processo para a identificação das frequências de ressonância do sistema, excitadas pelos defeitos nos componentes dos rolamentos.

**Capítulo 6** – Neste capítulo, apresentam-se as medições, os resultados obtidos e as respectivas análises através das técnicas implementadas no sistema, para detecção de defeitos. Os ensaios experimentais foram realizados para a condição normal de funcionamento e para defeitos de desbalanceamento e nos rolamentos do gerador da bancada.

**Capítulo 7** – Finalmente, neste capítulo são feitas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 1.6. HISTÓRICO SOBRE A USINA DE COARACY NUNES

A usina hidrelétrica de Coaracy Nunes, sob administração da Eletronorte, está situada no município de Ferreira Gomes-AP, possui atualmente três unidades geradoras com capacidade nominal de 70 MW (Fig. 1.1). Em 1975, quando a usina entrou em operação, possuía apenas duas unidades geradoras do tipo Hitachi com turbina Kaplan de 20 MW cada, mas devido ao crescimento populacional da região, esta usina passou por um processo de repotencialização no fim da década de 90, que elevou a capacidade nominal dessas unidades de 20 MW para 24 MW cada. Além disso, uma terceira unidade, composta de um hidrogerador e uma turbina do tipo Kaplan, de eixo vertical, com capacidade nominal de 30 MW (Voith-Siemens), entrou em operação em março de 2000.

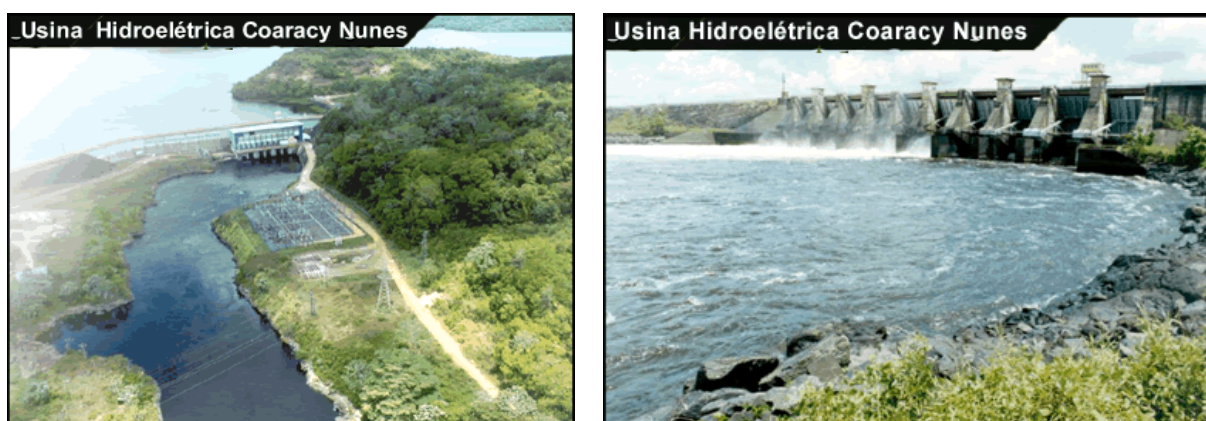


Figura 1.1 – Vistas da UHE de Coaracy Nunes (Fonte: Eletronorte).

Em setembro do mesmo ano, foram realizadas medições e análises de vibrações, com a finalidade de levantar os espectros de vibrações e diagnosticar as condições atuais de funcionamento dessas máquinas. Após as análises, foi constatada a presença de vibrações excessivas e aquecimento do mancal guia. Esses problemas foram analisados juntamente com o fabricante e chegou-se à conclusão de que estas anormalidades eram causadas por uma irregularidade na circularidade do estator e pelo deslocamento de pólos do rotor do gerador elétrico.

Com esse diagnóstico, foram realizadas as devidas correções, entretanto, houve a necessidade de monitoramento do entreferro para manter um controle maior sobre o comportamento dinâmico da estrutura do rotor e do estator das máquinas.

Dessa forma, a Eletronorte empresa responsável pela geração de energia dessa região, desenvolveu juntamente com o Cepel (Centro de Pesquisa de Energia elétrica), um sistema de monitoramento das unidades geradoras. Esse sistema chamado de *Monithidro Coaracy Nunes*, monitora tanto os parâmetro de processo quanto os de operação como: temperaturas, pressões, vibração, cavitação, níveis de óleo, descargas parciais, valor de entreferro e outros.

Na Fig. 1.2 pode-se observar as partes constituintes deste sistema de monitoramento. Este sistema é constituído de transdutores que capturam as informações do sistema e as envia, na forma de sinais elétricos, para um condicionador de sinais, que é responsável pelo tratamento dos sinais dos transdutores, sua amplificação, compensação da resistência e capacitância dos cabos. Esses sinais são enviados para o DIAHGER (Monitoramento e Diagnóstico de Hidrogeradores), que é o *Software* de aquisição de dados instalado em um computador industrial, com visualização em tempo rea. Essas informações são enviadas por meio de cabos para as instalações locais e via satélite para instalações remotas da Eletronorte.

O DIAHGER é um sistema inteligente para diagnóstico precoce de falhas e monitoração contínua de parâmetros operacionais e de processo em hidrogeradores. Este programa atende às necessidades das empresas de geração de energia elétrica, reduzindo custos de manutenção e aumentando a disponibilidade das unidades hidrogeradoras. O DIAHGER fornece o diagnóstico precoce de falhas em turbinas, geradores e máquinas auxiliares, utilizando técnicas de monitoração em tempo real para detecção de comportamento anormal, com auxílio de sistemas inteligentes para a função de diagnóstico (Cepel, 2006).

O acompanhamento da condição operativa da máquina é realizado a partir de grandezas cuja relevância é comprovada para cada instalação, inclusive com medições particulares às necessidades da usina. A partir do cruzamento dos sinais medidos, o sistema indica as prováveis causas do comportamento anormal das unidades geradoras. Este processo é baseado em critérios particulares de cada máquina, que são levantados e ajustados previamente com a participação dos profissionais de operação e de manutenção da usina.

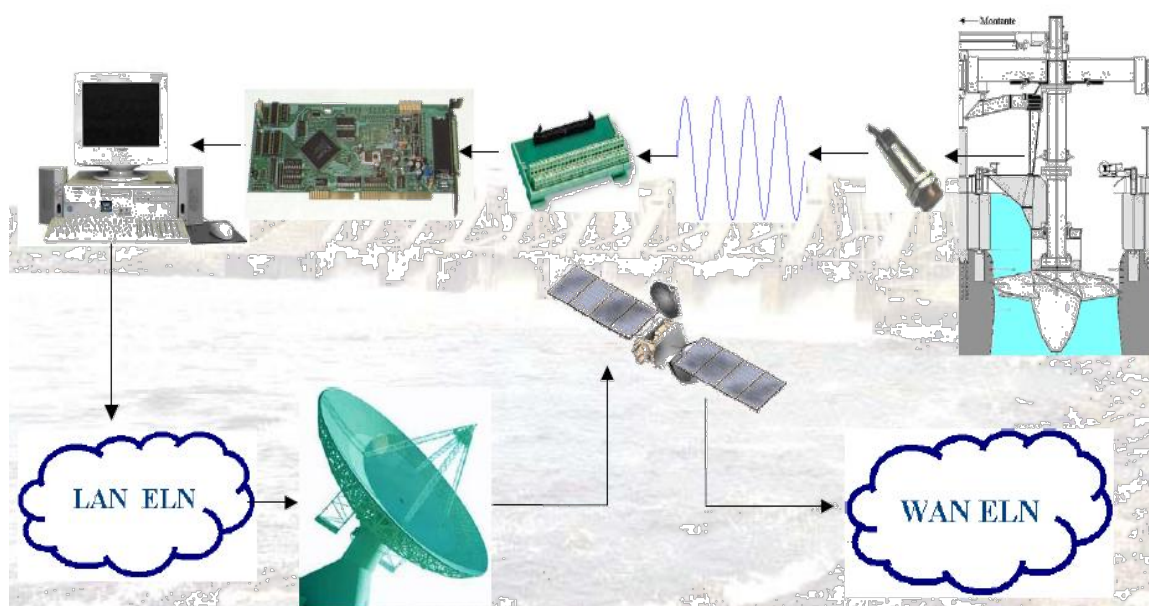


Figura 1.2 – Instrumentação Virtual do Sistema Monithidro Coaracy Nunes (Fonte: Cepel, 2006)

A Fig. 1.3 mostra a arquitetura da rede do sistema *Monithidro Coaracy Nunes*.

- Plataforma aberta de hardware tipo COMPACT PCI (PC padrão industrial) operando em Windows 98/2000(NT);
- Aquisição e distribuída de sinais com visualização em tempo real;
- Customização às necessidades da usina;
- Detecção de eventos adaptável ao ponto de operação da unidade;
- Acesso remoto;
- Banco de dados relacional padrão SQL;
- Controle de acesso por senha;
- *Auto-check* de sensores;
- Gráficos de tendência para as diversas grandezas monitoradas;
- Ferramentas numérico-gráficas para processamento e análise de sinais;
- Sistema especialista para diagnóstico automático de falhas incipientes;
- Conectividade com Sistemas de Supervisão, Proteção e Controle.

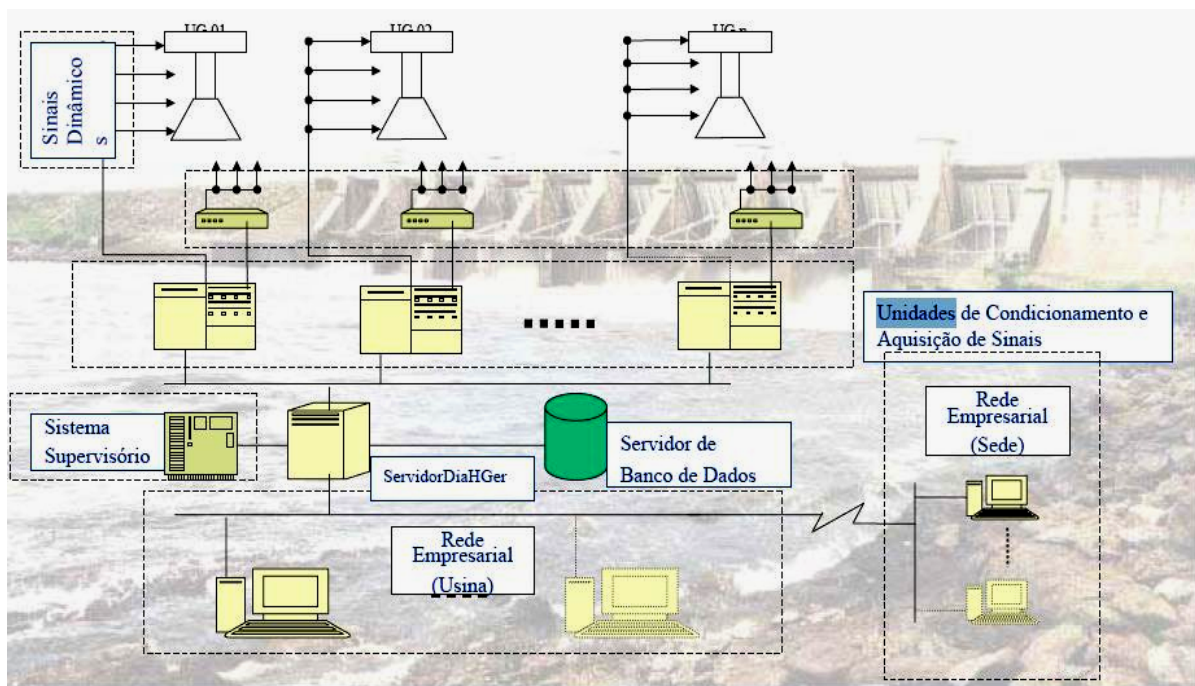


Figura 1.3 – Arquitetura da Rede do Sistema Monithidro Coaracy Nunes, CEPEL (2006)

A Fig. 1.4 esquematiza a metodologia do Sistema DIAHGER, que apresenta as seguintes características:

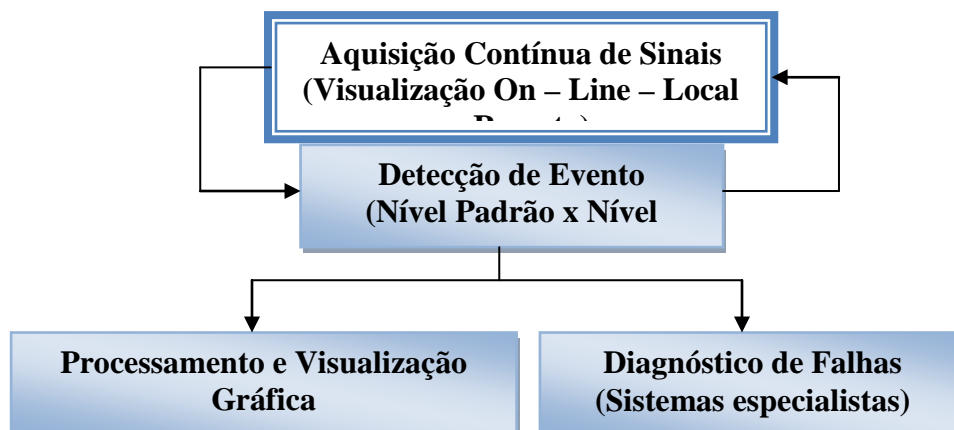


Figura 1.4 – Metodologia do Sistema DiaHGer

Na Fig. 1.5 pode ser observado uma janela do Sistema DIAHGER.

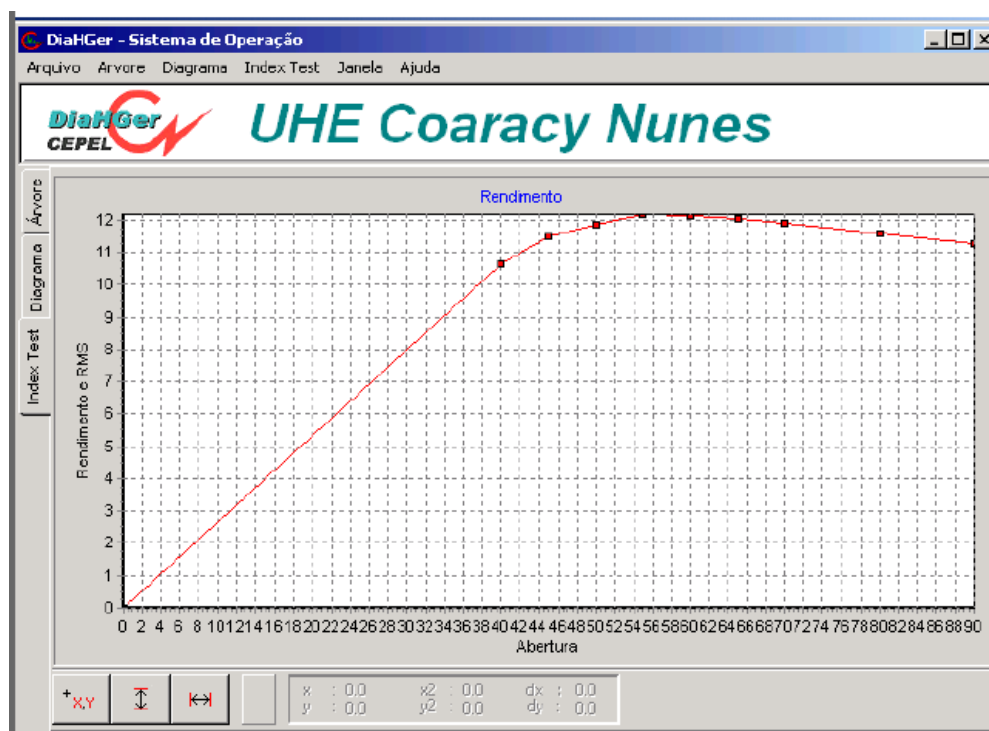


Figura 1.5 – Janela do Software DIAHGER

O sistema de monitoramento foi implementado para monitorar as três unidades geradoras existentes na UHE de Coaracy Nunes, mas, como já mencionado anteriormente, a máquina referência na elaboração desse trabalho é a unidade 3, e que por isso, as informações listadas a seguir referem-se a esta unidade.

Para o monitoramento dessa unidade, foram instalados sensores nos seguintes pontos da máquina:

**MGG:** 2 sensores de proximidade e 2 de vibração, localizados no Mancal Guia do Gerador a 0° e a 90° a Montante (Localizado na parte inferior do Gerador, para a UHG03);

**MGT:** 2 sensores de proximidade e 2 de vibração, localizados no Mancal Guia da Turbina a 0° e a 90° a Montante;

**ME:** 2 sensores de proximidade localizados no Mancal de Escora a 0° e a 90° a Montante;

**CBT:** 2 sensores de proximidade localizados no cabeçote a 180° e 270° a Montante;

**GER:** 3 sensores de aceleração localizados a 0°, 120° e 240° a Montante;

**PRES:** 3 sensores de pressão localizados na Caixa Espiral, Tampada da Turbina e Tubo de Sucção.

Na Fig. 1.6 tem-se o diagrama esquemático da unidade geradora com as localizações dos sensores.

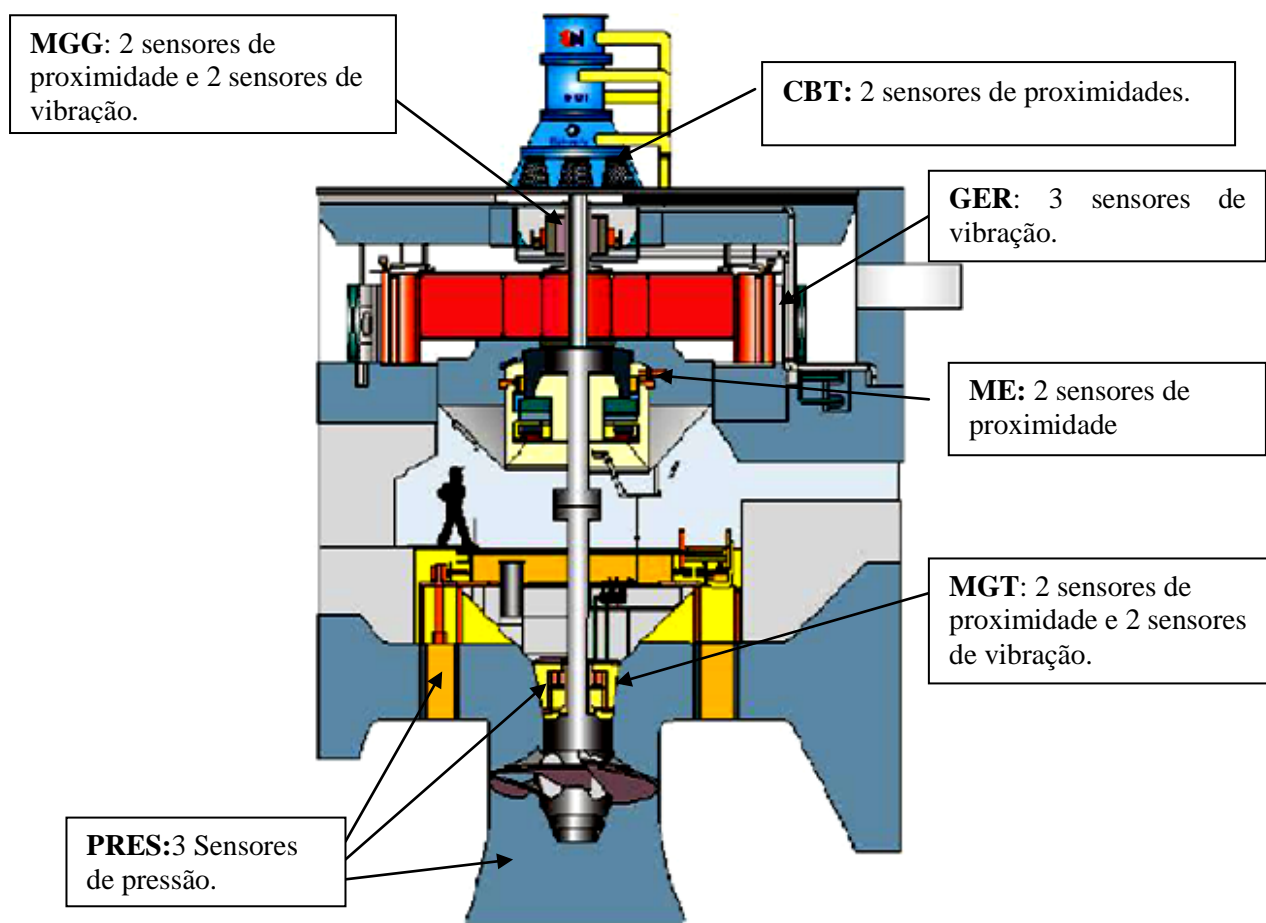


Figura 1.6 – Diagrama de localização dos Sensores da Unidade geradora 3 da UHE de Coaracy Nunes

O sistema utilizado atualmente pela Eletronorte apresenta uma série de vantagens, que contribui significativamente na detecção de comportamento anormal das unidades geradoras, porém, a empresa vem enfrentando um sério problema, devido os sensores que se encontram instalados em locais de difícil acesso. Assim, a necessidade de se de realização de manutenção desses sensores exigem a parada da máquina de pelo menos um dia, o que gera para a empresa um alto custo, em função da sua substituição da unidade geradora por uma central termoeétrica.



## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é feita uma revisão sobre o monitoramento de defeitos em máquinas. Primeiramente, são apresentadas descrições resumidas sobre os trabalhos desenvolvidos que utilizam os sinais de vibração e corrente na identificação de defeitos em máquinas elétricas. Posteriormente, é dado ênfase aos trabalhos que abrangem as técnicas de detecção de defeitos por análise de vibração. Por fim, destacam-se alguns trabalhos que desenvolveram sistemas de aquisição e análise de sinais utilizando a plataforma *LabView*.

#### **2.2. MONITORAMENTO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO E CORRENTE PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

O monitoramento de vibrações para indicar a saúde da máquina é muito usado e seus resultados contribuem substancialmente para prever e evitar falhas de equipamentos na indústria em geral. Cameron et al. (1986) relatam que, embora em muitas situações os métodos de monitoramento de vibrações sejam utilizados para detectar a presença de falhas em máquinas elétricas, o monitoramento do espectro de corrente pode fornecer indicações similares. As vantagens de monitorar o espectro de corrente estão relacionadas, primeiramente, ao fato de não ser necessário o acesso à máquina, pois a medição de corrente pode ser realizada distante da mesma; segundo, os testes padrões no sinal de corrente são únicos para o circuito de falhas em rotores.

Assim, em meados dos anos 80 foram publicados os primeiros trabalhos com ênfase em técnicas de monitoramento do espectro do sinal de corrente de motores elétricos. Esses trabalhos mostram que essas técnicas de monitoramento são sensíveis para prever a maioria dos defeitos encontrados em motores elétricos. A partir desse momento, o tema despertou o interesse de diversos pesquisadores, como: Cameron et al. (1986), Kliman et al (1992),

Schoen et al. (1993 e 1995); Riley et al (1998 e 1999), Benbouzid et al. (1999); Liang et al. (2003).

Cameron et al. (1986) desenvolveram pesquisas que resultaram em expressões matemáticas que determinam as frequências características das vibrações a partir dos harmônicos da frequência da corrente do estator de um motor de indução trifásico.

Shoen et al. (1993) realizaram um estudo direcionado à análise do espectro de corrente na detecção de defeitos em mancais de rolamento de máquinas de indução. Nesse estudo, os efeitos no espectro de corrente do estator, provocados pelo defeito nos rolamentos, são descritos e relacionadas com frequências específicas. Os resultados experimentais mostram que a análise espectral do sinal de corrente pode ser usada na detecção de defeitos de mancais de rolamento de motores de indução.

Em complemento aos seus estudos, Shoen et al. (1995) desenvolvem um sistema de monitoramento de detecção de defeito em motores de indução através da corrente do estator. Esse sistema utiliza rede neural artificial que treina as características do motor em condição normal de operação. Além disso, um filtro de frequência é trabalhado para selecionar apenas as frequências de interesse durante o processo de monitoramento. O algoritmo de detecção foi implementado e seu desempenho verificado satisfatoriamente em vários tipos de defeitos encontrados em motores de indução.

Ainda nesse período, Riley et al. (1998) fazem um estudo em motores elétricos relacionando a magnitude da vibração e da corrente harmônica para uma frequência conhecida, com o objetivo de determinar a praticidade de um modelo padrão ou limite de corrente devido à vibração. Os autores concluem, através de resultados obtidos em ensaios experimentais, que o nível RMS da corrente harmônica e o nível RMS de vibração harmônica são correlacionáveis.

Posteriormente, Riley et al. (1999) publicam um trabalho baseado em análises teóricas, simulações e resultados experimentais em motores elétricos, que mostra a possibilidade de se assumir uma relação linear entre a variação de corrente harmônica e a variação de vibração para uma determinada frequência. Os autores mostram ainda, que essa relação de linearidade pode, em alguns casos, ser objeto de erros causados pelo fato de que as vibrações tendem a ser não lineares no tempo, devido à complexidade entre a carcaça do estator e entreferro (*air gap*) dos motores elétricos.

A partir desse momento, várias pesquisas foram desenvolvidas tendo como ponto principal o estudo de técnicas de processamento e análises de sinais para monitoramento da corrente do estator.

Benbouzid et al. (1999) realizam estudos de análise de sinais de corrente para detectar falhas em motores, usando técnicas avançadas de processamento de sinais, com alta resolução do espectro. Essa técnica favorece para uma melhor interpretação no espectro de corrente de um motor de indução. Resultados de experimentos mostram que a alta resolução espectral é bastante sensível para detectar falhas em motores de indução, modificando as principais componentes do espectro.

Kliman et al (1999) usam a Transformada Curta de Fourier (STFT) como método de processamento de dados para identificar falhas de sinais de corrente de motores elétricos. Suas conclusões mostram que embora a STFT seja melhor que a Transformada de Fourier normal em termos de resolução, ela ainda é limitada em análises de processos não estacionários devido à largura constante da janela.

Benbouzid e Nejari (2000) apresentam em seu trabalho uma metodologia de como as falhas elétricas de motores de indução podem ser diagnosticadas. A metodologia proposta é baseada na aproximação do Vetor de Park. Os testes padrões do Vetor de Park são adquiridos primeiramente usando ANN's (Redes Neurais Artificiais), as quais são criadas a partir de algoritmos projetados para uma determinada finalidade e, então, usados para discernir o estado de saúde nos motores de indução.

Almeida (2002), em um trabalho apresentado sobre análise de falhas em compressores de parafusos, mostra que o diagnóstico de problemas em estator ou rotor de um motor elétrico pode ser feito pela medição da corrente que alimenta o motor. Entende-se que a monitoração da corrente elétrica permite uma avaliação com maior definição e clareza, uma vez que analisa a condição magnética diretamente na fonte geradora de eventual problema, tornando-se uma boa ferramenta para determinar as condições do motor, em relação a sua parte elétrica.

Liang, et al (2003) mostram através de experimentos que a falha de assimetria no estator e rotor de motores de indução trifásicos pode ser analisada pelos métodos de vibração, corrente e análise da velocidade transiente do rotor.

Lamim Filho (2003) propõe uma metodologia de baixo custo na qual o autor usa o monitoramento do fluxo magnético no acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos, através da detecção de falhas elétricas e mecânica. Para a realização desse trabalho, foi confeccionado um transdutor (bobina de fluxo) sensível às ondas eletromagnéticas dentro dos motores de indução trifásicos, identificando as frequências determinísticas relacionadas aos defeitos comuns a estes tipos de máquinas. Os espectros coletados com este sensor são comparados com um sensor comercial, mostrando sua eficiência e aplicabilidade.

Li e Mechefske (2006) mostram a comparação de resultados para detecção de falhas usando os métodos de análise através da corrente, vibração e acústica. Uma combinação de falhas de barra quebrada do rotor e falhas no rolamento (pista interna, pista externa e elementos rolante) foi induzida além da variação da velocidade e carga do motor de indução. Os resultados mostram que o sucesso na detecção de defeitos em motores de indução, depende da seleção adequada do método de monitoramento. Sendo, o método de corrente sensível para detectar falhas de origem elétricas, o método de vibração sensível na detecção dos defeitos mecânicos e o método acústico pode ser usado como um complemento dos métodos, quando existe a forte presença de ruído e interferência.

### 2.3. REVISÃO SOBRE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS.

Todas as máquinas e equipamentos apresentam características determinadas, que se alteram com o tempo em função dos desgastes provocados pelo uso intermitente ou contínuo dos mesmos. Assim, quando um equipamento, máquina ou conjunto apresenta importância elevada à instalação, seja devido a sua importância na produção da unidade, seja pelo valor econômico alto e de reposição ou reparo excessivamente oneroso, há não somente a necessidade, mas a conveniência técnica e econômica em monitorá-lo de maneira adequada (Nepomuceno, 1989). Em alguns casos, devido à complexidade de determinados equipamentos, o monitoramento adequado exige a utilização de métodos bastante sofisticados.

Os métodos que envolvem mediadas de vibração são os mais usados. Esses métodos são subdivididos em: técnicas no domínio do tempo, da frequência e no domínio tempo-frequência. Neste trabalho é estudado apenas os métodos no domínio do tempo e no domínio da frequência. Vale ressaltar ainda, que atualmente existe uma vasta literatura sobre os métodos de medição de vibração, porém, neste trabalho destaca-se as literaturas que mais contribuíram para o seu desenvolvimento.

Antoniolli (1999) em seu trabalho faz um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de defeitos em máquinas, Neste estudo, é dada maior ênfase as técnicas de identificação de defeitos em rolamentos.

A seguir destacam-se alguns trabalhos que estudam aplicabilidades dessas técnicas.

### **2.3.1. *Nível Global (RMS)***

Nepomuceno (1989) ressalta que o método do nível global, embora constitua um procedimento excelente para evitar situações graves, não permite um diagnóstico preciso para localizar e determinar qual a origem do nível excessivo de vibrações.

Segundo Lenzi (1991), o nível global de vibrações representa um primeiro passo no monitoramento de vibrações, proporcionando informações básicas para a verificação das condições de funcionamento e para o acompanhamento das vibrações. Essa técnica permite apenas detectar desbalanceamento, desalinhamento grosseiro e eixos empenados (fletidos), os quais produzem altos níveis de vibrações.

### **2.3.2. *Fator de Crista (Fc)***

Segundo Nepomuceno (1989), o fator de crista é considerado um processo que apresenta resultados excelentes e bastante confiáveis.

Em Gerges e Nunes (1996), o fator de crista é definido como a razão do valor de pico em relação ao valor RMS medido na faixa de frequência entre 1 kHz e 10 kHz. Este método apresenta muitas limitações.

Antoniolli (1999), em várias análises usando o fator de crista, mostra que essa técnica pode ser usada com segurança na detecção e acompanhamento da progressão dos defeitos, com a vantagem de se trabalhar com equipamentos de baixo custo.

Bezerra (2004) mostra que o fator de crista quando usado para detectar defeitos em rolamentos apresenta uma tendência de decréscimo em seu valor à medida que a velocidade de rotação da máquina aumenta, mas quando o defeito aumenta não ocorre uma tendência definida.

Mitchell (1993), apud Bezerra (2004), afirma que o fator de crista é mais eficiente que o nível RMS na detecção de falhas incipientes em rolamentos, mas para detectar falhas severas o método não é apropriado, pois à medida que a falha propaga-se pela superfície da pista, o valor de pico permanece praticamente inalterado, enquanto o RMS cresce provocando uma diminuição do fator de crista. Para resolver esse problema, o autor propõe o uso do fator K que é o produto entre o valor RMS e o valor de pico.

### **2.3.3. Curtose (K)**

De acordo com Lenzi (1991), esta técnica mostra-se razoavelmente insensível às variáveis como velocidade de rotação e carga, pois os picos gerados no sinal de vibração podem ser causados por outros defeitos, como folga mecânica, atritos, lubrificação deficiente, cavitação entre outros, os quais podem levar a alarmes falsos quando o objetivo for apenas diagnosticar defeitos em rolamentos.

Bezerra (2004) mostra que a curtose é mais sensível ao tamanho da falha em rolamento para baixas velocidades e tem a tendência de não identificar a presença de defeitos à medida que a velocidade aumenta.

### **2.3.4. Análise Espectral**

A análise espectral foi utilizada em análise de sinais de vibração, pelo fato de poder identificar as componentes que indicam defeitos, através da comparação do espectro medido com um espectro de assinatura, o qual apresenta os níveis de vibração das componentes de frequência características da máquina em condições de operação adequadas (Lenzi, 1991).

Antoniolli (1991) cita que uma das grandes vantagens da análise espectral é a possibilidade de ser prematura a detecção dos defeitos, sendo isso possível em virtude da análise espectral indicar o nível de vibrações em todas as frequências características das máquinas.

Arato Junior (2004) mostra como estudo de caso, as medições de vibrações realizadas em um hidrogenador com turbinas Kaplan. Os resultados dessas medições, utilizando o método espectral, mostraram claramente um possível desalinhamento dos mancais guia do gerador, caracterizado pelo aparecimento de um grande número de harmônicos da frequência fundamental.

### *2.3.5. Técnica do Envelope*

A importância da técnica do envelope é a possibilidade de se analisarem componentes de vibração de altas frequências em baixas frequências. Sua aplicação é utilizada para diagnosticar defeitos em componentes mecânicos que geram impactos durante sua operação, dentre os quais podem-se destacar os rolamentos.

Nunes (1989) desenvolve um trabalho de diagnóstico de defeitos em rolamentos através da técnica do envelope. Neste trabalho, o autor mostra a diferença entre um sinal produzido por uma falha na pista estacionária (neste caso, pista externa) e o sinal produzido por uma falha na pista girante (neste caso, pista interna). No primeiro caso, a falha sempre estará sujeita a uma carga, e o impacto resultante terá sempre a mesma amplitude. No segundo caso, a falha também se move e, algumas vezes, fica fora da região de carga, causando modulação na amplitude do impacto por causa da rotação do eixo. Isso dificulta a análise direta do espectro de vibração do mancal de rolamento, sendo necessária a utilização da técnica do envelope na identificação desses defeitos.

Os ensaios experimentais realizados por Nunes (1989) geram diversas conclusões referentes aos resultados obtidos a partir da análise da técnica do envelope para detecção de defeitos em rolamentos. Essas conclusões mostram que essa técnica se revelou muito poderosa, segura e eficaz na identificação dos defeitos nesse componente mecânico.

Antoniolli (1999) compara técnicas de análise de vibração em sinais obtidos a partir da indução de defeitos em rolamentos. Os resultados mostram que, através da técnica do envelope, pode-se definir uma proporcionalidade entre o aumento do defeito e a amplitude de aceleração resultante. O autor mostra também que a utilização de um filtro adaptativo trouxe uma melhora significativa à técnica do envelope, possibilitando identificar a falha na gaiola que normalmente não é possível usando simplesmente a técnica do envelope.

Santos (2004) aplica a técnica do envelope em uma rotina computacional utilizando a linguagem MATLAB, validando essa rotina através de testes experimentais em um motor elétrico.

### **2.3.6. Cepstrum**

Segundo Lenzi (1991), cepstrum é definida como sendo uma técnica de análise importante, porque detecta periodicidade em um espectro. Essas periodicidades podem ser causadas pela modulação de um sinal em amplitude e frequência que se estendem por uma ampla faixa de frequência.

Dessa forma, as conclusões de alguns trabalhos mostram que essa técnica é usada, principalmente, para detectar defeitos em engrenagem e rolamentos.

Bezerra (2004) faz um trabalho de estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamento utilizando o sinal vibratório. Dentre as técnicas, cepstrum conseguiu identificar a maioria das falhas presentes nos rolamentos, apresentando uma maior dificuldade na detecção de defeito na gaiola.

Barkov e Barkova (2004) apresentam um estudo sobre a avaliação da condição e previsão de vida de rolamentos, além de se analisar a utilização do cepstrum na identificação de defeitos nos mesmos. Uma característica citada como vantajosa no uso do método de cepstrum é que cada máquina tem sua própria banda de frequências, onde os defeitos do rolamento se manifestam de maneira mais clara. Os autores concluem mostrando a viabilidade do uso dessa técnica para identificação de falhas incipientes.

Esta técnica possibilita a identificação de famílias de picos harmônicos presentes no espectro de frequência do sinal. A aplicação do logaritmo na amplitude enfatiza os picos harmônicos e reduz a influência de qualquer aleatoriedade imposta pelo caminho percorrido pelo sinal da falha até o ponto de aquisição do sinal (Randall & Tech, 1987 *apud* Bezerra, 2004).

Segundo Barkov & Barkova (1995), *apud* Bezerra, (2004), quando o defeito ocorre na pista girante do rolamento, no cepstrum do sinal aparece um pico cujo valor inverso do tempo ao qual o mesmo corresponde, é igual à frequência de rotação do eixo, que é moduladora do sinal. Se o defeito é na pista estacionária, aparecem vários picos com espaçamentos iguais. O valor inverso do tempo de espaçamento dos picos é igual à frequência do defeito.



## 2.4. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS

Grimoni e Lopes<sup>1</sup> mostram os resultados de um projeto no qual foram desenvolvidos uma série de programas utilizando o software *LabView* da *National Instruments* para automatizar a aquisição, tratamento, visualização e armazenamento de sinais de diversas experiências na área de sistemas de energia elétrica. Os autores mostram as vantagens do uso desta ferramenta de aquisição e tratamento de dados, como a possibilidade de monitorar muitos pontos simultaneamente e também a possibilidade de gravar os dados em arquivo para posterior análise no próprio *LabView* ou em outras ferramentas computacionais.

Ribeiro<sup>1</sup> *et al.* implementam uma ferramenta computacional, criada para a aquisição de dados via computador, num protótipo experimental de bomba de calor por absorção água-amônia (H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>) movida a gás natural. Este sistema computacional efetua a amostragem, manipulação e apresentação dos dados através de interfaces gráficas de alta qualidade empregando o *LabView*.

Sousa (2005) desenvolve um sistema aplicativo programado em *LabView* e *Microsoft SQL Server*, para o balanceamento de rotores com a aquisição direta de dados, dispensando a utilização de inúmeros equipamentos de coleta e análise de sinais de vibração, utilizando somente um computador (ou laptop) com uma placa de aquisição de sinais, responsável por coletar, analisar e tratar os sinais provenientes dos sensores, fornecendo dados para a identificação e correção de desbalanceamento mecânico em máquinas rotativas.

O *LabView* é um programa que permite trabalhar com aquisição de dados. O sistema de aquisição de dados é uma combinação de *software*, *hardware* do tipo placas de aquisição de dados, sistemas de condicionamento de sinal e microcomputador, que em conjunto possibilitam a análise de sinais e controle de processos. A Fig. 2.1 mostra um esquema de um sistema de aquisição de dados.

---

<sup>1</sup> Artigos sem referências de datas



Figura 2.1 – Esquema de um sistema de aquisição de dados

Nery (2006) elaborou uma apostila de treinamento sobre o software *LabView*. Nessa apostila, com base no manual de usuário do software, mostra que o *LabView* é um *software* baseado na linguagem G (linguagem de programação gráfica) que emprega ícones ao invés de textos para criar aplicações. Em contraste com as linguagens de programação baseadas em textos (linhas de comando), onde as instruções determinam a execução do programa, a programação em *LabView* está baseada no fluxo de dados, onde os dados determinam a execução, trazendo algumas vantagens para aplicações científicas e de engenharia, principalmente em aplicações de aquisição e manipulação de dados.

Nesta plataforma, os aplicativos são desenvolvidos pelo usuário com o uso de um conjunto de ferramentas e objetos que possuem funções para aquisição, análise e apresentação dos dados. Os códigos são adicionados no diagrama de blocos usando representações gráficas de funções para controlar os objetos adicionados no painel frontal. Depois de criado o diagrama de blocos é compilado para linguagem de máquina.

A Fig. 2.2 mostra um exemplo de painel frontal, que é a interface do usuário. Neste painel têm-se gráficos, botões, menus, controles, indicadores e outros dispositivos que se assemelham a um equipamento real.

O diagrama de bloco apresentado tem um código fonte gráfico, que realiza todos os comandos do programa criado.

Na Fig. 2.3 tem-se um exemplo simples e de fácil entendimento de diagrama de bloco, com seu respectivo painel frontal mostrado na Fig. 2.4.

Os aplicativos desenvolvidos na plataforma *LabView* são chamados de instrumentos virtuais (VIs), porque sua aparência e operação imitam instrumentos físicos, tais como: osciloscópios e multímetros. Cada VI tem funções que manipulam a entrada, pela interface do usuário ou de outras fontes, e indicam essa informação ou a movem para outros arquivos ou outros computadores.

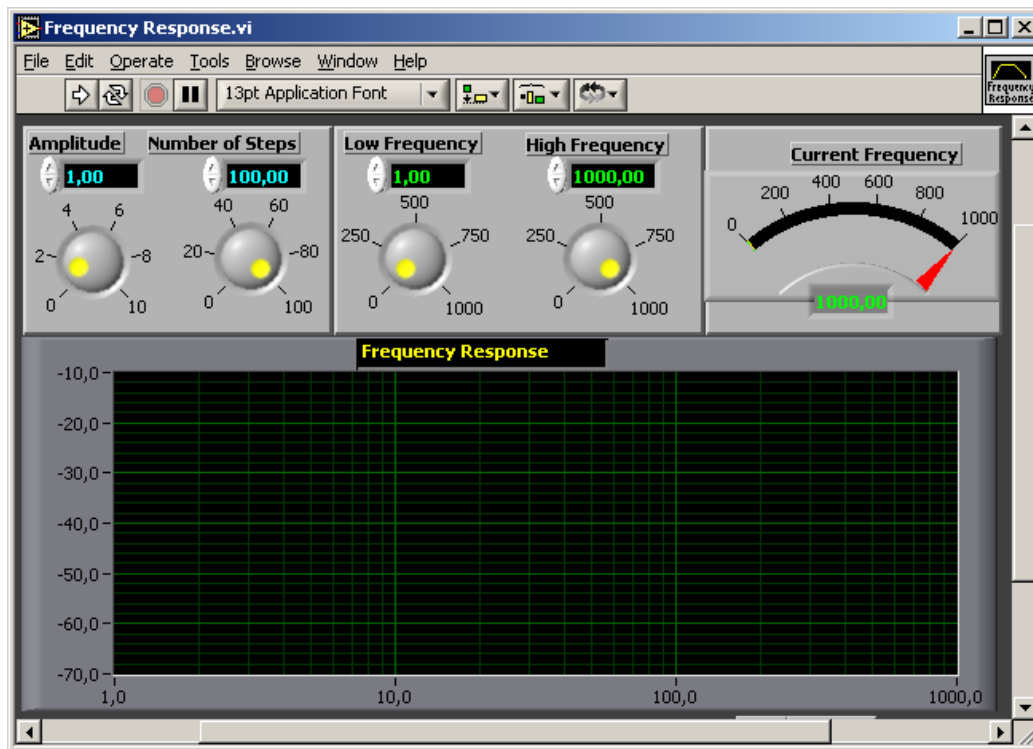


Figura 2.2 – Painel Frontal, (Fonte: *National Instruments, LabVIEW-User Manual, 2000*)

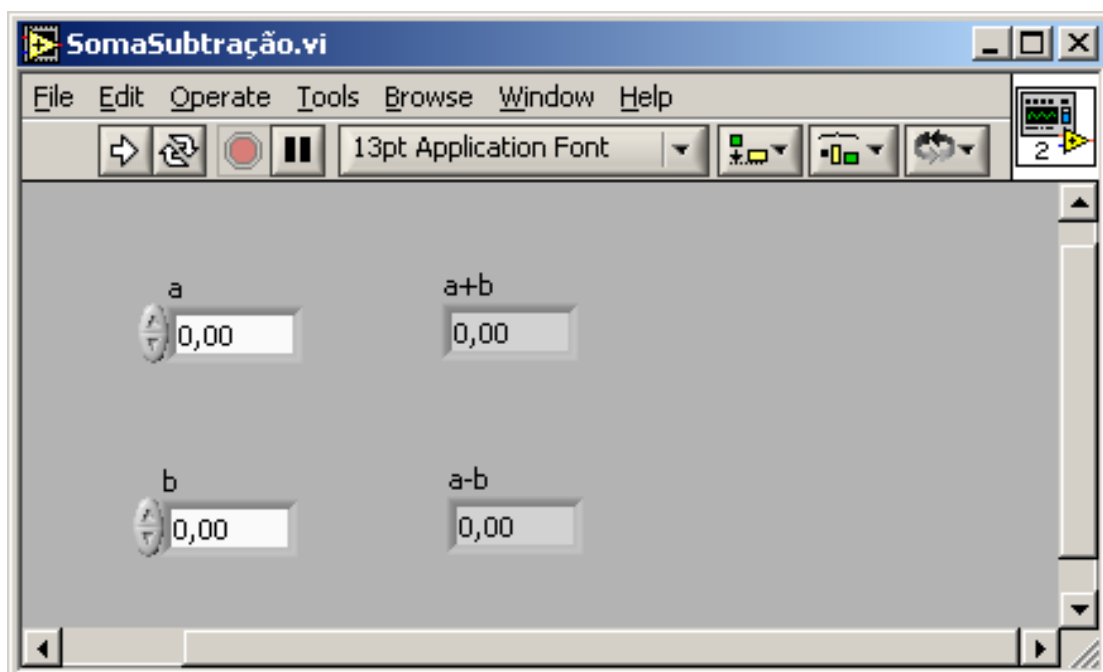


Figura 2.3 – Painel frontal

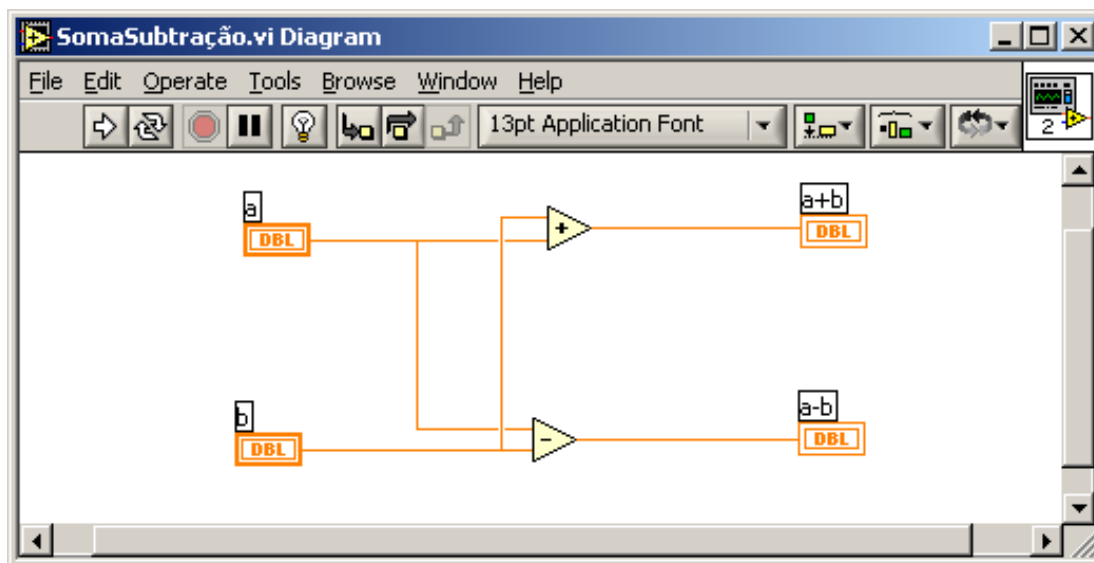


Figura 2.4 – Diagrama de blocos

## 2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o desenvolvimento desse trabalho, diversas literaturas foram analisadas e tiveram sua importância. Porém, para se atingir o objetivo do trabalho, pode-se destacar que as literaturas relacionadas ao estudo dos sinais de corrente foram as que mais contribuíram para o seu desenvolvimento, pois, apesar de ser uma técnica que vem sendo estudada desde 1980, no Brasil essa técnica está em processo inicial de implantação, quando comparada às técnicas de detecção de defeitos por análise de vibrações que já estão consolidadas.

## **CAPÍTULO 3**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica necessária para o entendimento e aplicação da metodologia proposta neste trabalho, para a detecção de defeitos mecânicos por análise de vibração e correlação com a corrente estatórica.

Inicialmente, descreve-se de forma breve a teoria relacionada ao princípio de funcionamento de geradores síncronos. O objetivo é facilitar o entendimento dos defeitos introduzidos no gerador (sem defeito, desbalanceamento mecânico e defeitos nos rolamentos) e a influencia desses defeitos na corrente do estator.

Em seguida, são mostrados os fundamentos de vibração mecânica e de que forma a alteração nos sinais de vibração de uma máquina pode indicar defeitos em seus componentes.

Além disso, estudam-se as técnicas de análise de sinais de vibração comumente usadas na identificação de defeitos em máquinas sendo elas: valor RMS, valor de pico, fator de crista, fator K, curtose, análise espectral, envelope de aceleração e cepstrum.

Finalizando, embasados por trabalhos científicos, apresenta-se equações matemáticas que calculam a partir das frequências de vibração as frequências harmônicas características, que surgem no espectro de corrente em função de um defeito mecânico.

#### **3.2. GERADORES SÍNCRONOS.**

A teoria sobre geradores síncronos são tratadas brevemente nos dois tópicos a seguir. O objetivo principal é descrever os fenômenos relacionados ao funcionamento dessas máquinas. Informações complementares podem ser obtidas em (Nasar, 1984).

3.2.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de um gerador é baseado na Lei da indução eletromagnética de Faraday, sendo que a *fem* é devida ao movimento relativo entre os condutores e o fluxo magnético. No caso do gerador síncrono, os enrolamentos localizados na parte fixa são normalmente chamados de enrolamento da armadura. Os enrolamentos localizados na parte girante são chamados de enrolamento de campo. Os enrolamentos de campo giram pela ação da máquina primária. O movimento relativo entre o enrolamento da armadura faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga, a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga. A potência mecânica transferida pela máquina primária é assim convertida em energia elétrica (descontadas as perdas). O enrolamento de campo é alimentado por uma fonte de corrente contínua por meio de excitatrizes, que se montadas no eixo e por dispositivos a base de semicondutores. O gerador síncrono produz uma tensão do tipo alternada senoidal, normalmente trifásica.

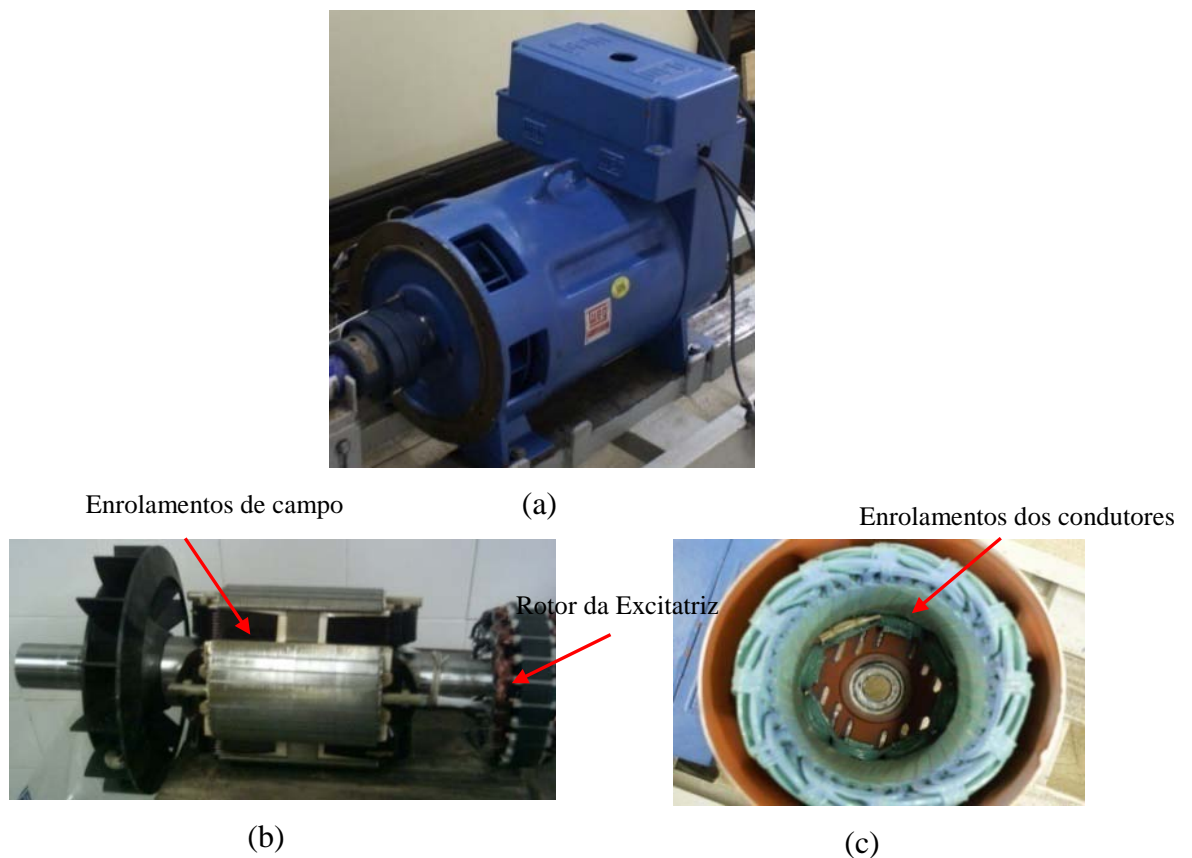


Figura 3.1 – (a) Gerador síncrono. (b) Rotor. (c) Estator (armadura com condutores)

O gerador da Fig.3.1(a), utilizado nos testes experimentais desse trabalho, possui enrolamentos de campo acoplados no rotor, alimentado por uma fonte de corrente contínua por meio de um excitatriz, conforme Fig. 3.1(b). A tensão induzida no estator do gerador, Fig. 3.1.(c) é do tipo CA senoidal trifásica.

A Fig.3.2 ilustra de forma esquemática o arranjo de uma máquina síncrona trifásica em que mostra apenas o enrolamento da fase *a*.

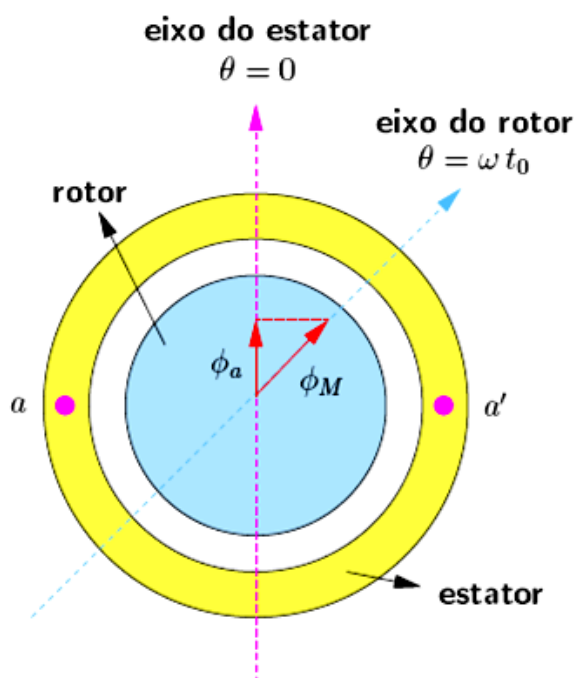


Figura 3.2 – Arranjo esquemático de uma máquina síncrona, trifásica, de pólos salientes

Sendo a máquina é acionada com velocidade constante  $\omega$ , a posição instantânea do rotor é dada por:

$$\theta = \omega t \tag{3.1}$$

sendo o ângulo  $\theta$  medido a partir do eixo do estator (referência angular).

A corrente CC ( $i_f$ ) é aplicada no enrolamento de campo e gera um campo magnético ( $H$ ), que depende da intensidade da corrente e do caminho magnético:

$$i_f \rightarrow H$$

A indução magnética ( $B$ ) depende do meio no qual  $H$  existe:

$$H \rightarrow B$$

O fluxo magnético é proporcional à própria indução e à área onde ela existe:

$$B \rightarrow \phi$$

$\phi$  é máximo sobre o eixo do rotor ( $\phi_M$ ).

A máquina é construída de forma que o fluxo magnético tenha uma forma senoidal no espaço. A Fig 3.3 representa a forma senoidal do fluxo magnético.

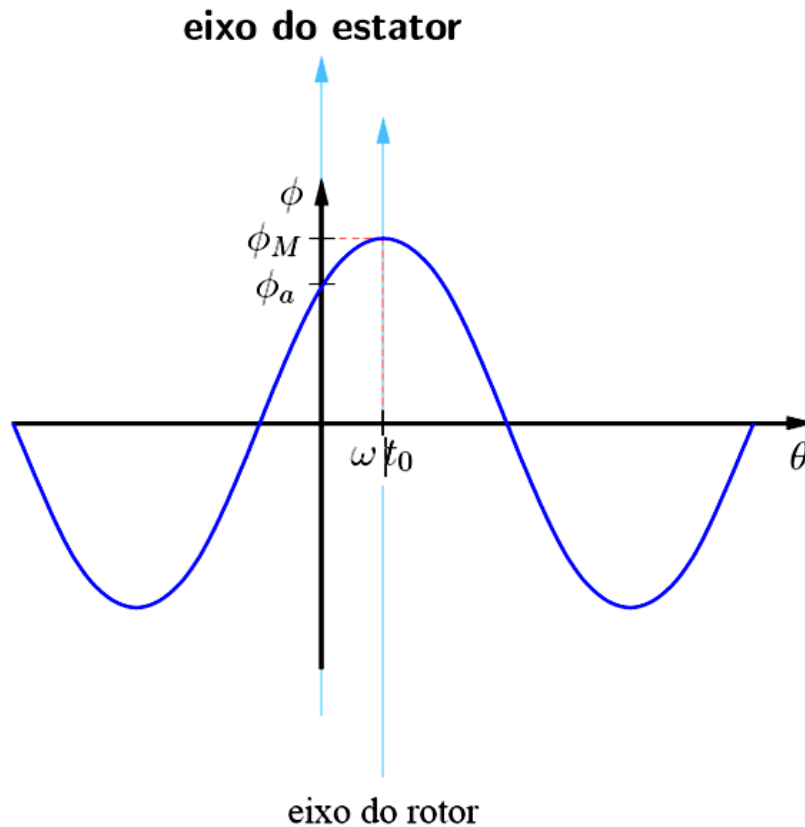


Figura 3.3 – Fluxo magnético, forma senoidal.

O fluxo sobre o eixo da fase  $a$  do gerador é:

$$\phi_a(\theta) = \phi_M \cos\theta \tag{3.2}$$

ou em função do tempo:

$$\phi_a(\theta) = \phi_M \cos\omega t \tag{3.31}$$

Pela lei de Faraday a tensão induzida no enrolamento da fase  $a$  do estator é



$$\varnothing_f(t) = -N \frac{d}{dt} \varnothing_a(t) \tag{3.4}$$

Na realidade há dispersão de fluxo:

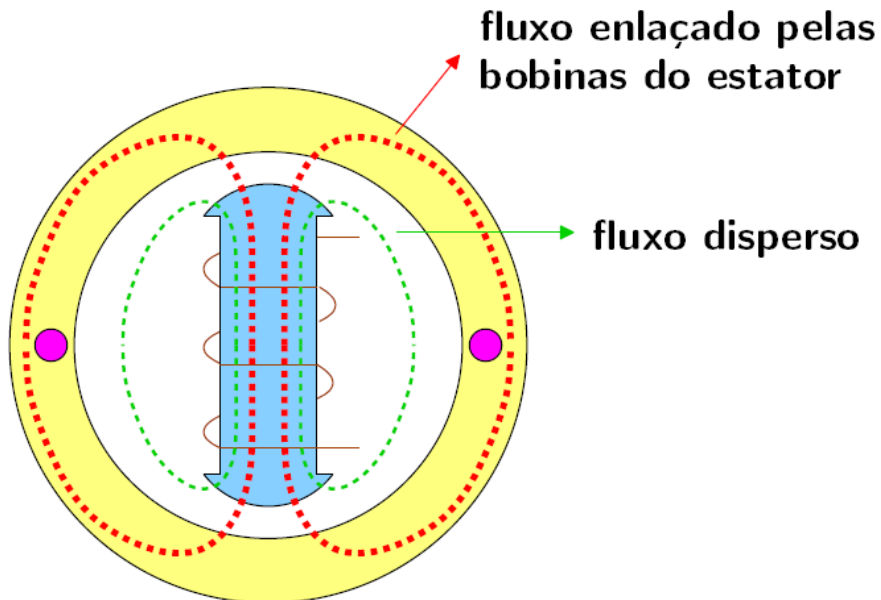


Figura 3.4 – Distribuição do fluxo enlaçado pelas bobinas e fluxo disperso

Considerando que  $\varnothing_f$  seja o fluxo enlaçado pelas bobinas do estator:

$$\varnothing_f(t) = -N \frac{d}{dt} \varnothing_a(t) = N \varnothing'_M \omega \text{sen } \omega t = \Phi_f \text{sen } \omega t \tag{3.5}$$

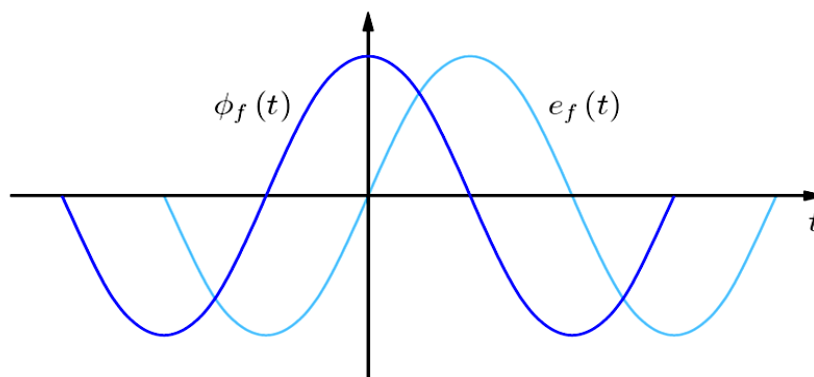


Figura 3.5 – Fluxo e tensão induzida no estator, forma senoidal.

Tanto o fluxo concatenado como a tensão induzida são senoidais. Chamando de:  $\Phi_f$  fasor associado a  $\varnothing_f(t)$  e  $E_f$  fasor associado a  $e_f(t)$  (Força eletromotriz interna da máquina). Tem-se

um diagrama de fluxos e tensões em que a tensão está atrasada de 90° em relação ao fluxo, conforme representa a Fig. 3.6.

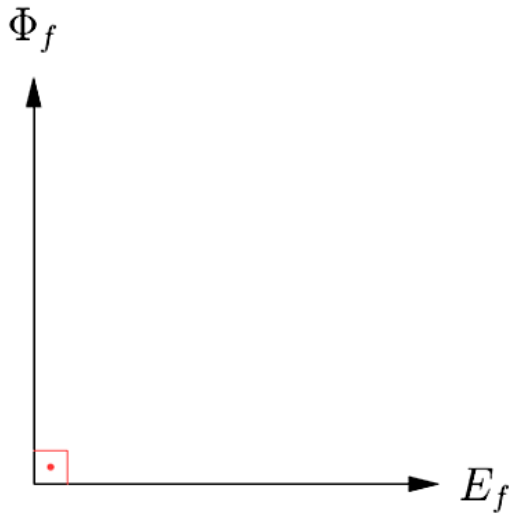


Figura 3.6 – Diagrama de fluxo e tensão

Quando a máquina está operando sob carga conectada ao estator da máquina tem-se correntes de armadura (fases *a*, *b* e *c*)

Considere que a carga é equilibrada. As corrente são:

$$i_a(t) = I_p \cos(\omega t) \tag{3.6}$$

$$i_b(t) = I_p \cos(\omega t - 120^\circ) \tag{3.7}$$

$$i_c(t) = I_p \cos(\omega t + 120^\circ) \tag{3.8}$$

Considere que o gerador alimenta diretamente uma carga indutiva, sendo a corrente atrasada em relação à tensão aplicada (tensão terminal do gerador) tem-se:

- A corrente de campo produz um campo  $\Phi_f$ ;

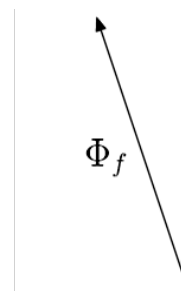


Figura 3.7 – Campo magnético  $\Phi_f$

- $\Phi_f$  induz uma tensão  $E_f$  (atrasada de  $90^\circ$ );

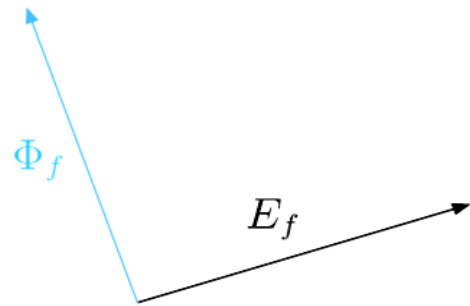


Figura 3.8 – Tensão induzida na armadura  $E_f$

- A corrente de carga  $I_a$  produz um campo de reação de armadura  $\Phi_{ra}$  (em fase);

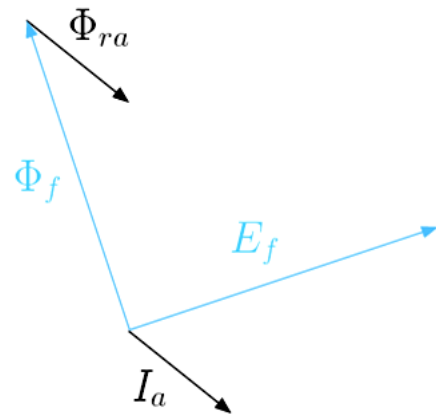


Figura 3.9 – Campo de reação da armadura  $\Phi_{ra}$

- $\Phi_{ra}$  induz uma tensão  $E_{ra}$  (atrasada de  $90^\circ$ )

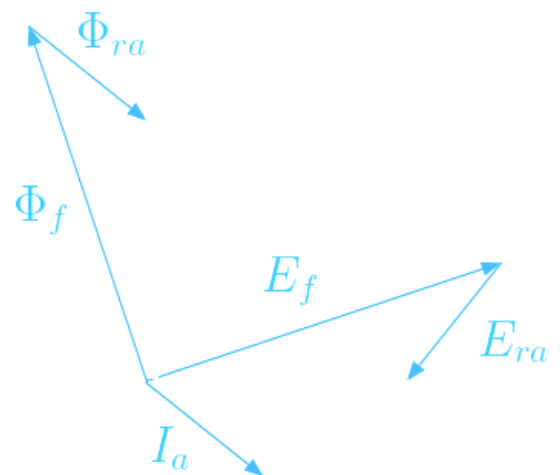


Figura 3.10 – Tensão induzida  $E_{ra}$

- soma de  $\Phi_f$  e  $\Phi_{ra}$  resulta na campo total de entreferro  $\Phi_t$ .

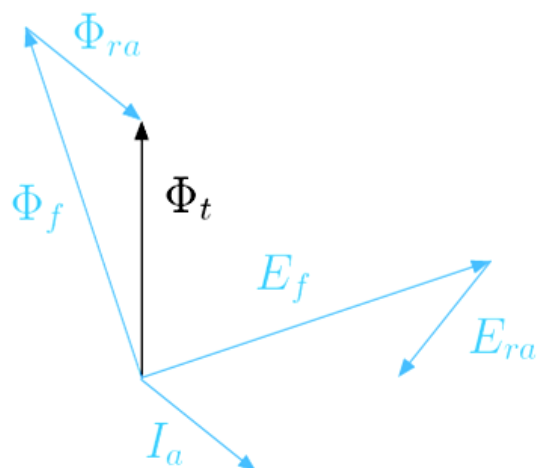


Figura 3.11 – Tensão induzida na armadura  $E_f$

- A soma de  $E_f$  e  $E_{ra}$  resulta na tensão terminal do gerador  $E_t$ .

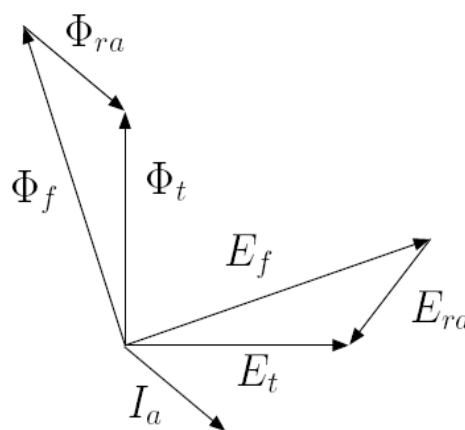


Figura 3.12 – Tensão terminal do gerador  $E_t$

O gerador síncrono sempre gira à velocidade síncrona (exceto em condições transitórias ou sob algum tipo de oscilação). A velocidade síncrona é definida pela rotação da máquina primária, a qual fornece a potência ativa para o sistema ligado ao gerador. A frequência da tensão gerada depende assim da velocidade de giro e do número de pólos, de acordo com a equação:

$$f = \frac{n_s p}{120} \text{ (Hz)} \tag{3.9}$$

sendo,  $f$  a frequência (Hz) da tensão gerada,  $p$  número de pólos da máquina, determinada pela construção da máquina,  $n_s$  rotação da máquina primária (rpm).

De acordo com a equação acima, tomando-se o caso do gerador usado neste trabalho, onde a máquina primária gira a 1800 rpm e seu rotor possui 4 pólos obtém-se :

$$f = \frac{1800 * 4}{120} = 60\text{Hz}$$

Caso seja necessário que o gerador produza uma tensão em 50 Hz é necessário alterar a rotação da máquina primária para 1500 rpm.

### 3.3 FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÃO

O fenômeno de vibração é definido com sendo uma oscilação em torno de uma posição ponto de referência. Este fenômeno está presente em diversas atividades do dia-a-dia, em casa, no trabalho, na rua etc. Na indústria, as vibrações são oriundas de máquinas rotativas, alternativas, acoplamentos, redutores, estruturas etc.

O movimento harmônico é a forma mais simples de se representar uma vibração.

A Fig. 3.13 ilustra a geração deste movimento, representado matematicamente pela Equação:

$$X(t) = A\sin(\omega t) \quad (3.10a)$$

ou, se a origem do movimento não coincidir com  $\sin(\omega t) = 0$ .

$$X(t) = A\sin(\omega t + \varphi) \quad (3.10b)$$

**Amplitude (A)** - é o máximo valor atingido por x. A unidade utilizada é a mesma da variável x(t). Utiliza - se os termos “amplitude de pico” significando o que aqui se chama simplesmente de amplitude e “amplitude pico a pico” significando a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de x, sendo, para o movimento harmônico, o dobro da amplitude A.

**Período (T)** - é o tempo transcorrido até que o movimento se repita. A unidade do período é uma unidade de tempo, normalmente o segundo.

**Frequência (f)** - é o número de repetições que ocorrem em uma determinada unidade de tempo. É definida como o inverso do período, e é normalmente medida em ciclos por segundo (Hz). Outra unidade de frequência bastante comum é a *RPM* (rotações por minuto), freqüentemente utilizada para medir velocidade de rotação em sistemas rotativos.

$$f = 1/T \tag{3.11}$$

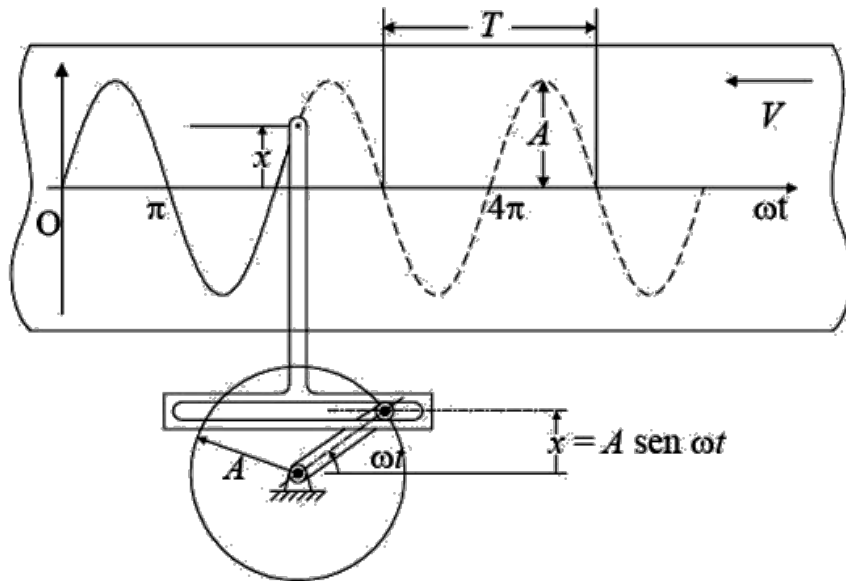


Figura 3.13 – Representação de um movimento harmônico

As principais características do movimento harmônico são:

**Frequência angular ( $\omega$ )** - é a velocidade angular com que um vetor de amplitude  $A$  gira (Fig. 3.14), de forma que suas projeções horizontais e verticais são movimentos harmônicos. Relaciona-se com a frequência  $f$  pela relação

$$\omega = 2\pi f \tag{3.12}$$

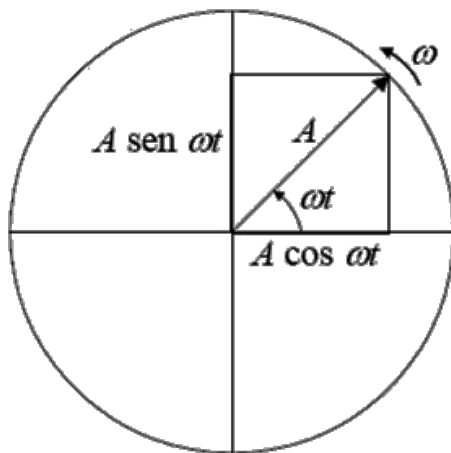


Figura 3.14 – Frequência Angular

Uma vez que um período de oscilação corresponde a uma volta completa do vetor o que equivale a um ângulo de  $2\pi \text{ rad}$ . É, portanto, medida em rad/s.

O movimento vibratório pode ser representado matematicamente pelo deslocamento  $X(t)$ , pela velocidade  $\dot{X}(t)$  e pela aceleração  $\ddot{X}(t)$ , grandezas que são relacionadas entre si por equações diferenciais como segue:

$$v(t) = \dot{X}(t) = A\omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.13)$$

$$a(t) = \ddot{X}(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.14)$$

A Fig. 3.15 mostra a representação gráfica do movimento harmônico referente às três grandezas.

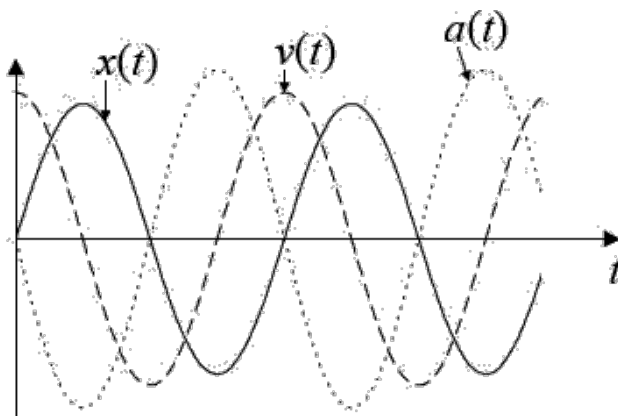


Figura 3.15 – Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração de um movimento Harmônico.

No caso de máquinas o movimento vibratório é o resultado das forças dinâmicas que as excitam. A Fig. 3.16 esquematiza um sistema forçado de vibração no qual a força  $F$  que o excita é provocada por um desbalanceamento mecânico representado por:

$$F_{desb} = F_0 \sin(\omega t) \quad (3.15)$$

Sendo,  $\omega$  a frequência de rotação do rotor.

Como a excitação também é senoidal o movimento é descrito pela Equação

$$X(t) = A \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.16)$$

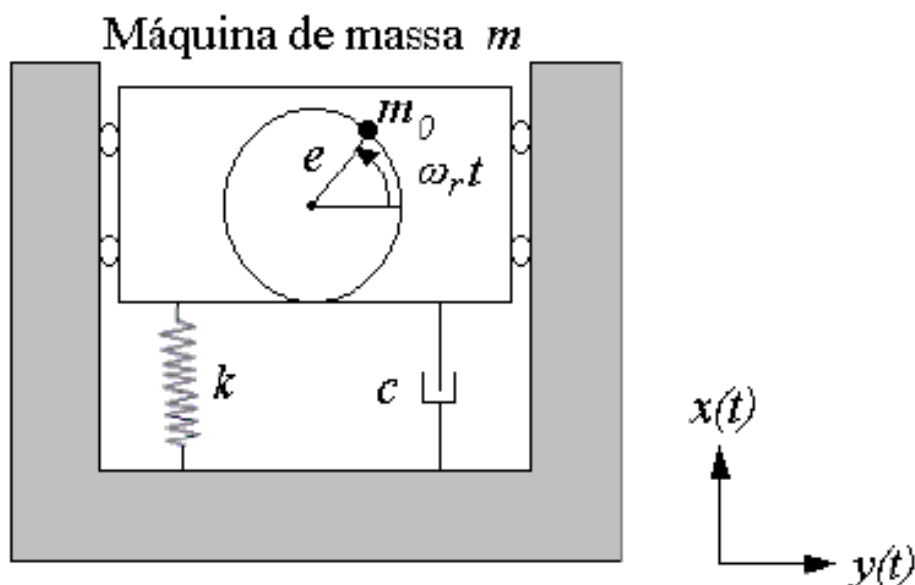


Figura 3.16 – Desbalanceamento mecânico rotativo.

De acordo com as Equações (3.15) e (3.16) observa-se que, força e deslocamento vibram na mesma frequência, porém, há uma diferença na fase da resposta, pois quando a força atinge o valor máximo na direção vertical, o deslocamento máximo da massa ainda não foi atingido. Chama-se esse atraso de ângulo de fase ( $\varphi$ ).

### 3.4 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS PARA DETECTAR DE DEFEITOS EM MÁQUINAS

O monitoramento das vibrações é uma das técnicas mais utilizadas para verificar as condições reais de máquinas e equipamento, e pode variar desde a medição do nível global de vibração, análise espectral, curtose, fator de Crista até a aplicação de técnicas mais sofisticada com a técnica do envelope, cepstrum, transformada de *wavelet*, etc. A seguir será detalha as técnicas de análises se sinais comumente usadas para diagnóstico de defeitos em máquinas.



### 3.4.1 Nível Global (RMS)

O nível global de vibrações consiste em medir valor eficaz ( $X_{rms}$ ) (raiz média quadrática) do sinal. Esse valor é dado pela Equação 3.14 e representado pela Fig. 3.17. O valor  $X_{rms}$  é usado na estimativa da severidade de vibração proveniente da estrutura da máquina ou de fatores externos. O valor de pico é útil na medida das respostas dos sistemas a choques mecânicos e não se relaciona com a história do sinal.

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt} \quad (3.17)$$

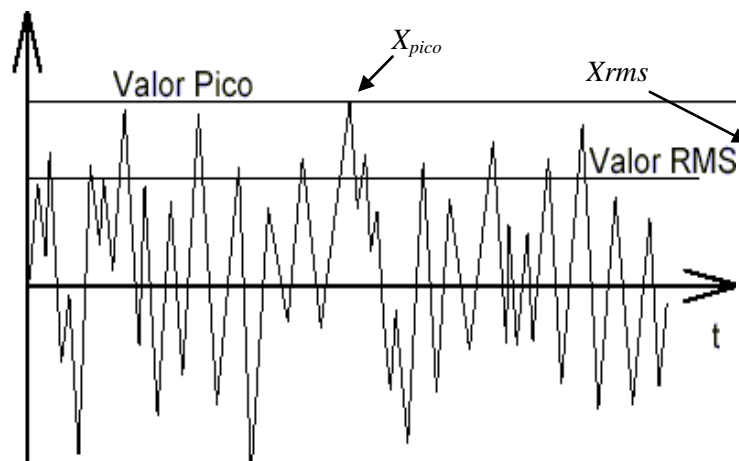


Figura 3.17 – Valor rms e valor de pico de um sinal (modificado, Mesquita, 2005).

### 3.4.2 Fator de Crista ( $F_c$ ) e Fator K ( $F_K$ )

O fator de crista é definida como a razão do valor de pico  $X_{pico}$  de vibrações em relação ao valor de  $X_{rms}$  medido dentro de uma banda de frequência de 1 kHz a 10 kHz expresso por (Nunes, 1989):

$$F = \frac{X_{pico}}{X_{rms}} \quad (3.18)$$

A obtenção do fator de crista é simples e requer apenas a medição do valor de pico e do valor RMS sem análise espectral. Portanto não há diagnóstico, apenas um alarme da falha, sem dizer que componente está falhando.

A Fig. 3.18 ilustra o comportamento do fator de crista para um defeito em rolamento, destacando-se: a região verde, o rolamento está em boas condições e o  $F_C$  se mantém constante; a região amarela, o rolamento começa a apresentar os primeiros defeitos e o  $F_C$  aumenta; a região vermelha, o rolamento encontra-se em avançado estado de desgaste, o nível  $X_{rms}$  sobe e o  $F_C$  diminui.

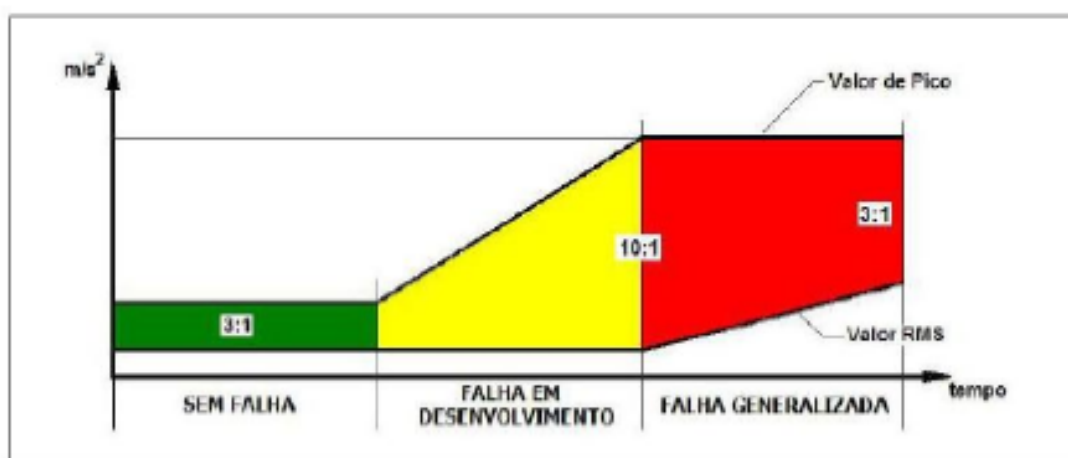


Figura 3.18 – Fator de Crista (Ponci e Cunha, 2005)

O fator de crista mostra de forma clara o surgimento de uma falha em um dos componentes do rolamento. Por outro lado, à medida que o defeito se espalha na superfície do rolamento o nível de ruído aumenta, elevando o valor do  $X_{rms}$  mais rápido que o de pico. Logo, o fator de crista sofre uma diminuição em seu valor. O que demonstra que o  $F_C$  não é bom indicador de falhas em estágio severo (Mitchell *apud* Bezerra, 2004). Uma forma encontrada de eliminar este problema foi a criação do fator K ( $F_K$ ), que é o produto da  $X_{rms}$  e  $X_{pico}$ , ou seja:

$$F_k = X_{pico}X_{rms} \tag{3.19}$$

Na Fig. 3.19 estão representados o fator K e o seu comportamento em relação à condição do rolamento.

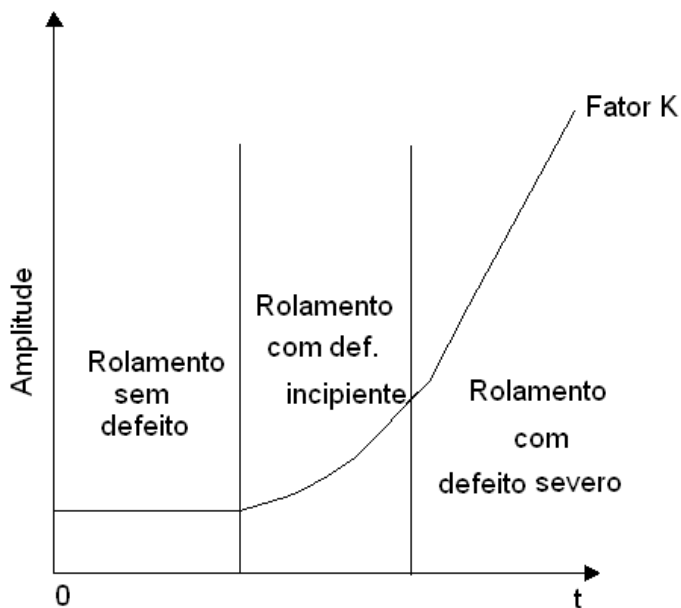


Figura 3.19 – Variação do fator K

### 3.4.3. Curtose (K)

A curtose é definida como o quarto momento estatístico central normalizado pelo desvio padrão, na quarta potência, do sinal de vibração e é representada pela expressão:

$$k = \left[ \frac{m_4}{\sigma^4} \right] = \frac{1}{\sigma^4} \int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - \mu]^4 p(x) dx \tag{3.20}$$

sendo  $x(t)$  o sinal de vibração,  $\mu$  a média do sinal,  $p(x)$  a densidade de probabilidade e  $\sigma$  o desvio padrão.

Num rolamento sem defeito, as vibrações geradas pelo rolamento das esferas sobre as pistas são de natureza aleatória. Além disso, a distribuição de probabilidade de um sinal aleatório tende à gaussiana quando a sua duração é suficientemente grande (Gerges *apud* Antonioli, 1999). A distribuição gaussiana  $p(x)$  é definida por:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \tag{3.21}$$

A idéia do uso da curtose ( $k$ ) consiste em avaliar a ocorrência de um defeito através da função densidade de probabilidade. Os valores de  $k$  são tabelados, sendo que para o caso de analisar um rolamento sem defeito,  $k=3$  (distribuição gaussianas), e quando  $k>3$  temos defeitos introduzindo pulsos no espectro (Antonioli, 1999).

#### **3.4.4. Análise Espectral**

A técnica de análise espectral foi introduzida devido às dificuldades de se determinar e localizar a origem do nível excessivo de vibração medido pelo nível global. Essa técnica identifica os componentes que apresentam defeitos, através de comparações com espectros já conhecidos de uma determinada máquina.

Para esta técnica, a amplitude da vibração é o parâmetro usado para comparação com determinados valores padrão para o julgamento do estado da máquina; a frequência é o dado indicativo da natureza do problema que pode estar causando um mau funcionamento. Através da análise espectral, pequenas variações nos componentes espectrais podem ser facilmente detectadas. Dessa forma, vários defeitos podem ser identificados através da comparação das amplitudes relativas das principais componentes espectrais.

Uma das grandes vantagens dessa técnica é poder fazer a identificação precoce de defeitos. Isto é possível, porque a análise espectral indica o nível de vibração das frequências características da máquina.

##### **3.4.4.1. Obtenção do Espectro de Frequência**

Para se obter os espectros de frequência utiliza-se sistema de aquisição de sinais que faz a conversão analógica-digital dos sinais, armazena na forma numérica e os processam usando algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*), apresentando o resultado, espectro de frequência, em tempo real. Esse processo de obtenção do espectro exige cuidados importantes na apresentação e ajuste das condições de obtenção do sinal, das faixas de frequências que se deseja analisar e da resolução em frequência dentro dessas faixas.

Um sinal ondulatório pode ser escrito como uma combinação de senóides conforme:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (3.22)$$

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt \quad (3.23)$$

sendo:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0 \quad (3.24)$$

Nessas equações  $x(t)$  é o sinal periódico complexo aproximado por um somatório de sinais senoidais.  $C_n$  são coeficientes de Fourier obtidos a partir da integração sobre todo o período do sinal, do produto desse sinal por um sinal senoidal com uma frequência prefixada  $f_n = n\omega_n = n2\pi f_0$ , cujo resultado pode ser um número próximo ou diferente de zero. No contexto da análise de sinais de vibração, os coeficientes de Fourier são as amplitudes dos sinais que somados compõem o sinal original. São os componentes do espectro de frequência de  $x(t)$ .

No caso apresentado, o sinal é aproximado por uma série infinita, mas admitindo-se certo erro pode-se representar o sinal coletando uma quantidade finita de coeficientes tal que o sinal será representado por

$$x(t) = \sum_{k=-N}^N C_k e^{jk\omega_0 t} \quad (3.25)$$

Dessa forma, a série que aproxima o sinal conterá  $2N$  sinais senoidais simples, correspondente a um número inteiro de  $N$  frequências  $f_n = k\omega_0 = k2\pi f_0$ . Vale ressaltar que para cada  $f_n$  são montados dois coeficientes, o  $C_n$  para  $-f_n$ , e o  $C_n$  correspondente a  $+f_n$ , distribuídas sobre o intervalo fechado  $[-N, N]$  do conjunto dos números inteiros.

Considerando agora que o sinal periódico a ser aproximado por uma série de Fourier seja representado por uma discretização no tempo, que é o caso dos sinais coletados pelos sistemas de aquisição com conversores analógicos digitais, nos quais o período total de aquisição conterá um número finito de pontos  $N_s$ , igualmente espaçados de um intervalo de tempo  $\Delta t$ , pode-se escrever

$$(t) = x(n, \Delta t) = x(n) \quad (3.26)$$

$$T_0 = N_s \cdot \Delta T \tag{3.27}$$

$$w_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \frac{2\pi}{N_s \cdot \Delta t} = \frac{2\pi}{N_s} f_s \tag{3.28}$$

sendo  $f_s$  a frequência de amostragem do sinal empregado pelo conversor analógico digital.

Assim, as frequências que representam a aproximação por série de Fourier de um sinal periódico discretizado ficam:

$$x(n) = \sum_{k=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}} C_k e^{jk\left(\frac{2\pi}{N_s}\right)n} \tag{3.29}$$

$$C_k = \frac{1}{N_s} \sum_{n=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}} x(n) e^{-jk\left(\frac{2\pi}{N_s}\right)n} \tag{3.30}$$

Observando o resultado, verifica-se que, ao discretizar o sinal usando um total de  $N_s$  pontos, com uma frequência de amostragem  $f_s$ , será estimado  $N_s$  coeficientes de Fourier, sendo que metade deles corresponde ao intervalo  $\left[-\frac{N_s}{2}, 0\right]$  e metade ao intervalo  $\left[0, \frac{N_s}{2}\right]$ , totalizando  $N_s$  pontos, que podem ser ordenados sobre o intervalo dos inteiros  $\left[-\frac{N_s}{2}, \frac{N_s}{2}\right]$ . Esses coeficientes são iguais, dois a dois, em módulos, ou seja, existem  $\frac{N_s}{2}$  coeficientes distintos em módulos. Dessa forma, ao considerar que os valores absolutos dos coeficientes relativos ao lado positivo correspondem ao espectro de frequência obtido com o uso de filtros, a faixa de frequência para as quais se estima as amplitudes é de zero a  $f_n = \frac{f_s}{2}$ , denominada de frequência de Nyquist, e o espaçamento entre elas, resolução do espectro dada por  $\Delta f = \frac{2f_n}{N_s} = \frac{f_s}{N_s}$  (Teorema de Nyquist).

A maioria dos analisadores digitais aplica esta técnica para a obtenção do espectro de vibração, na qual a transformada de Fourier do sinal  $x(n)$  é obtida por meio do algoritmo conhecido como FFT (*Fast Fourier Transform*). Com isso, surgem características associadas às propriedades e devem ser bem compreendidas, pois interferem na qualidade da análise.

O uso desse tipo de analisadores gera um problema, pois, o sinal é adquirido por meio de um conversor analógico digital (ADC) e memorizado de forma digitalizada. Em consequência, o microprocessador que se comunica com o ADC adquire o vetor

correspondente ao sinal digitalizado e efetua o processamento numérico do sinal pelo método da FFT.

O sistema ADC adquire um determinado tempo de sinal, normalmente identificado por  $T_r$ , digitalizando esse sinal em  $N_s$  pontos, espaçados igualmente de um intervalo de  $\Delta t = \frac{T_r}{N_s}$ , correspondente à frequência de amostragem  $f_s = \frac{1}{\Delta t}$ . Por questão de *hardware*, normalmente  $N_s = 1024$  pontos, ou algum múltiplo par desse número.

De acordo com o exposto, a FFT obtém para estes  $N_s$  pontos representativos do sinal um espectro composto por  $\frac{N_s}{2}$  frequências para as quais são estimadas as amplitudes sendo que a maior frequência é a frequência de Nyquist,  $f_n = \frac{f_s}{2}$ , e o espaçamento entre elas  $\Delta f = \frac{2f_n}{N_s} = \frac{f_s}{N_s}$ .

Somente satisfazendo a condição do Teorema de Nyquist é que um sinal discretizado é completamente reconstruído como uma função contínua no tempo. Na Fig. 3.20(a)  $f_s$  é maior que duas vezes a frequência do sinal amostrado de modo que a função reconstruída é idêntica a original. No caso da Fig. 3.20(b),  $f_s$  é menor que duas vezes a frequência do sinal, a função reconstruída difere consideravelmente do sinal original. Este problema, devido a discretização com uma taxa de amostragem baixa, é denominado de “*aliasing*”.

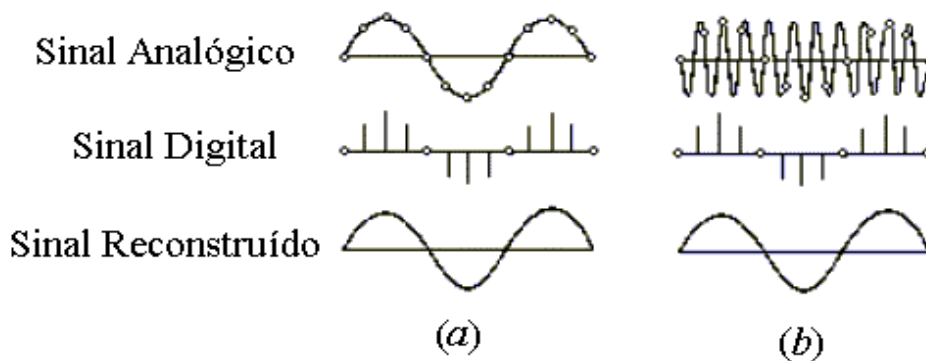
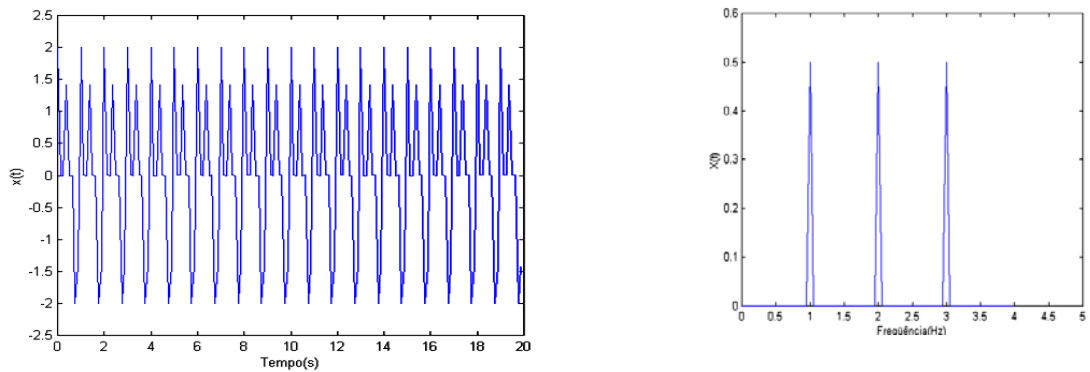
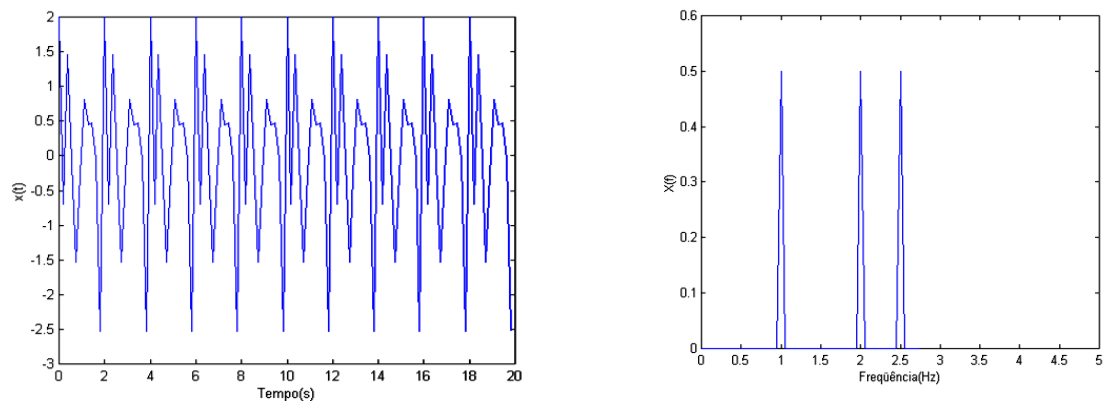


Figura 3.20 – Discretização de um sinal analógico (modificado, Mesquita, 2005).

“**Aliasing**” é o fenômeno também conhecido como “*folding error*” (erro de rebatimento). No domínio da frequência o efeito de “*aliasing*” faz surgir no espectro do sinal, frequências que não existem, conforme Fig. 3.21(a) e 3.21(b).



(a)



(b)

Figura 3.15 – Fenômeno de Aliasing: (a) – Sinal com  $f_s > 2 f_n$ ; (b) – Sinal com  $f_s < 2 f_n$ .

Observando as relações entre a frequência de Nyquist e a frequência de amostras e levando em conta que a aquisição do sinal é feita em blocos de tamanhos finitos, então para um dado tamanho de bloco fixo têm-se as seguintes situações:

- Para a obtenção de um espectro com ampla faixa de frequência, deve-se aumentar a frequência de amostragem do sinal, diminuindo assim o tempo de aquisição adquirido  $T_r$ , aumentando a separação entre elas, piorando a resolução do espectro.
- Para a obtenção de uma melhor resolução em frequência, com mais detalhes e garantia de que todas as frequências de interesse sejam observadas, deve-se diminuir a frequência de amostragem; com isso, a faixa de frequências contido no espectro cai, e o tempo de aquisição  $T_r$  aumenta.

A solução para as duas situações descritas seria utilizar uma amostragem com maior número de pontos para analisar faixas mais amplas, aumentando a resolução com o tempo de aquisição do sinal  $T_r$ . Para isso, pode-se usar amostragem com menor número de pontos,



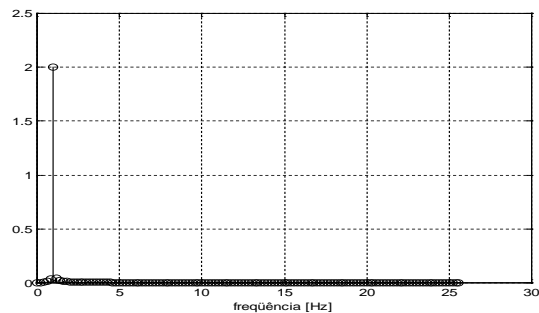
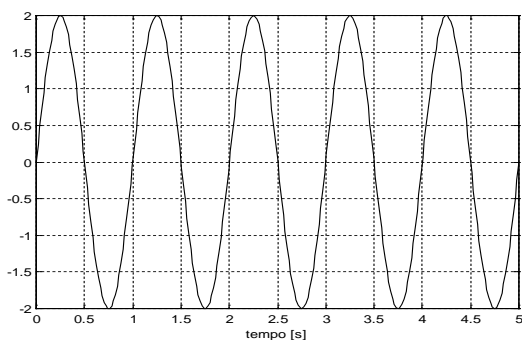
quando a resolução requerida assim permitir, no caso de obtenção de dados para análises abrangendo faixas menores de frequência.

No processamento digital de sinais para a computação da DFT (Transformada Discreta de Fourier), os sinais deverão ser discretizados e considerados periódicos. Contudo, erros podem surgir provenientes deste processamento digital, como o “Aliasing”, que é proveniente de uma baixa taxa de amostragem.

Outro problema que pode vir a surgir é o efeito de "leakage". Este efeito surge da seguinte maneira: o algoritmo da FFT é baseado na consideração de que o registro temporal se repete ao longo do tempo. Em sinais transientes, cuja amplitude decai a zero, totalmente contidos no registro temporal, isto não implica em problema. Porém, em sinais estacionários, como por exemplo, sinais periódicos, pode haver problema. O sinal periódico pode não ter um número inteiro de ciclos adquiridos pelo registro temporal, fazendo com que a repetição do registro temporal não reconstrua o sinal original exatamente, e implicando em distorção em seu espectro.

Para minimizar este efeito, os sinais não periódicos e os periódicos, que não possuam número inteiro de ciclos dentro do registro temporal, devem ser multiplicados por uma função matemática que faz com que o sinal tenha valor 0 (zero) no início e no final do registro temporal.

Esta função matemática é chamada de função janela ("*window function*"). As janelas comumente usadas pelos analisadores digitais são a janela uniforme (ou retangular), janela *Hanning*, *Hamming*, *Kaiser-Bessel* e *flat top*. A seguir, na Fig. 3.22 (a), 3.22 (b) e 3.22 (c) três exemplos são mostrados. O primeiro mostra um sinal periódico que possui números inteiros de ciclos, no segundo, um sinal que não possui número inteiro de ciclos a causa e o surgimento do “*leakage*”, e no terceiro, a multiplicação do sinal com *leakage* com da função janela “*hanning*”, minimizando o surgimento do *leakage*.



(a)

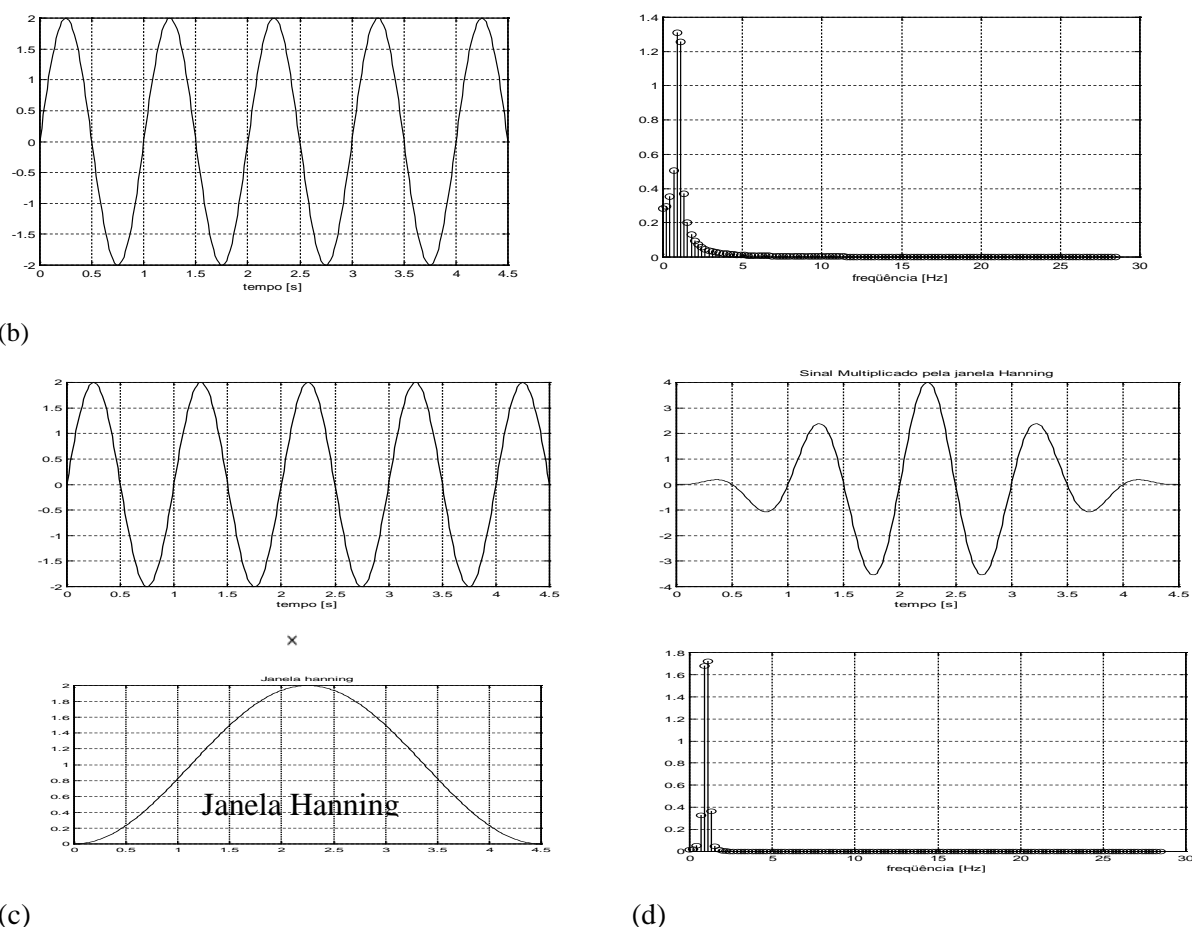


Figura 3.22 – (a) – Sinal com números inteiro de ciclos; (b) - Sinal sem números inteiro de ciclos (; (c) – Multiplicação do sinal com a função janela *Hanning* (modificado, Mesquita, 2005).

“Leakage” (ou vazamento) é um fenômeno que tende espalhar a energia contida numa frequência em linhas de frequências adjacentes no espectro, distorcendo-o, e fazendo com que a amplitude seja subestimada.

### 3.4.4.2. Identificação dos principais defeitos através da Análise Espectral

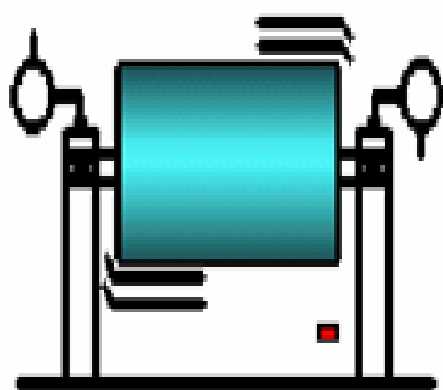
Para realizar de forma adequada uma análise através de espectro de frequência de vibração, primeiramente é necessário conhecer as frequências que estão relacionadas com a condição normal de funcionamento, para posterior relação com as frequências que estão associadas com a presença eventual de um defeito e como elas interferem no espectro.

Existem vários defeitos encontrados em máquinas, os quais podem ser identificados através da análise espectral. A seguir serão descritos apenas os defeitos normalmente

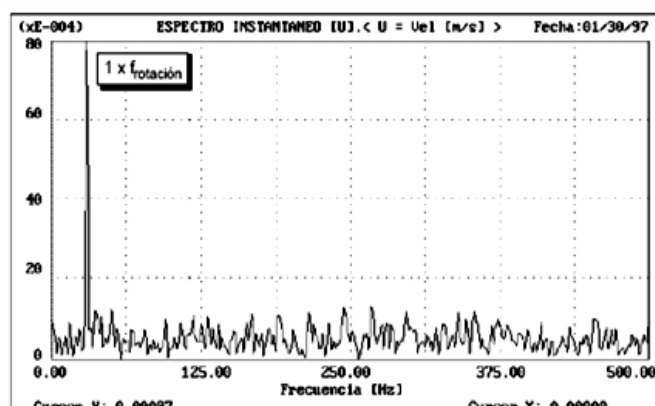
encontrados em máquinas elétricas e que serão induzidos na bancada experimental desse trabalho.

### Desbalanceamento Mecânico

Constitui uma das fontes mais comuns nos problemas de vibração em máquinas. A presença do desbalanceamento como o único problema na máquina, reflete um espectro com uma componente bem definida na frequência de rotação da máquina. As Figs 3.23 (a) e 3.23 (b) mostram respectivamente o desenho esquemático de uma máquina desbalanceada e seu espectro de velocidade no qual é visível a alta amplitude do primeiro harmônico rotacional.



(a)



(b)

Figura 3.23 – (a) Desenho esquemático de uma máquina desbalanceada. (b) Espectro de frequência (modificado, Mesquita, 2005)

### Desalinhamento

Desalinhamento é a condição em que os eixos da máquina motriz e da máquina motora não estão localizados na mesma linha de centro. É considerada a segunda causa principal de vibração em máquinas.

Existem três tipos de desalinhamento: paralelo, angular e combinado, conforme Fig. 3.24.

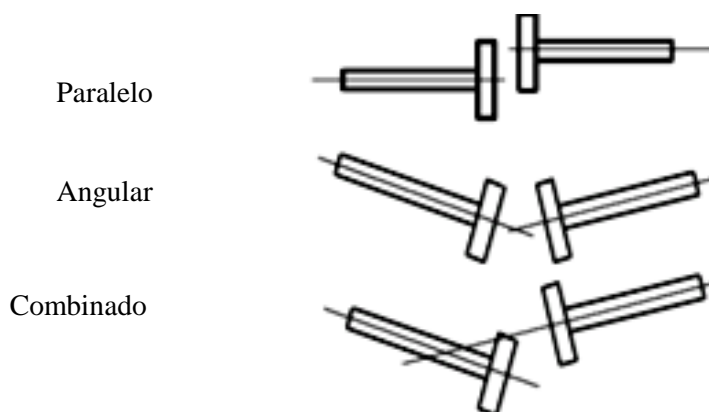


Figura 3.24 – Tipos de desalinhamento (modificado, Mesquita, 2005).

A Fig. 3.25 mostra um espectro que acusa desalinhamento em uma máquina. Normalmente quando ocorre a presença de desalinhamento no espectro observa – se que: o primeiro harmônico de rotação da máquina sempre surge com amplitudes elevadas, o segundo, comumente e o terceiro harmônico, às vezes.

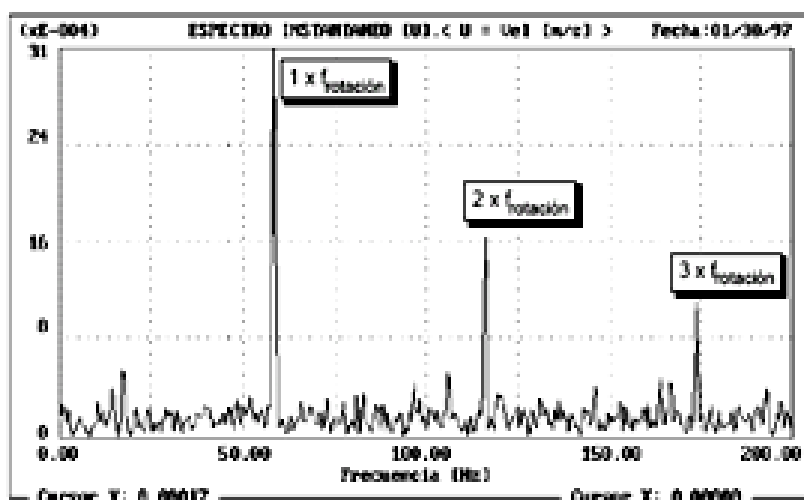


Figura 3.25 - Espectro de uma máquina desalinhada (modificado, Mesquita, 2005).

### *Defeitos em Rolamentos*

As falhas nos rolamentos tipicamente ocorrem devido a defeitos localizados na pista externa, pista interna, nos elementos rolantes ou na gaiola que direciona os elementos rolantes. Estes defeitos geram uma série de impactos de vibração devido ao choque dos elementos rolantes com a superfície do defeito. Estas vibrações ocorrem em frequências características, que são estimadas em função da velocidade da rotação do eixo e da geometria dos

componentes do rolamento, (Ver Fig. 3.26). Estas frequências são denominadas de frequências características dos defeitos e possuem peculiaridades especiais, elas são não-sincronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada.

Como mencionado no início desse capítulo, os ensaios experimentais foram realizados em uma bancada, o gerador síncrono no qual foram introduzidos os defeitos possuem dois mancais de rolamento, sendo a pista externa estacionária e a pista interna gira na frequência de rotação da máquina, as fórmulas das frequências características dos rolamentos são as seguintes:

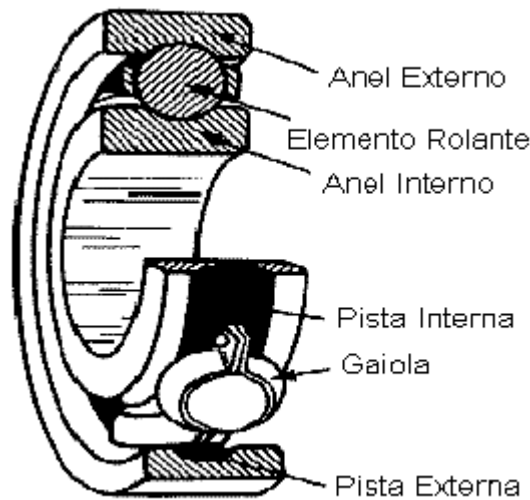


Figura 3.26 – Componentes do rolamento.

$$FTF = \frac{S}{2} \left( 1 \pm \frac{d}{D} \cos\theta \right) \quad (3.31)$$

$$BSF = \frac{S}{2} \cdot \frac{D}{d} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \cos\theta \right)^2 \right] \quad (3.32)$$

$$BPFO = \frac{S \cdot n}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\theta \right) \quad (3.33)$$

$$BPFI = \frac{S \cdot n}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos\theta \right) \quad (3.34)$$

Sendo FTF (“fundamental train frequency”) a frequência de defeito na gaiola, BSF (“ball spin frequency”) a frequência do elemento rolante BPFO (“ball pass frequency of the outer race”) a frequência de defeito na pista externa, e BPFI (“ball pass frequency of the inner race”) a frequência de defeito na pista interna.

Os procedimentos que permitem a obtenção dessas equações são mostrados por Bezerra (2004) e os parâmetros envolvidos são assim identificados:  $S = S_i - S_e$ ,  $S_e$ , a frequência de rotação da pista externa;  $S_i$ , a frequência de rotação da pista interna;  $d$ , o diâmetro dos elementos rolantes;  $D$ , o diâmetro primitivo do rolamento;  $n$ , o número de elementos rolantes; e  $\theta$ , o ângulo de contato. A Fig. 3.27 ilustra as características geométricas e físicas do rolamento.

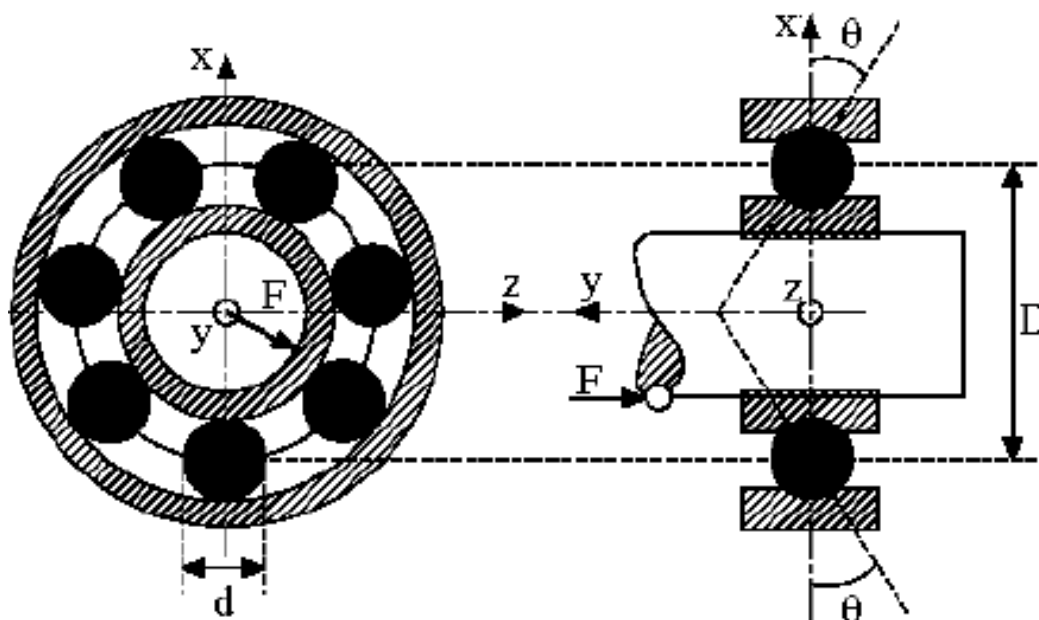


Figura 3.27 – Descrições dimensionais do rolamento.

É importante ressaltar que, ao contrário da maioria das frequências de vibração geradas por componentes mecânicos, essas frequências são verdadeiramente frequências de defeitos. Isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha.

A evolução dos defeitos nos rolamentos pode ser dividida em quatro etapas, descritas a seguir e ilustrada na Fig. 3.28, (Almeida e Góz, 2002).

**Estágio 1** – Os primeiros sinais aparecem em frequências ultra – sônicas de 20 a 60 kHz. Os sinais nestas frequências podem ser avaliados por envelope de aceleração.

**Estágio 2** – Com o surgimento de pequenos defeitos, ocorrem impactos nos elementos do rolamento excitando frequências naturais na faixa de 200 – 2000 Hz. No espectro, as frequências naturais aparecem acompanhadas de bandas laterais. O valor do envelope de aceleração cresce.

**Estágio 3** – As frequências fundamentais de defeitos e/ou suas harmônicas, começam a aparecer no espectro. Com o aumento do desgaste, cresce o número de harmônicas e de bandas laterais, tanto em torno das frequências naturais como em torno das frequências de defeitos. O valor de envelope de Aceleração continua a crescer. O desgaste é agora visível e quando se estender por to a pista do rolamento, existirão muitas bandas laterais com grandes amplitudes. Neste estágio o rolamento deve ser substituído.

**Estágio 4** – Já tendendo ao colapso, a amplitude em 1X RPM cresce muito com ela, as muitas harmônicas da rotação do eixo. Neste estágio, as componentes correspondentes as frequências naturais começam a desaparecer e é substituída por uma faixa larga de frequências correspondente a vibração aleatória.

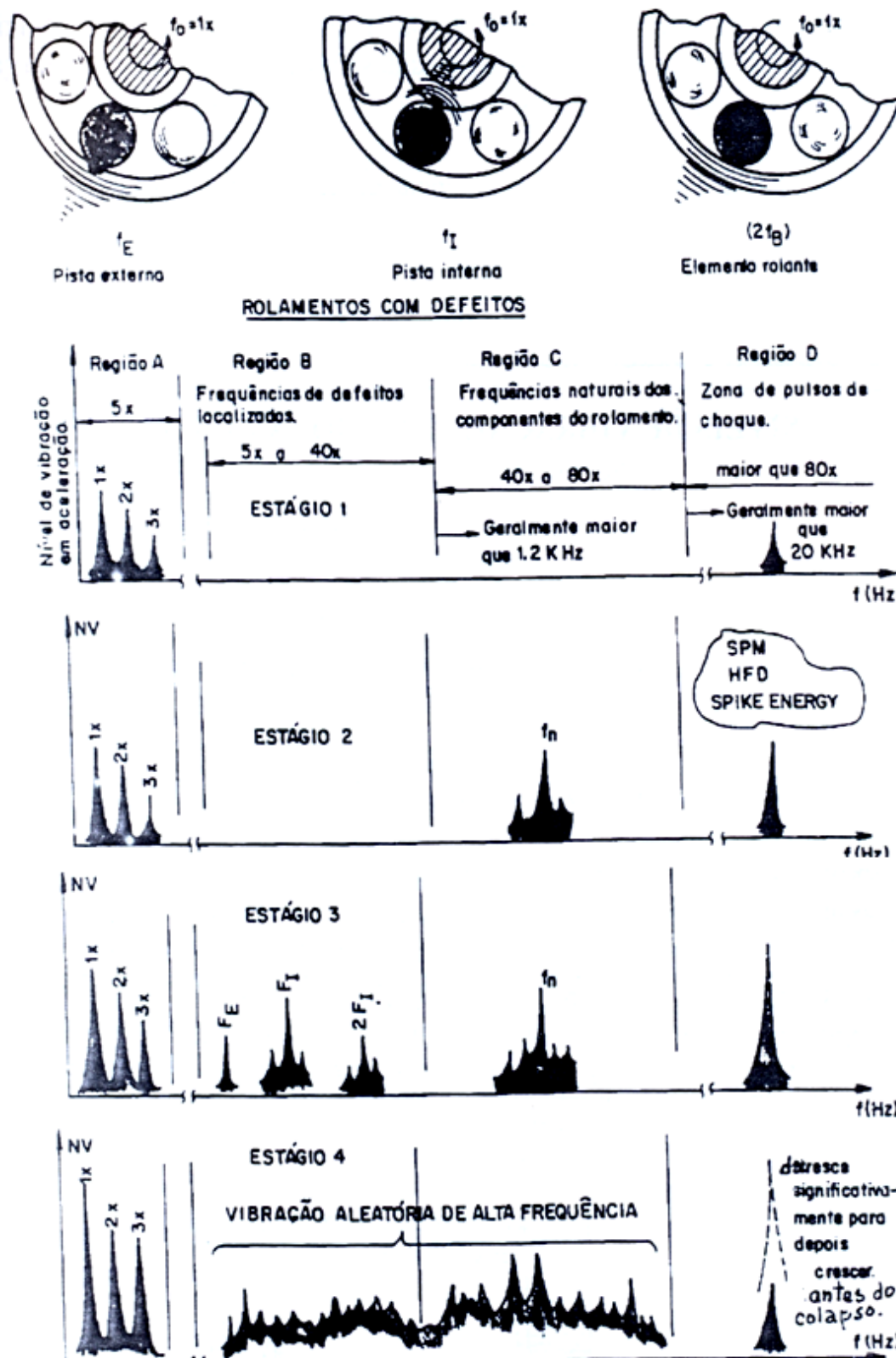


Figura 3.28 – Evolução dos defeitos em rolamentos, (Almeida e Góz, 2002)



3.4.5. Técnica de Envelope

Admitindo um rolamento que tenha um defeito sobre uma das pistas, cada elemento rolante ao passar pelo defeito provocará um impacto que terá como característica serem de curtíssima duração, repetindo em baixas frequências e que pôr sua vez excitara as frequências de ressonância do mancal ou da estrutura, situadas em altas frequências. A Fig. 3.29 mostra a representação de um sinal de um rolamento defeituoso.

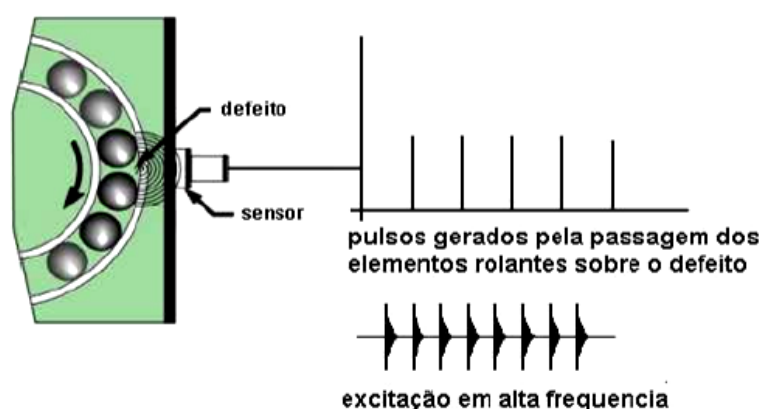


Figura 3.29 – Representação de um sinal de vibração de um rolamento defeituoso.

A combinação do sinal de alta frequência com o sinal de baixa frequência presente quando um rolamento apresenta defeito, provoca a modulação de amplitude do sinal (AM), onde tem-se a frequência de ressonância do mancal ou da estrutura como portadora e a respectiva frequência de defeito como moduladora, conforme espectro mostrado na Fig. 3.30. A teoria detalhada sobre modulação e demodulação de Sinais pode ser visualizada no Anexo 1.

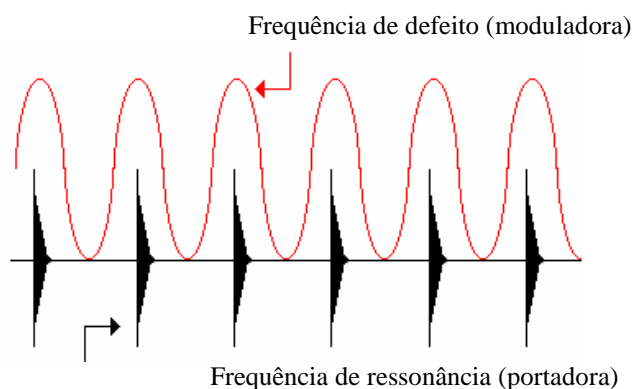


Figura 3.30 – Modulação de amplitude do sinal

A técnica do envelope é a demodulação das frequências de defeito do rolamento na alta frequência de ressonância do mancal ou estrutura. Esta técnica reduz os problemas das altas frequências, para baixas frequências. É considerada uma das técnicas mais eficiente para detectar e diagnosticar falhas em rolamentos e engrenagens.

O método consiste primeiramente em filtrar o sinal de aceleração por um filtro passa-banda em torno da frequência de uma ressonância para eliminar as outras frequências, tais como as frequências geradas por desbalanceamento do eixo, engrenamento, ruído, e outras. O sinal de banda estreita remanescente, no domínio do tempo, consiste nas respostas às seqüências de impactos. O centro da frequência de corte do filtro passa-banda deve coincidir com a frequência de ressonância. A largura de banda deve ser pelo menos duas vezes a mais alta frequência característica de defeito calculada. Isto garantirá que o filtro deixará passar a frequência portadora e pelo menos um par de bandas laterais de modulação. Na prática, a largura de banda deve ser selecionada de modo a conter os dois primeiros pares de bandas laterais em torno da frequência portadora.

A frequência de ressonância não é de interesse, mas sim a moduladora. Portanto a frequência de defeito deve ser extraída do sinal pelo processo de demodulação. Em um processo digital, esta demodulação consiste em aplicar a transformada de Hilbert no sinal filtrado no domínio do tempo, para obter o contorno (envoltório ou envelope) das respostas. Através deste contorno, pode-se medir a frequência dos impactos, que é a mesma frequência do defeito, ou seja, o inverso do espaçamento das respostas aos impactos. O espectro do envoltório do sinal filtrado mostrará a frequências do defeito e seus harmônicos. A Fig. 3.31 ilustra as etapas do método.

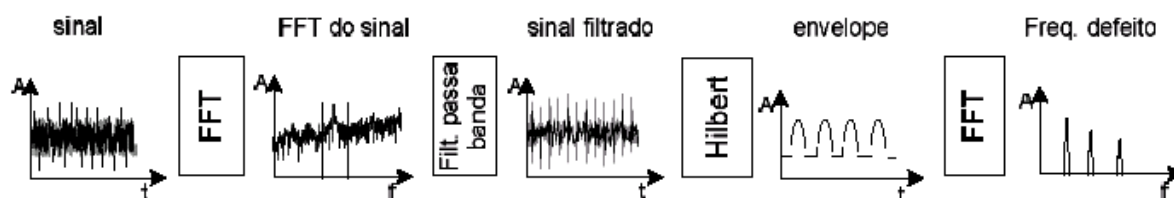


Figura 3.31 – Procedimentos da técnica do envelope.

Esta técnica é aplicada facilmente para detecção de defeitos na pista externa, mas para defeitos na pista interna e nos elementos rolantes, muitas linhas adicionais surgem no espectro devido à modulação com a rotação, dificultando a análise (Tandon e Nakra, 1992 *apud* Bezerra, 2004).

### 3.4.6. Cepstrum

A palavra *cepstrum* é derivada da inversão das primeiras letras da palavra *spectrum*. Pelo mesmo processo a palavra frequência gerou o nome da variável independente do cepstrum, a quefrência, cuja unidade é  $\tau$  (tau) com dimensão de segundo (tempo). A unidade da quefrência apesar de ser segundo, não é igual ao tempo normal (do relógio), pois não foi obtida pela volta do domínio da frequência pela transformada inversa de Fourier, mas sim de uma nova transformada aplicada no domínio da frequência. A idéia do tempo no cepstrum representa a de repetição e proximidade de componentes de frequência no espectro de frequência normal.

Por esta concepção de tempo do cepstrum, origina-se a habilidade da análise cepstral de mostrar as famílias de picos que mantêm entre si o mesmo espaçamento de frequência. Assim, altos valores de quefrência representam menores espaçamentos de frequência, e baixa quefrência representa maiores espaçamentos. E a amplitude da componente cepstral é proporcional ao tamanho da família identificada, ou seja, o número de componentes igualmente espaçadas.

O Cepstrum é definido como sendo o espectro de potência do espectro de potência em escala logarítmica de um sinal. Matematicamente é definido por:

$$C(\tau) = |TF[\log(X(f))]|^2 \quad 3.35$$

Sendo  $X(f)$  é o espectro de potência do sinal  $x(t)$ , e TF representa a transformada de Fourier.

$$X(f) = |TF(x(t))| \quad 3.36$$

A análise cepstral possibilita a identificação de famílias de picos harmônicos presentes no espectro de frequência do sinal. A aplicação do logaritmo na amplitude enfatiza os picos harmônicos e reduz a influencia de qualquer aleatoriedade imposta pelo caminho percorrido pelo sinal de falha até o ponto de aquisição do sinal (Randal, 1987 *apud* Bezzera, 2004). Quando a falha ocorre na pista girante do rolamento, aparecerá um pico cujo valor inverso do tempo ao qual o mesmo corresponde, é igual à rotação do eixo que é moduladora do sinal. Se o defeito é na pista estacionária, aparecem vários picos com espaçamentos iguais. O valor

inverso do tempo de espaçamento dos picos, é igual a frequência do defeito (Barkov e Barkova, 1995 *apud* Bezerra, 2004).

### **3.4.7 Análise do Espectro de Corrente**

Atualmente a análise do espectro de corrente tem sido usada para identificar defeitos em motores de indução. Klim (1990) mostra equações matemáticas usadas na implementação de um sistema de monitoramento de defeitos através de corrente do estator. Essas equações foram definidas com base na excentricidade do entreferro (espaço compreendido entre o rotor e o estator), pois a excentricidades no entreferro (*air gap*) pode produzir anormalidades na densidade do fluxo do entreferro, (Shoen et. al., 1995a e Shoen et. al., 1995b)

Dessa forma, o espectro de corrente contém informações importantes sobre o estado de máquinas elétricas. As componentes de frequências têm sido determinadas para cada defeito específico.

#### *3.4.7.1. Desbalanceamento (Excentricidade dinâmica)*

No caso da excentricidade dinâmica que varia com a posição do rotor, a oscilação na dimensão do entreferro causa variações na densidade do fluxo do entreferro. Este variação afeta a indutância da máquina produzindo harmônicos da corrente do estator com frequências definidas por (Shoen et. al., 1995a e 1995b)

$$f_{exc} = |f_e \pm kf_{rm}| \tag{3.37}$$

Sendo,  $f_e$  a frequência fundamental da corrente,  $k = 1,2,3,\dots,s$  e  $f_{rm}$  a velocidade de rotação da maquina em Hz.

**3.4.7.2. Defeitos em mancais de rolamento.**

As vibrações nos rolamentos causados por algum defeito nos seus componentes produzem um deslocamento radial entre o rotor e estator da máquina. Essas variações no entreferro também causam variações na densidade do fluxo do entreferro, conseqüentemente na tensão induzida e na corrente, então essas variações produzem harmônicos da corrente nas frequências definida por (Shoen *et. al.* 1995a e 1995b):

$$f_{rot} = |f_e \pm k f_v| \quad (3.38)$$

Sendo,  $f_v$  uma das frequências de defeitos determinadas pelas Equações 3.31, 3.32, 3.33 e 3.34.

## CAPÍTULO 4

### SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS SINAIS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Existem hoje no mercado vários equipamentos comerciais de medição e análise de sinais de vibração e corrente, que normalmente são confeccionados separados e se tornam onerosos dentro de uma cadeia de medição. Dessa forma, algumas empresas criam seus próprios sistemas de aquisição e análise de sinais, para que eles possam atender suas necessidades específicas.

A Eletronorte, a quem pertence a UHE de Coaracy Nunes, atualmente possui um sistema de aquisição (MonitHidro) e processamento de sinais (DIAHGER). Esse sistema de medição ainda não permite que sejam realizadas medições e análises dos sinais de corrente do gerador, devido a dificuldades relacionadas à impossibilidade de serem incorporadas novas variáveis nesse sistema, visto que o sistema é fechado e de responsabilidade do Cepel.

Como nesse trabalho os resultados experimentais foram obtidos a partir de uma bancada experimental que representam o sistema de geração de energia da UHE, houve a necessidade de se desenvolver um sistema de aquisição e análise de sinais semelhante ao existente na UHE, sendo que esse sistema permite que sejam feitas as aquisições e análise de sinais de corrente e vibração do gerador elétrico da bancada.

O desenvolvimento desse sistema é de grande importância, não só como um dos resultados desse trabalho, mas também, por ser um estudo inicial no desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de sinais para a UHE incorporando a variável corrente.

Assim, neste trabalho o sistema desenvolvido possui um sistema de aquisição de dados (*Hardware*) associado a um aplicativo de visualização e análise de dados (*Software*), construído na plataforma *LabView*, capaz de fazer a aquisição e processamento de sinais de vibração e corrente simultaneamente, atendendo as necessidades apresentada durante a obtenção dos resultados.

Esse sistema foi desenvolvido pelos Laboratórios de Engenharia Mecânica e Elétrica da Universidade Federal do Pará em parceria com a Eletronorte (empresa financiadora dos recursos). Nos tópicos a seguir são descritas as partes que compõem o sistema de Aquisição e Análise de Sinais de Vibração e Corrente.

4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO (HARDWARE)

O sistema de aquisição tem a finalidade de coletar sinais elétricos provenientes de sensores, através de uma placa de aquisição de sinais, de modo a converter os sinais analógicos em sinais digitais e, então, permitir o processamento e sua visualização no computador.

A aquisição desses sinais é feita através de um conjunto de instrumentos que compõem o sistema, sendo eles: sensores (vibração ou corrente), condicionador de sinais, placa de aquisição e um PC (computador). A Fig. 4.1 mostra a arquitetura básica do sistema de aquisição e processamento de sinal.

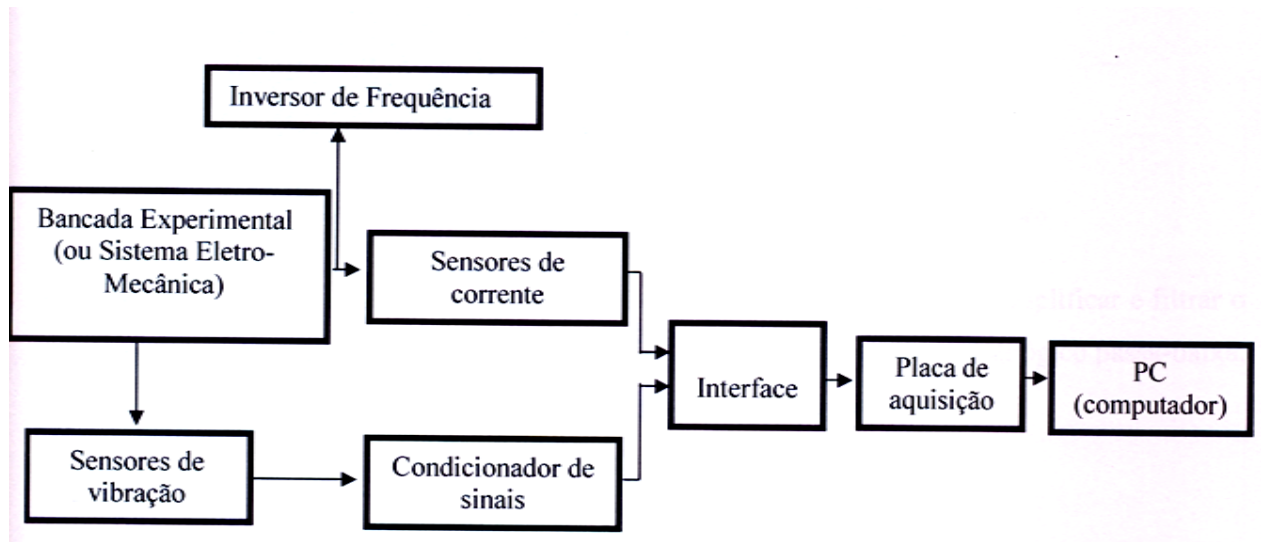


Figura 4.1 – Arquitetura do sistema de aquisição e processamento de sinal

#### 4.2.1. Descrição dos Instrumentos do Sistema de Aquisição

**Sensores de Corrente** – o sistema possui três sensores de corrente da marca LEM e modelo LA 55P. São transdutores de efeito Hall e, portanto, possuem uma resposta rápida às variações de corrente, com faixa de leitura de até  $\pm 70$  A. Esses sensores estão localizados antes do inversor de frequência, para medir a corrente das três fases do gerador, Fig. 4.2(a).

**Sensores de Vibração** – são oito acelerômetros piezoelétricos, marca Wilcoxon e modelo 784A, Fig. 4.2(b). Esses sensores transformam sinais mecânicos em elétricos, possuem sensibilidade de aproximadamente 100 mV/g e alimentação de 12 V, e estão dispostos principalmente no gerador da bancada experimental.



(a)

Figura 4.2 (a) – Sensores de corrente



(b)

(b) – Sensor de Vibração

**Condicionador de sinais** – tem a função de alimentar o sensor de vibração, amplificar e filtrar o sinal que é enviado para a placa de aquisição; possui 16 canais e um filtro analógico passa-baixa, com frequência de corte de 2 kHz. A Fig. 4.3 mostra o condicionador.





Figura 4.3 – Condicionador de sinais

**Placa de aquisição (conversor A/D)** – é a NI PCI – 6024E da *National Instruments* possui 64 entradas analógicas, com barramento PCI, Figura 4.4. Essa placa tem a função de converter os sinais analógicos em digitais.

**PC** – onde está instalada a placa de aquisição de sinais e permite a visualização e tratamento dos sinais.

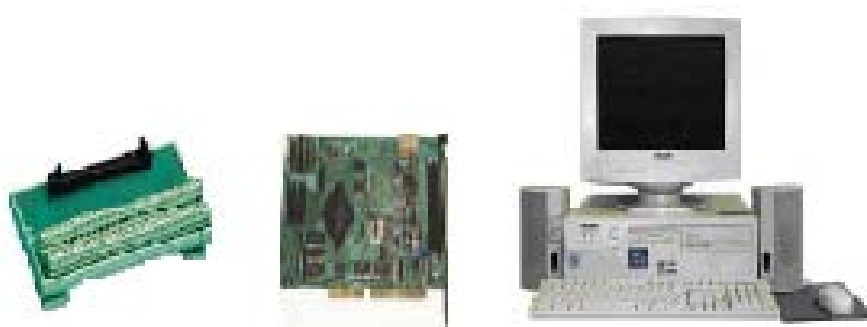


Figura 4.4 – Visualização do conjunto (Interface + placa de aquisição + computador)

### 4.3. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS (*SOFTWARE*)

O *software* utilizado para o desenvolvimento do aplicativo de aquisição e análise de sinais foi o *LabView*, com os *toolkits* de vibração e acústica e os *drives* para aquisição dos sinais provenientes da placa de aquisição instalados no computador.

### 4.3.1 Metodologia do Sistema

O aplicativo é composto de vários módulos, que têm as funções de aquisição, visualização e análise dos sinais. Dessa forma, esse aplicativo permite que sejam feitas as análises dos sinais de vibração e corrente provenientes da bancada experimental, utilizando as técnicas de análise de sinais para identificar os defeitos mecânicos induzidos na bancada.

Na Fig. 4.5 é mostrada a metodologia do aplicativo de aquisição e análise de sinais.

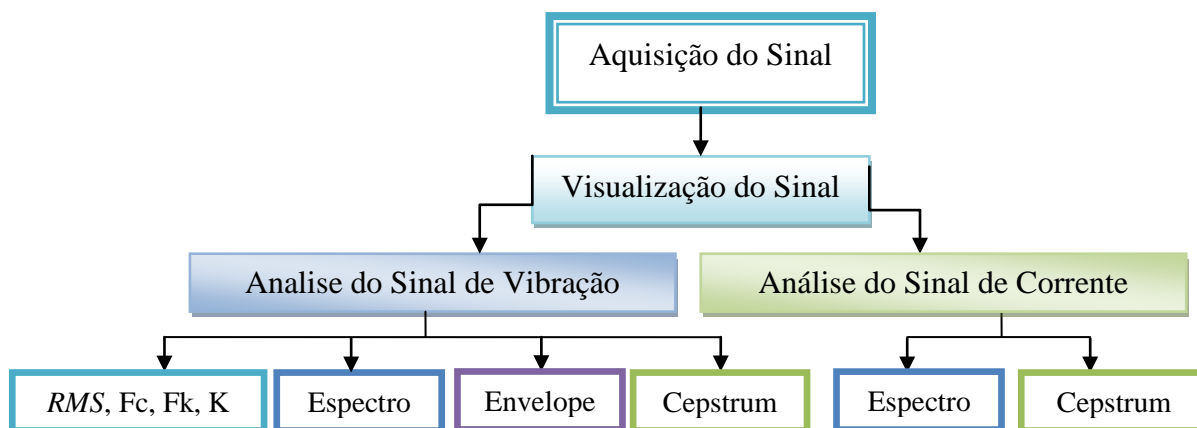


Figura 4.5 – Metodologia do sistema de aquisição e análise de sinais (Software)

### 4.3.2 Aquisição do Sinal

A aquisição dos sinais provenientes da placa de aquisição instalada no computador é feita através do módulo de aquisição, que possui controles de configuração de dados como: número de amostras e taxa de amostragem do sinal, seleção do canal de aquisição, configuração do filtro e diretório de arquivamento de dados. Além disso, nesse módulo existem dois gráficos de visualização dos dados, um no domínio do tempo e outro no domínio da frequência, conforme mostrado na Fig. 4.6.

Uma operação importante nesse módulo de aquisição é a configuração correta do diretório de arquivamento de dados, pois, é nesse momento que é feito o armazenamento dos dados para realização de futuras análises.

Na Figura 4.7 é mostrado o diagrama de blocos que contém os códigos gráficos do módulo de aquisição.

Vale ressaltar, que o módulo de aquisição é utilizado tanto na aquisição de sinais de vibração quanto de corrente, sendo necessária apenas, a seleção do canal correspondente a cada tipo de sinal.

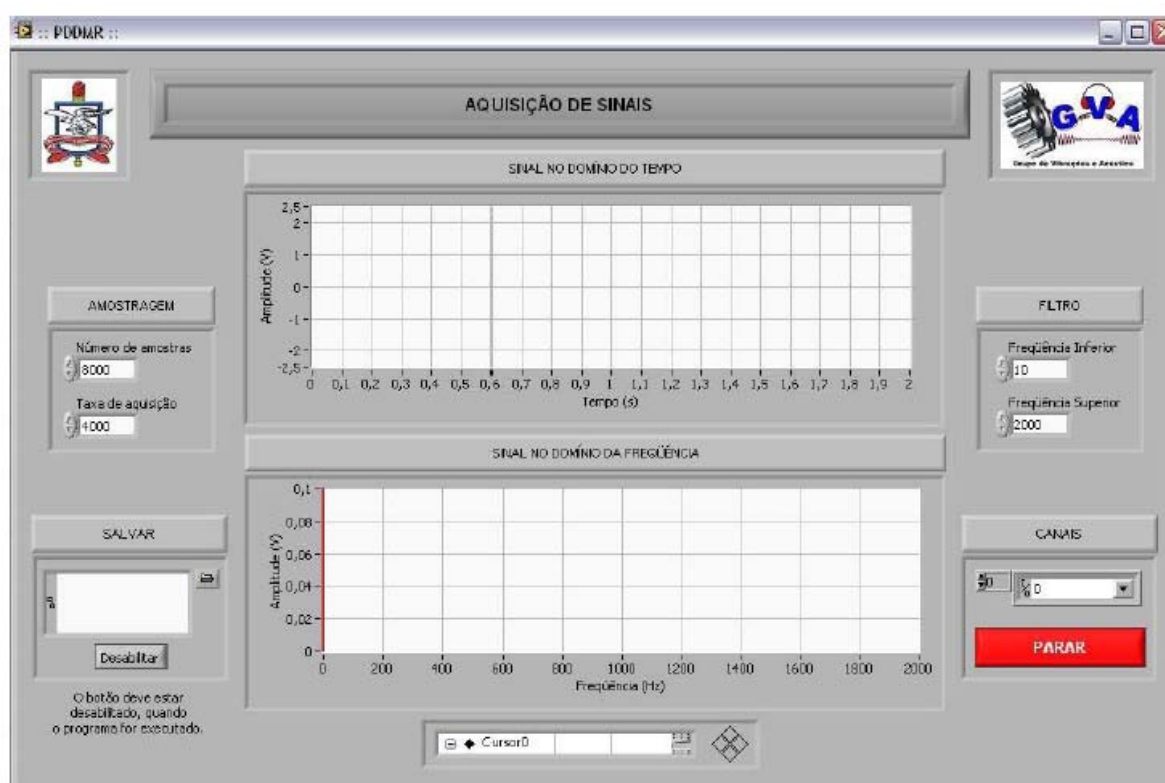


Figura 4.6 – Painel frontal do módulo de aquisição dos sinais

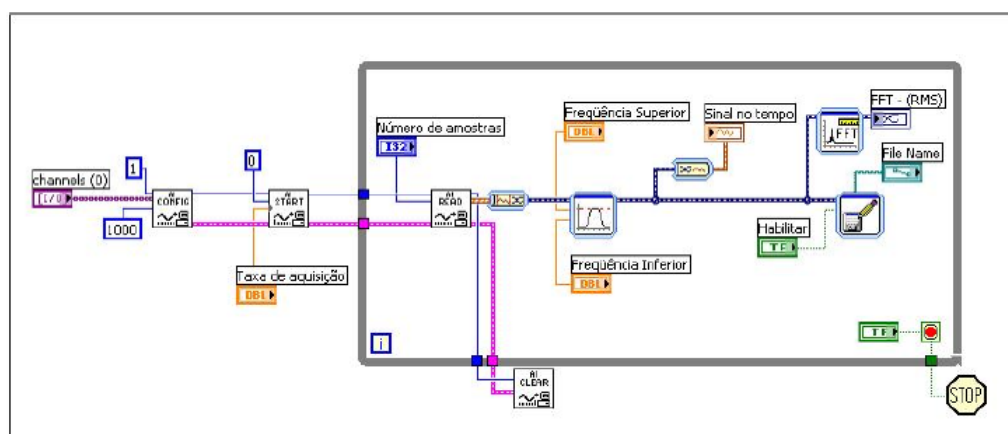


Figura 4.7 – Diagrama de bloco do módulo de aquisição

### 4.3.3. Visualização dos Sinais

A visualização dos sinais é feita através do VI de visualização, que possibilita a leitura dos sinais armazenados pelo módulo de aquisição.

O VI de visualização é responsável pela primeira análise dos sinais; então é necessário o ajuste de alguns parâmetros para garantir a confiabilidade dos valores medidos. No caso da visualização dos sinais de corrente, define-se a constante de calibração para obtenção dos valores de amplitude em amper (A), e para os sinais de vibração, determinam-se os valores de calibração para medir as amplitudes em  $m/s^2$ . Na seção 4.5 é mostrada em detalhes como se definem as constantes de calibração para ambos os casos.

Na tela de visualização dos sinais, mostrada na Fig. 4.8, é possível observar que existem duas opções de visualização do sinal. A primeira, que corresponde a leituras de sinais de vibração e corrente, no domínio do tempo e da frequência, e a segunda, que permite a visualização dos sinais de vibração, no domínio do tempo e da frequência, quantificados a partir das grandezas velocidade e deslocamento. A escolha de uma dessas opções se faz necessária, visto que alguns defeitos induzidos na bancada, quando analisados através de vibração, são mais fáceis de serem identificados usando as grandezas velocidade ou deslocamento, como é o caso do desbalanceamento mecânico.

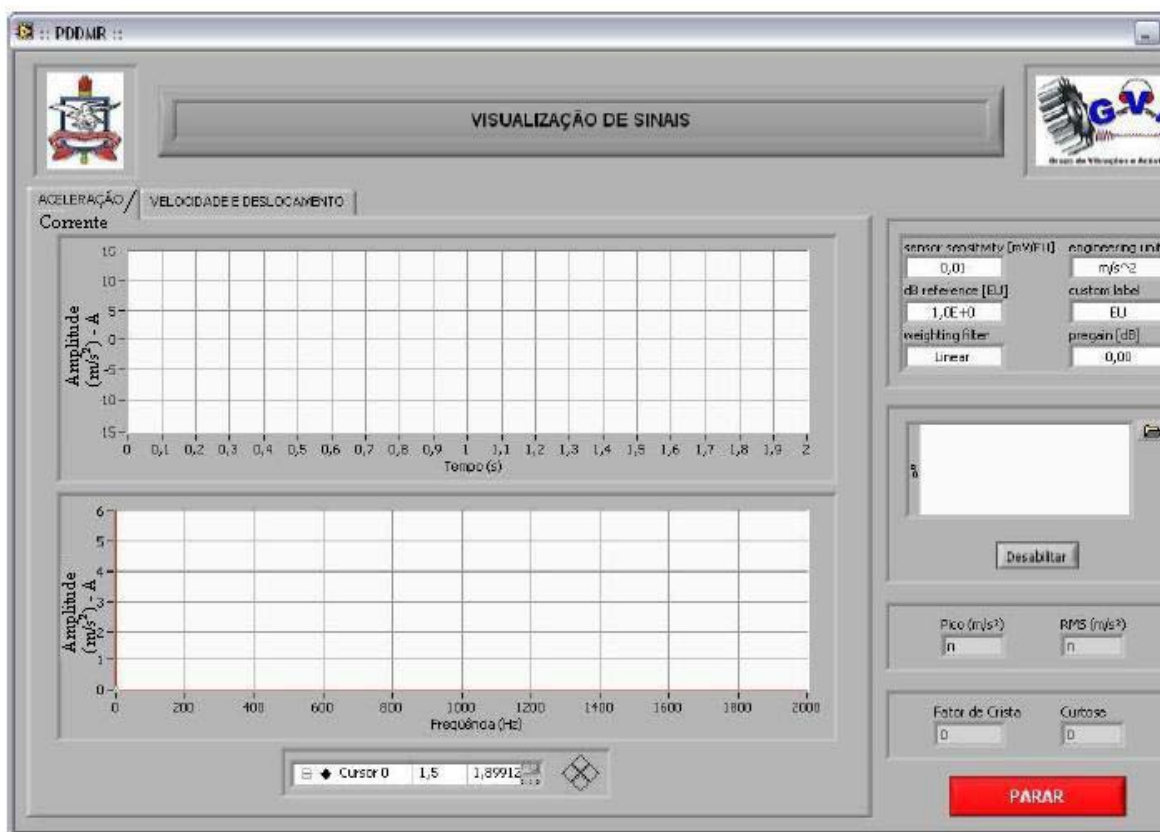


Figura 4.8 – Tela de visualização dos sinais de vibração e corrente

Como já mencionado, uma análise preliminar dos sinais é feita através desse VI, então os valores de pico, eficaz (RMS), fator de crista e curtose são fornecidos inicialmente, com o intuito de orientar o usuário nas análises posteriores.

Na Figura 4.9 apresenta-se o diagrama de blocos correspondente aos códigos gráficos do VI de visualização.

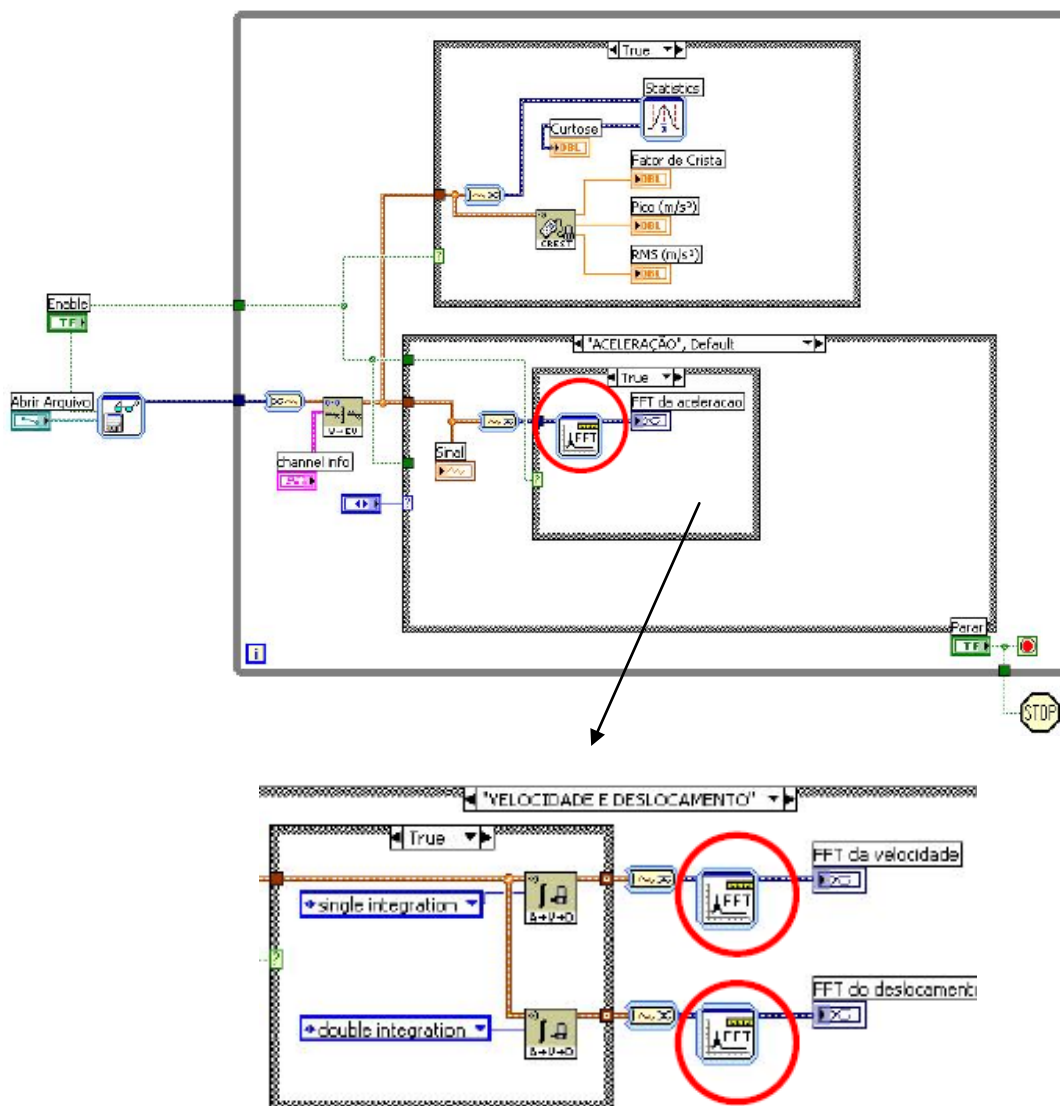


Figura 4.9 – Diagrama de blocos do VI de visualização

#### 4.3.4 Análise dos Sinais

A análise do sinal é de fundamental importância durante o diagnóstico de defeitos de qualquer máquina. Assim, nesse aplicativo foram desenvolvidos 5 VIs de análise de sinais, nos quais foram implementadas as técnicas de análise de sinais comumente usadas na identificação de defeitos em máquinas.

A implementação dessas técnicas no VI de análise, contribuiu substancialmente no resultado final do trabalho, pois através desses VI, foi possível fazer a identificação de cada

defeito simulado na bancada experimental, usando as diferentes técnicas e selecionando a técnica mais adequada.

#### 4.3.5 Simulação de Defeitos

Durante o desenvolvimento dos VIs de análise, nos quais foram implementadas as técnicas de análise de sinais, foi simulado através de equações matemáticas um sinal com características de um defeito em rolamento, usando o aplicativo desenvolvido. Essa simulação contribuiu para validar a aplicação das teorias de técnicas de análise de sinais no aplicativo, visto que durante o seu desenvolvimento, a bancada experimental apresentava-se em fase de construção.

O caso simulado foi a representação de uma sinal de uma máquina que apresenta um defeito localizado na pista externa (estacionária) de um dos seus rolamento. Esse defeito foi escolhido, visto que, sua resposta possibilita a identificação do defeito utilizando todas as técnicas implementadas no aplicativo.

O defeito corresponde ao impacto gerado pela passagem das esferas em um defeito localizado na pista externa. Esses impactos são de mesma amplitude, com espaçamentos constantes entre impulsos com intervalos de  $T_i = \frac{1}{f_i}$ .

O defeito pode ser expresso matematicamente pela equação (Nunes, 1989):

$$g_i(t) = A_i e^{-\alpha_i t} \text{sen}(\Omega_i t) \quad (4.1)$$

sendo  $\alpha_i$  o amortecimento da estrutura para o modo de frequência  $\Omega_i$ , e  $f_i$  a frequência característica do defeito.

Assim, a resposta do sinal da máquina com defeito é:

$$x_i(t) = x(t) + g_i(t) \quad (4.2)$$

sendo  $x(t)$  o sinal da máquina sem o defeito.

Os parâmetros usados para definição do sinal da máquina com defeito foram: a rotação da máquina de 30 Hz; a frequência de defeito  $f_i = 145$  Hz; e a frequência fundamental do sistema excitada pelo defeito  $\Omega_i = 900$  Hz.

A seguir, na Fig. 4.10, é mostrado o sinal do defeito na pista externa do rolamento.

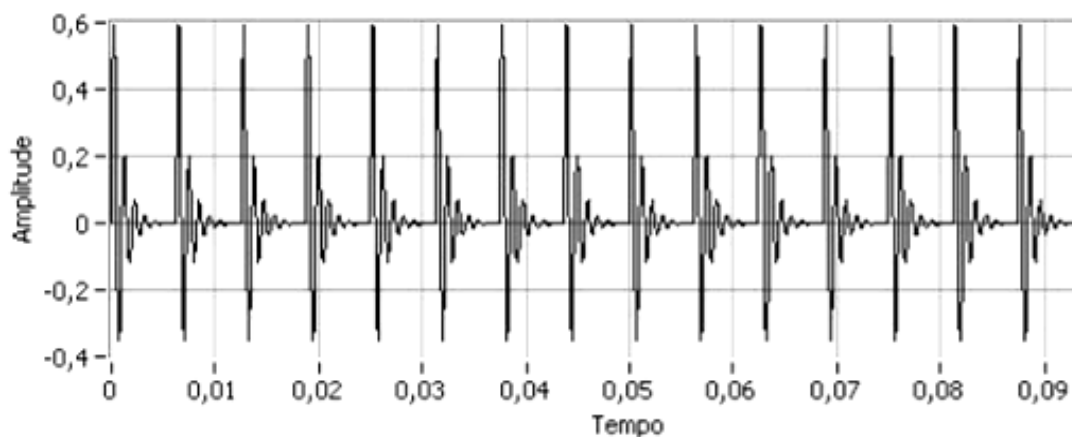


Figura 4.10 – Sinal no domínio do tempo do defeito da pista externa do rolamento

Nas Figuras 4.11 e 4.12 é possível observar o sinal da máquina com o defeito, no domínio do tempo e da frequência, respectivamente.

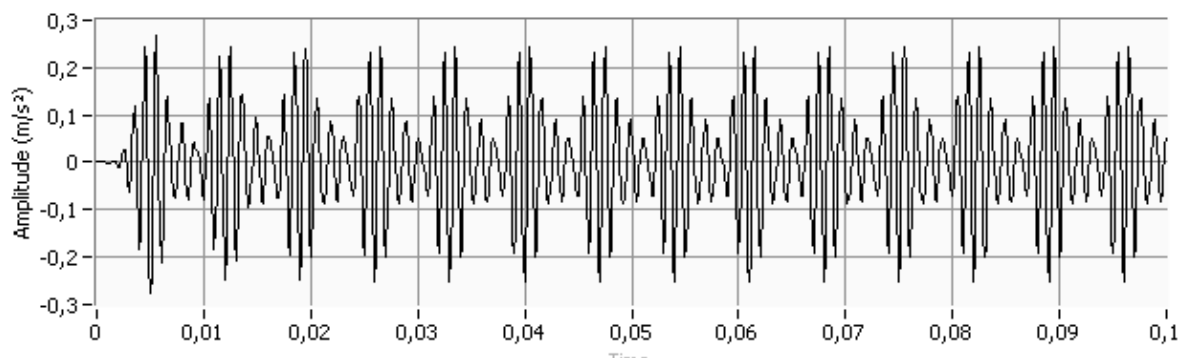


Figura 4.11 – Sinal da máquina com defeito no domínio de tempo



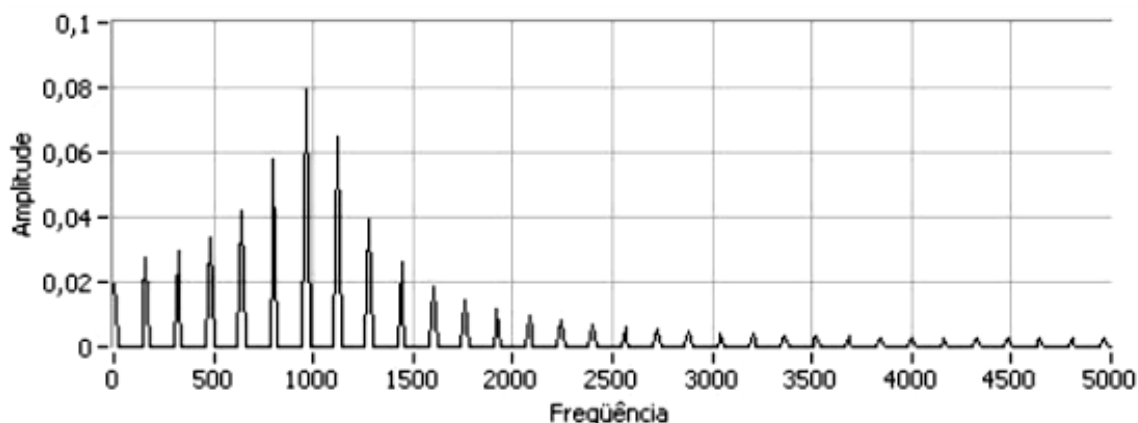


Figura 4.12 – Espectro do sinal com defeito

O sinal simulado foi então analisado através das técnicas de análise de sinais do aplicativo.

Em uma análise inicial, foram encontrados os valores de pico ( $X_{pico}$ ), *RMS* ( $X_{rms}$ ), fator de crista  $F_c$ , fator  $K$  ( $F_k$ ) e curtose ( $K$ ), mostrados na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$

$X_{pico}$	$X_{rms}$	$F_c$	$F_k$	( $K$ )
0,59	0,11	5,37	0,0649	14,1

Pelos resultados da tabela acima, pode-se sugerir inicialmente a presença de algum defeito na máquina, pois o valor do  $F_c > 3$  indica o desenvolvimento de um defeito, conforme ilustrado na Fig. 3.4 do Capítulo 3. O valor de curtose também indica uma anormalidade no rolamento, visto que  $K > 3$  indica a presença de defeitos intruduzindo pulsos no sinal, conforme mostra a Seção 3.3.3 do Capítulo 3.

O resultado da técnica do envelope, usada na identificação do defeito simulado, é visualizado nas Figuras 4.13 e 4.14, com o envelope do sinal e o espectro desse envelope, respectivamente.

Pelo espectro do envelope é identificada claramente a frequência de, aproximadamente, 145 Hz, referente à frequência do defeito simulado.

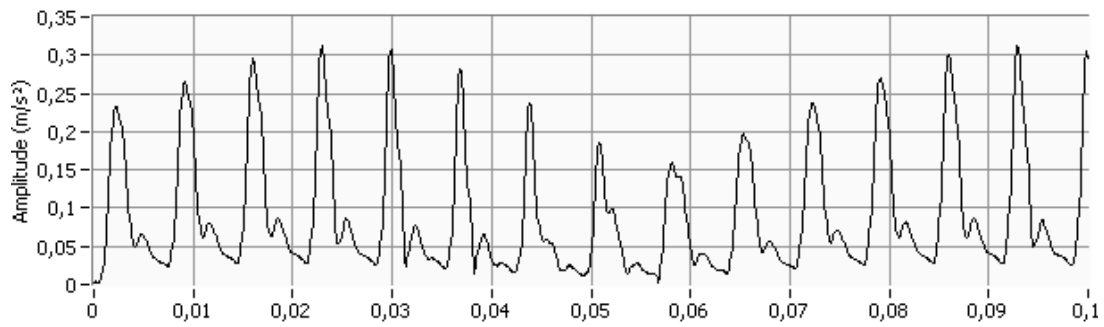


Figura 4.13 – Envelope do sinal simulado

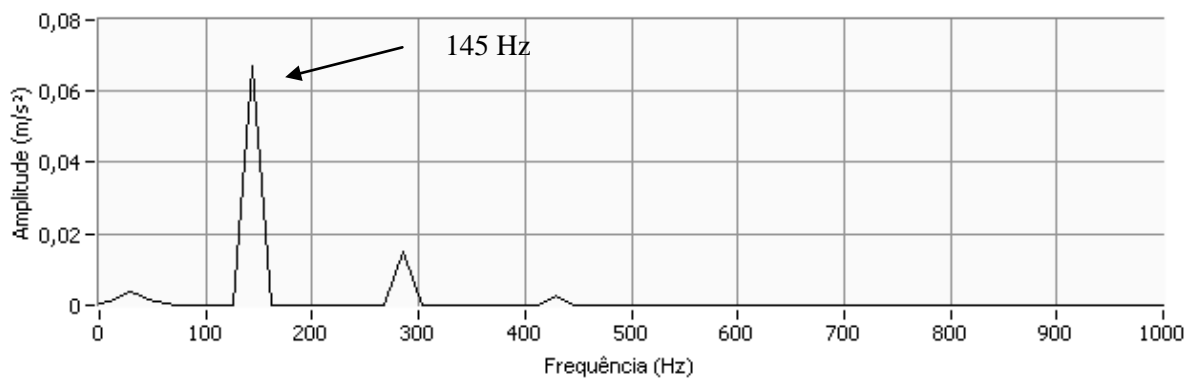


Figura 4.14 – Espectro do Envelope do sinal simulado

A Fig. 4.15 mostra o gráfico de cepstrum. Nesse gráfico observa-se nitidamente um pico em 0,007 s e pequenos picos em 0,014 s e 0,021 s, sendo espaçados de 0,007 s, cujo valor inverso é de 142,86 Hz, que corresponde aproximadamente à frequência de defeito do rolamento, confirmando o valor encontrado pela técnica do envelope.

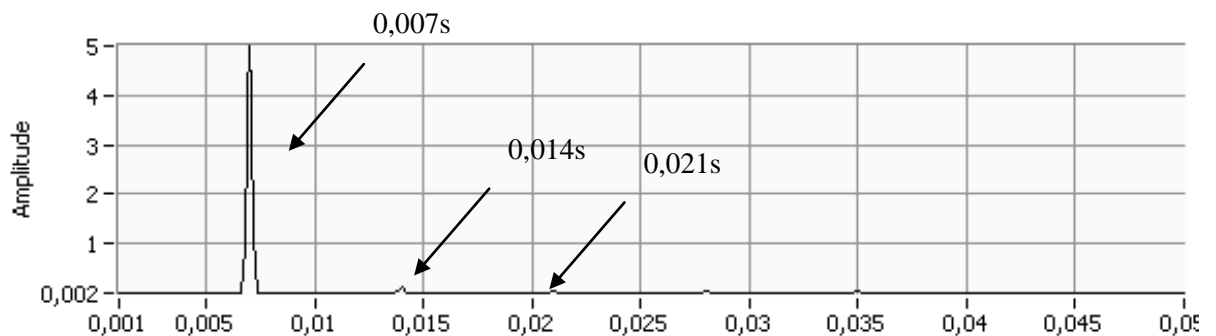


Figura 4.15 – Cepstrum do sinal do defeito simulado

#### 4.4 CALIBRAÇÃO DOS SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

Um sistema de aquisição de boa qualidade deve ser capaz de operar com pequenos erros. Seus princípios construtivos e operacionais devem ser projetados para minimizar erros sistemáticos e aleatórios ao longo da sua faixa de medição, nas suas condições de operação nominais. Entretanto, por melhores que sejam as características de um sistema de aquisição, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influência externa. A perfeita caracterização das incertezas associadas a estes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura. Embora, em alguns casos, os erros de um sistema de aquisição possam ser analítica ou numericamente estimados, na prática são utilizados procedimentos experimentais denominados calibração. Estes procedimentos correlacionam os valores indicados pelo sistema de aquisição e sua correspondência com um valor padrão mensurável.

Com isso, para que houvesse confiabilidade nas medições realizadas pelo sistema de aquisição desenvolvido nesse trabalho, foi necessária a calibração do sistema. Essa calibração foi realizada em duas etapas: a primeira, relacionada à aquisição dos sinais de vibração e a segunda, com a aquisição dos sinais de corrente. A seguir, são descritos os procedimentos de todas as etapas de calibração do sistema.

##### **4.4.1 Calibração do Sistema de Aquisição de Sinais de Vibração**

Essa etapa da calibração foi realizada no *Lacen* (Laboratório Central da Eletronorte), considerado o único na região Norte, com certificação reconhecida pelo INMETRO.

A parte da cadeia de medição responsável pela aquisição dos sinais de vibração é composta pelos seguintes elementos: oito acelerômetros, um condicionador de sinais, uma placa de aquisição e um computador com o aplicativo de aquisição de sinais, conforme descrito na seção 4.3.2.1.

O procedimento de calibração nesta etapa constitui-se basicamente na geração de um sinal senoidal, através de um gerador de sinais, com frequência e amplitude conhecidas. Este sinal foi enviado a um amplificador de potência e, em seguida, para uma excitador de vibração (*Shaker*), no qual foram acoplados os acelerômetros. A Fig. 4.16 mostra o esquema da cadeia de calibração.

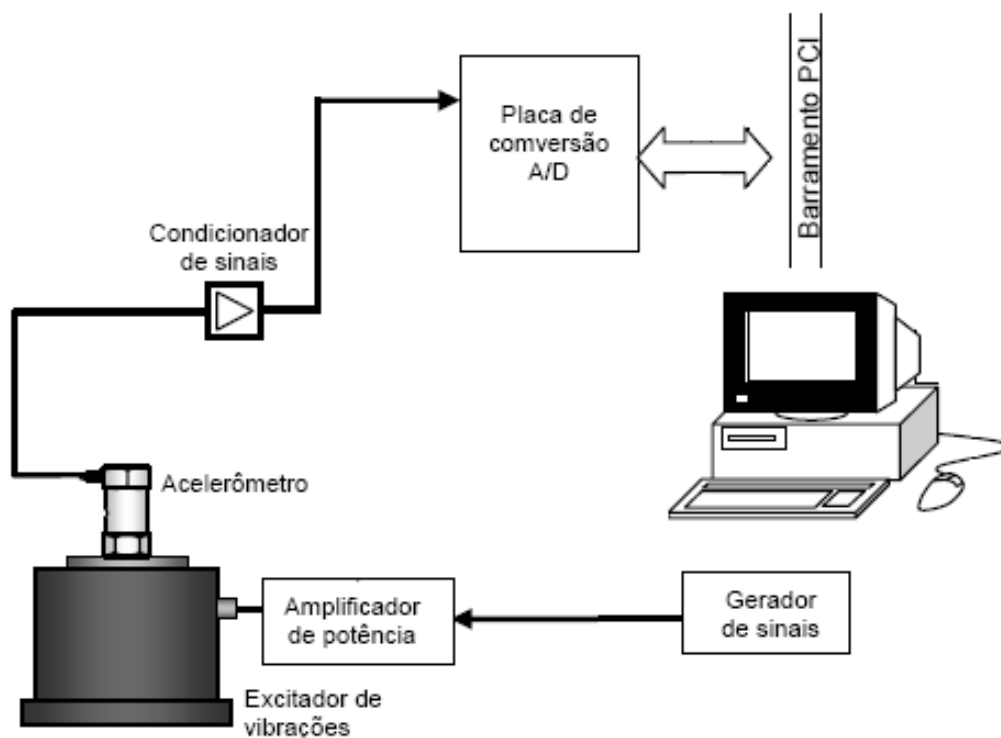


Figura 4.16 – Cadeia de calibração

Os acelerômetros foram fixados um a um, sendo que para cada acelerômetro foram realizadas medições nas frequências de 30, 60 e 150 Hz. Dessa forma, os valores de amplitudes medidos pelo sistema de aquisição foram comparados com os valores mensurados oriundos do gerador de sinal.

Na Fig. 4.17 é possível visualizar o procedimento de calibração realizada nas instalações do Lacen.

Na Tab. 4.2 têm-se as constantes de calibração obtidas para os oito acelerômetros nas frequências de 30, 60 e 150 Hz.



Figura 4.17 – Calibração do sistema de aquisição

Tabela 4.2 – Constantes de calibração dos acelerômetros, nas frequências de 30, 60 e 150 Hz

<b>Acelerômetro</b>	<b>30 Hz</b>	<b>60 Hz</b>	<b>150 Hz</b>
1	332,2	332,2	332,2
2	331,8	331,8	331,8
3	332,3	332,3	332,3
4	334,1	334,1	334,1
5	331,4	331,4	331,4
6	332,1	332,1	332,1
7	331,7	331,7	331,7
8	331,9	331,9	331,9

#### 4.4.2 Calibração do Sistema de Aquisição de Sinais de Corrente

A calibração da parte do sistema que realiza aquisição dos sinais de corrente foi realizada no Laboratório de Elétrica da Universidade Federal do Pará, onde está instalada a bancada experimental e, conseqüentemente, os sensores de corrente. O procedimento de calibração desses sensores foi feito comparando os valores de corrente obtidos pelo sistema de aquisição com os valores medidos por um osciloscópio por meio de um alicate amperímetro, com sensibilidade conhecida. Esses valores foram também comparados aos valores das cargas resistivas, acionadas e controladas por um inversor de frequência. Esse inversor de frequência tem a finalidade de simular diferentes cargas, que no caso real representa os consumidores da energia gerada pela UHE. Dessa forma, foram definidas as constantes de calibração para cada um dos sensores de corrente.

As cargas simuladas para a obtenção das constantes de calibração foram de 5, 10 e 14 A. Foram feitas apenas medições com esses valores de carga, em virtude de que, à medida que se aumentava a carga, mais os valores de corrente variavam e, em alguns casos, o gerador perdia o sincronismo.

Na Tab. 4.3 são mostradas as constantes de calibração de cada um dos sensores de corrente.

Tabela 4.3 – Constantes de calibração dos sensores de corrente.

<b>Sensores</b>	<b>Constante de calibração</b>	
<b>Fase A</b>	5 A	86,3 V/A
	10 A	86,7V/A
	14 A	87,4V/A
<b>Fase B</b>	5 A	86,3V/A
	10 A	86,7V/A
	14 A	87,4V/A
<b>Fase C</b>	5 A	86,3 V/A
	10 A	86,7V/A
	14 A	87,4V/A

## **CAPÍTULO 5**

### **A BANCADA DE TESTE E OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo apresenta-se a Bancada de Teste, desenvolvida para substituir o Sistema de Geração de Energia da UHE de Coaracy Nunes na geração de dados experimentais, e procedimentos de modelagem para obtenção de parâmetros necessários às análises, bem como os ensaios experimentais realizados sobre a Bancada de Teste.

Inicia-se com a descrição da bancada e a montagem experimental utilizada durante os ensaios. Posteriormente, descreve-se os procedimentos para a introdução de desbalanceamento mecânico rotativo e de defeitos nas pistas (externa e interna) dos rolamentos. Em seguida, apresenta-se uma análise estática do eixo do gerador, para verificar distribuição de tensões e a deflexão máxima atuante no eixo em função do desbalanceamento induzido no rotor do gerador. Finalizando, descreve-se a metodologia usada no processo de identificação das frequências de ressonância do sistema, que são excitadas em função dos defeitos nos rolamentos. A identificação dessas frequências auxilia na utilização da técnica do envelope para identificar os defeitos que foram intencionalmente impostos nos rolamentos do gerador síncrono que é parte integrante da bancada.

#### **5.2. BANCADA EXPERIMENTAL**

##### ***5.2.1. Descrição da Bancada***

A bancada experimental foi montada no Laboratório de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, sendo composta pelos seguintes componentes: um motor CC, um

gerador síncrono, um conversor CA/CC, um inversor de frequência e um banco de resistências, conforme mostrados nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3.

O motor CC representa aqui a fonte de potência da bancada, o que equivaleria ao papel que a turbina hidráulica desempenha em hidrogeradores, sendo a simulação de carga feita através do ajuste da corrente de campo do gerador, por meio do conversor CA/CC.

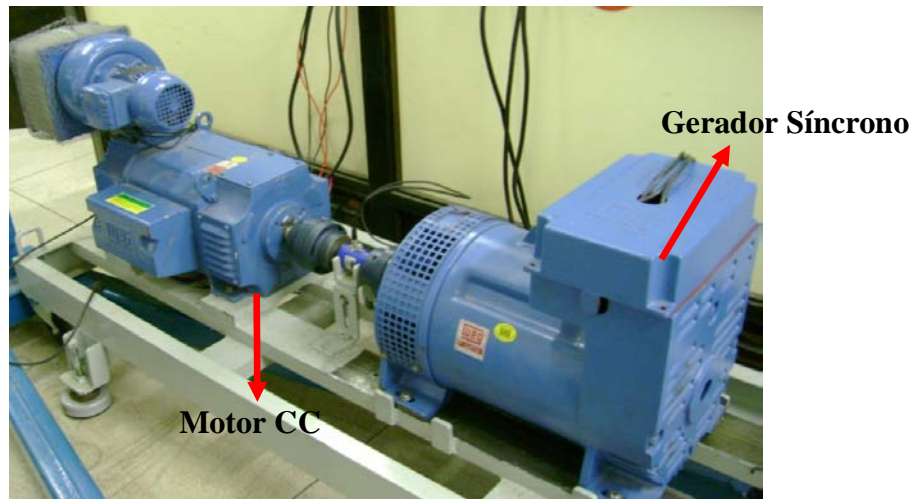


Figura 5.1 – Bancada Experimental. (Motor CC e Gerador Síncrono)



Figura 5.2 – Banco de resistência



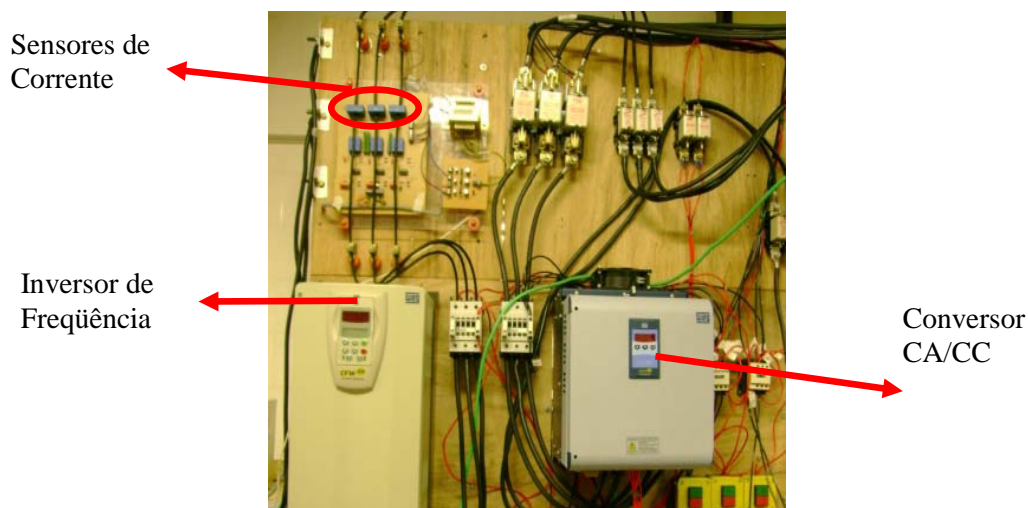


Figura 5.3 – Mecanismos de acionamento e controle da bancada

O gerador síncrono possui quatro pólos e sua tensão induzida é CA senoidal trifásica, sendo utilizada a rotação de 1800 RPM e frequência da corrente de 60 Hz nos testes experimentais. Neste componente foram introduzidos os defeitos que serão analisados posteriormente.

O banco de resistência representa os consumidores do sistema de geração de energia da UHE. Esse banco simula então a carga do sistema, e seu controle é feito por meio do inversor de frequência.

Na tabela 5.1 são mostradas as especificações técnicas do motor CC e do gerador síncrono.

Tabela 5.1 – Especificações técnicas do motor CC e do gerador síncrono.

	<b>Motor CC</b>	<b>Gerador</b>
Fabricante	WEG	WEG
Modelo	FAF 160L	GTA 160 SI 13
Frequência	60 Hz	50 Hz e 60 Hz
Potência	118 kW / 16,03 CV	de 12,5 a 4.200 kVA
Rotação	1740 RPM	1500 RPM e 1800 RPM
Tensão	220 V	120/208/220/380/440/480V e 600 V.
Corrente	41 A	Até 70A
Polaridade		4 pólos

5.2.2 Aquisição dos Sinais e Disposições dos Sensores

Os dados obtidos durante os ensaios experimentais, foram coletados utilizando o sistema de aquisição desenvolvidos neste trabalho, descrito no capítulo 4.

Na aquisição dos sinais de vibração o sistema foi configurado para janela Hanning, taxa de aquisição de 4 kHz, números de amostras igual a 8000 e amplitudes medidas em aceleração ( $\text{mm/s}^2$ ), velocidade ( $\text{mm/s}$ ) e deslocamento ( $\mu\text{m}$ ). Os acelerômetros foram dispostos na bancada conforme a Figura 5.4 e identificados de acordo com a Tabela 5.2.

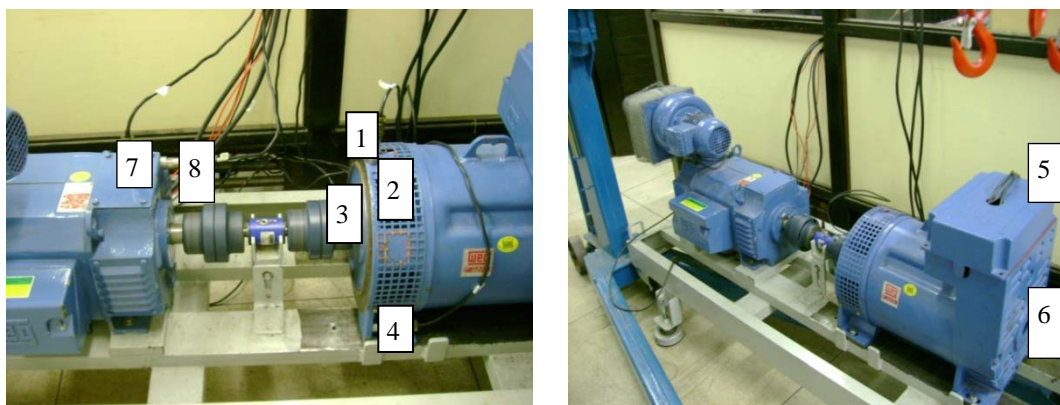


Figura 5.4 – Disposições dos acelerômetros

Tabela 5.2 – Disposição dos acelerômetros

<b>Acelerômetro (Acel)</b>	<b>Posição</b>
1	Radial dianteira do gerador
2	Radial dianteira do gerador
3	Axial dianteira do gerador
4	Axial dianteira do gerador
5	Radial traseira do gerador
6	Axial traseira gerador
7	Radial dianteira motor cc
8	Axial dianteira motor cc

Com intuito de garantir a qualidade nas medições durante os ensaios experimentais, houve a preocupação com a seleção dos pontos de medição dos sinais de vibração, visto que, para se medir a vibração de qualquer máquina, o ideal é selecionar pontos em que a trajetória da vibração desde a fonte até o ponto de medida seja a mais sólida e curta possível, garantindo a máxima fidelidade na transmissão dos dados. Os mancais geralmente são sempre bons pontos de medição.

No caso do gerador em estudo, os mancais são de difícil acesso, pois fazem parte da região interna das tampas dianteira e traseira do gerador. Dessa forma, antes de se definir os pontos externos acessível durante o funcionamento da máquina que pudessem ser os portadores de todas as informações das vibrações desejadas, primeiramente mediu-se os sinais de vibrações em diversos pontos do gerador para garantir a captura de todas as informações inerentes do equipamento, para que selecionassem os pontos de medição com os melhores resultados.

Assim, após uma análise preliminar de medições realizadas na bancada, optou-se por dar continuidade ao processo de medição e análise com os sinais capturados pelos acelerômetros localizados na parte dianteira do gerador, ou seja, aqueles que foram posicionados nos seguintes pontos: 1, 2, 3 e 4. Esses pontos foram selecionados em virtude de estarem localizados em uma região com menor interferência possível, e mais próxima das fontes geradoras das vibrações. Além disso, os tipos de defeitos induzidos no gerador causam vibrações na direção radial, e que por isso, os sensores na posição radial são mais indicados para se medir esse tipo de vibração.

Quantos aos sinais de corrente foram capturados pelos sensores de corrente localizados antes do inversor de frequência, conforme Figura 5.3. Os três sensores fazem as medições nas fases A, B e C da corrente na saída do gerador. Nas análises dos sinais de corrente foram utilizados os sinais medidos na fase A da corrente do estator.

### 5.3 APLICAÇÕES DOS DEFEITOS

Os defeitos que foram induzidos na bancada são: o desbalanceamento mecânico rotativo e os defeitos nos elementos dos mancais de rolamentos. Tais defeitos geram uma excentricidade dinâmica no entreferro do gerador, que provocam uma variação na densidade do fluxo magnético produzindo harmônicos da corrente do estator com frequências características. Como visto no capítulo 3, essas frequências podem ser correlacionadas com a vibração da máquina.

### 5.3.1 Desbalanceamento Mecânico Rotativo

O desbalanceamento mecânico rotativo, que pode ser entendido como a variação da posição entre o centro de massa e o centro de giro de um sistema rotativo, causado por uma distribuição de massa não uniforme, é uma das principais fontes de vibração e causa de falhas em equipamentos rotativos na indústria.

O desbalanceamento normalmente é advindo de imperfeições e não-homogeneidades que formam o rotor. Supondo o rotor como sendo rígido, considera-se estas imperfeições como atuando em único ponto, deslocado de uma distância  $e$  do seu centro geométrico, conforme Fig. 5.5.

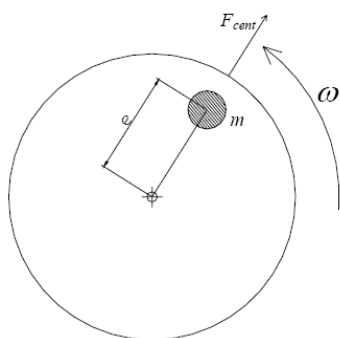


Figura 5.5 – Desbalanceamento mecânico rotativo

A força causadora da vibração é gerada pela excentricidade do centro de gravidade do rotor e pela sua rotação. Essa força é determinada pela Equação:

$$F_{desb} = m \cdot e \cdot \omega^2 \quad (5.1)$$

O desbalanceamento mecânico rotativo pode ser classificado como: desbalanceamento estático, desbalanceamento semi-estático, desbalanceamento dinâmico e desbalanceamento dinâmico puro.

O desbalanceamento estático é causado quando o eixo principal de massa é deslocado paralelamente ao eixo do rotor.

Por sua vez, o desbalanceamento semi-estático é caracterizado pela intersecção do eixo principal com o eixo de rotação em um ponto distinto do centro de gravidade do rotor.

Já o desbalanceamento dinâmico puro é definido pelo deslocamento do eixo principal de massa, apresentando intersecção com o eixo de giro através do centro de gravidade. Teoricamente, essa condição pode ocorrer através da existência de duas massas desbalanceadoras, defasadas em 180°, localizadas nos extremos do rotor.

Por último, o desbalanceamento dinâmico é decorrente da soma das parcelas de desbalanceamento estático e desbalanceamento dinâmico puro. Nesse tipo de desbalanceamento, o eixo principal de massa e o eixo de giro não coincidem ou se interceptam, fazendo com que as medições de vibração nos mancais sejam geralmente diferentes em amplitude, e a diferença de fase está entre 0° e 180°. Os quatro tipos de desbalanceamento citados são ilustrados esquematicamente na Figura 5.6.

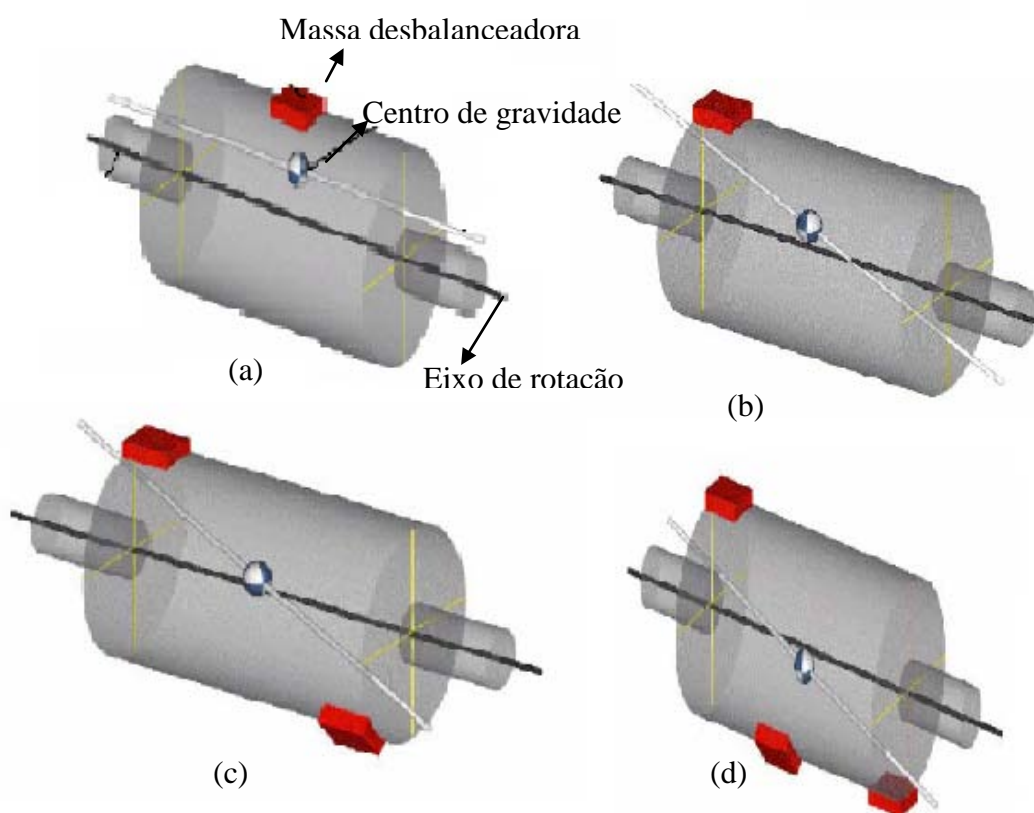


Figura 5.6 – Tipos de desbalanceamento: (a) estático; (b) semi-estático; (c) dinâmico puro; (d) dinâmico (Modificado, Sousa, 2005)

*5.3.1.1. Determinação do Desbalanceamento Residual*

O desbalanceamento mecânico rotativo, como já mencionado, pode ser definido como sendo a má distribuição de massa de um rotor. O balanceamento de máquinas é importante para evitar avarias causadas por fadiga em estruturas associadas, carga excessiva nos rolamentos de apoio, transmissão de vibração, ruído externo excessivo e ainda para melhorar a duração e a vida útil do equipamento em serviço.

Balanceamento é o processo que melhora a distribuição de massa de um rotor, de modo que ele gire em torno de seu eixo sem que surjam forças centrífugas desbalanceadas. É sabido que este objetivo só pode ser conseguido até certo grau, pois mesmo depois de balanceado, o rotor pode possuir certo desbalanceamento residual. Estas recomendações estão de acordo com o desbalanceamento residual admissível.

O desbalanceamento residual admissível  $U_{adm}$  cresce em geral com o aumento da massa do rotor. De forma que defini-se o desbalanceamento específico admissível  $e_{adm}$  como sendo o desbalanceamento residual admissível  $U_{adm}$  dividido pela massa total do rotor  $M$ , Equação (5.2),

$$e_{adm} = \frac{U_{adm}}{M} \tag{5.2}$$

O desbalanceamento específico é dado em  $\mu\text{m}$ , quando o desbalanceamento é dado em g.mm e a massa total em kg.

Em um rotor com desbalanceamento estático puro, o desbalanceamento específico admissível corresponde à excentricidade máxima admissível do centro de massa em relação ao eixo de rotação. Em um rotor com desbalanceamento dinâmico o desbalanceamento específico é somente um parâmetro para avaliar o estado de balanceamento em que o rotor se encontra.

Em geral o desbalanceamento máximo tolerável por um rotor é inversamente proporcional à velocidade de rotação. Dessa forma, define-se a classe ou grau de qualidade de balanceamento  $n$  para uma dada qualidade de balanceamento por:

$$n \geq \omega e_{adm}, \tag{5.3}$$

sendo,  $\omega$  a máxima velocidade de rotação em  $rad/s$  em que o rotor deverá operar e  $e_{adm}$  o desbalanceamento específico admissível em mm. Portanto, o grau de balanceamento é dado em  $mm/s$ , ou seja, em unidade de velocidade.

Diz-se que um rotor está balanceado para classe ISO Gn quando o produto  $\omega e_{adm}$  não supera o valor  $n$ , definido por uma série geométrica de razão 2,5 (na realidade  $\sqrt[3]{16}$ ), com os seguintes valores: 0,4; 1; 2,5; 6,3; 16; 40; 100; 250; 630; 1600 e 4000. Valores menores representam qualidades de balanceamento superiores, enquanto valores maiores representam qualidades de balanceamento inferiores. Nos anexos 1 e 2 são apresentados os valores de qualidade de balanceamento recomendados para diversos tipos de rotores.

A importância de se estudar o desbalanceamento residual admissível é devido à aplicação de um desbalanceamento no rotor do gerador capaz de provocar alterações significativas nos sinais de vibração e corrente do gerador. Assim, antes de se introduzir o defeito de desbalanceamento no rotor do gerador da bancada, foi determinado o desbalanceamento específico admissível  $e_{adm}$  para o rotor, sendo esse valor utilizado para determinar o valor da massa adicionada ao rotor capaz de produzir o desbalanceamento acima do valor admissível. A seguir são mostrados os cálculos para determinação do desbalanceamento residual admissível, sendo que os valores utilizados nos cálculos foram retirados da Tabela A1 e do gráfico A2 nos anexos 1 e 2 de acordo com a norma ISO 1940/1.

O rotor do gerador de acordo com a Tabela A1 está na classe de qualidade de desbalanceamento G 2,5 e sua velocidade máxima de operação é 1800 rpm, então de acordo com o gráfico A2, o desbalanceamento específico admissível é  $e_{adm} = 12,5\mu m$ .

Utilizando a Equação (5.1) e sabendo que a massa do rotor é de 43 Kg, o desbalanceamento residual admissível é de:

$$U_{adm} = e_{adm} M = 12,5.43 = 537,3 mm.g$$

Com o valor do desbalanceamento admissível calculado, foi realizada uma análise estática do modelo do rotor, com o objetivo de determinar a distribuição de tensão e a deflexão máxima do rotor, considerando a força provocada pelo desbalanceamento mecânico rotativo sob condição estática. A seguir é descrita de forma sucinta a análise estática do rotor.

5.3.1.2. Análise Estática do rotor através do MEF.

A análise estática do rotor foi feita através do Método de Elementos Finitos (MEF). O MEF permite a simulação de um sistema físico (geometria, material e carregamento), por uma aproximação matemática do sistema real, utilizando-se blocos interrelacionados denominados de elementos, de modo que um sistema real de infinitos graus de liberdade é aproximado para um sistema de número finito de graus de liberdade.

Ao contrário das soluções analíticas, que mostram o comportamento exato do sistema em qualquer um dos seus pontos, as soluções numéricas se aproximam da solução exata somente em alguns pontos discretos do sistema (Soeiro, 2002).

No sistema estudado, seria possível realizar uma análise de dinâmica de rotor, mas como o objetivo é ter uma estimativa da máxima deflexão do eixo em virtude do desbalanceamento do rotor e, também, dos níveis de tensão atuante no sistema, como forma de preservar a sua integridade, optou-se pela análise estática. Isto não acarreta problema, uma vez que o sistema opera abaixo da sua primeira velocidade crítica.

A simulação computacional foi realizada através do software ANSYS e o modelo de elementos finitos foi criado a partir do elemento BEAM 189. O BEAM 189 é um elemento finito de viga, definido por quatro nós, utilizado para análises estruturais de vigas. Esse elemento se baseia na teoria de Timoshenko para vigas, possuindo seis ou sete graus de liberdade em cada nó. Na Figura 5.7 pode-se visualizar o elemento BEAM 189.

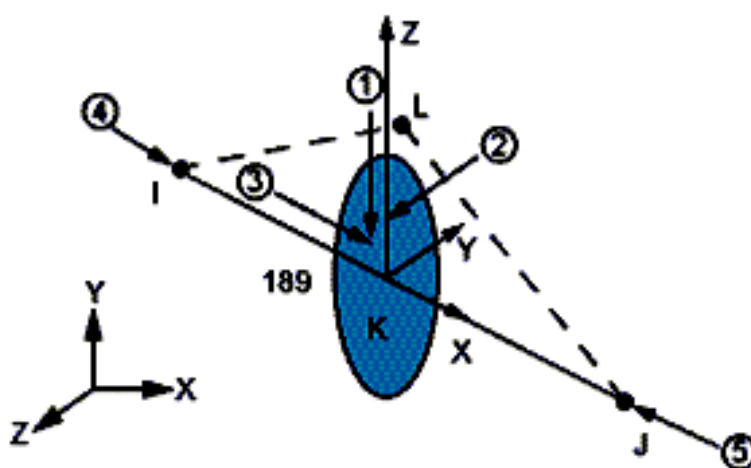


Figura 5.7 – Elemento BEAM 189



O tipo de análise realizada no rotor do gerador foi estática bidimensional. A geometria do modelo foi construída de acordo com as dimensões mostradas na Tabela 5.3. e ilustrada na Figura 5.8.

Tabela 5.3 – Características Geométricas do Rotor.

Seção	Diâmetro (mm)	Comprimento(mm)
1	25,00	70,00
2	27,50	30,00
3	35,75	15,00
4	36,00	40,00
5	37,50	57,50
6	94,00	191,50
7	30,00	76,50
8	27,50	56,50
9	22,50	23

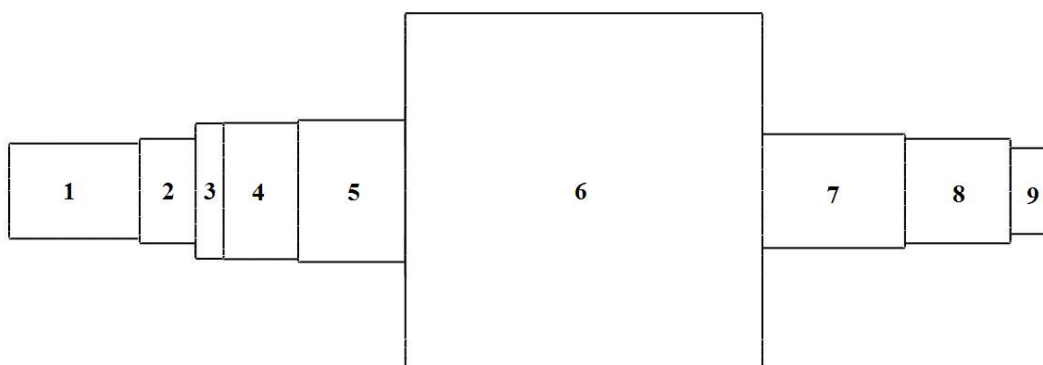


Figura 5.8 – Modelo esquemático do gerador e suas respectivas seções

Os cálculos foram realizados a partir da consideração de carregamentos críticos na qual o rotor estava submetido e das propriedades físicas dos materiais que o compõe, cujos valores podem ser vistos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedade dos materiais.

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Coefficiente de poisson
AISI 1020	210	210	320	0,3

Os resultados da análise foram obtidos a partir da construção do modelo numérico que representa uma aproximação do modelo real apresentado na Figura 5.9. No modelo real pode – se observar que o rotor é composto pelos seguintes componentes: o eixo (1), o ventilador (2), pólos do rotor formado por chapas de aço (3) e excitatriz (4).



Figura 5.9 – Rotor do Gerador com eixo (1), ventilador (2), as chapas de aço (3) e rotor da excitatriz (4)

A geometria do modelo foi construída usando apenas as dimensões do eixo e dos pólos. O eixo foi construído levando em consideração todas as seções variáveis que ele possui, os pólos foram representados por um cilindro acoplado ao eixo formado um só componente. A figura 5.10 mostra o modelo numérico utilizado na análise.

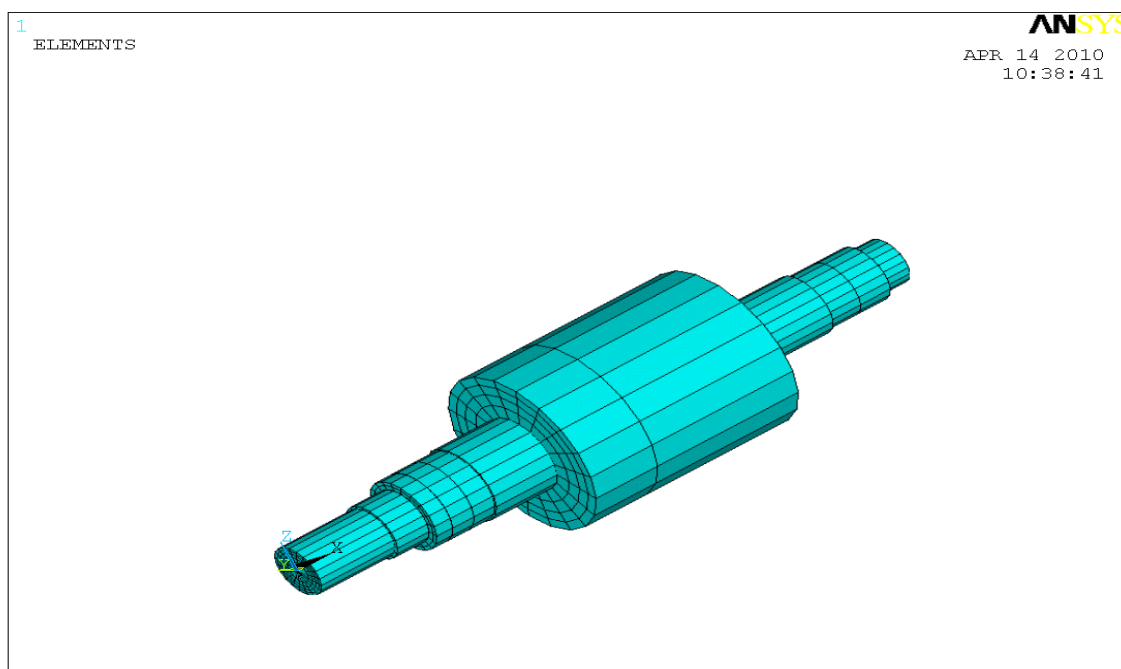


Figura 5.10 – Modelo computacional do rotor

Os carregamentos considerados na análise para verificar a distribuição de tensão e deformação ao longo do rotor foram: o carregamento referente ao peso do rotor (eixo + pólos), distribuído ao longo do comprimento do rotor; o carregamento referente ao peso do ventilador concentrado na região que ele se localiza; o carregamento referente ao peso da excitatriz concentrada na região onde ela se localiza e a força de desbalanceamento, considerando 10 vezes o desbalanceamento residual do rotor, aplicada no meio do rotor. Esses valores de carregamento podem ser vistos na Tabela 5.5 e ilustrados na Figura 5.11

Tabela 5.5 – Carregamentos utilizados na análise estática do rotor.

<b>Origem do Carregamento</b>	<b>Força (N)</b>
Peso do rotor (eixo + pólos)	422,26
Peso da Excitatriz	42N
Peso do Ventilador	5,16N
Desbalanceamento	190,9

A finalidade dessa análise é identificar os pontos críticos de tensão e deformação no eixo do gerador, provocados pelo desbalanceamento mecânico rotativo. Os resultados apresentados na Figura 5.12 mostram que o valor máximo de tensão encontrado é de 11,2MPa, que de acordo com as propriedades mecânicas do material esse valor encontra-se abaixo do limite estabelecido. O comportamento apresentado pelas tensões mostram que o eixo sofreu deformação máxima de 20µm, como é mostrado na Figura 5.13.

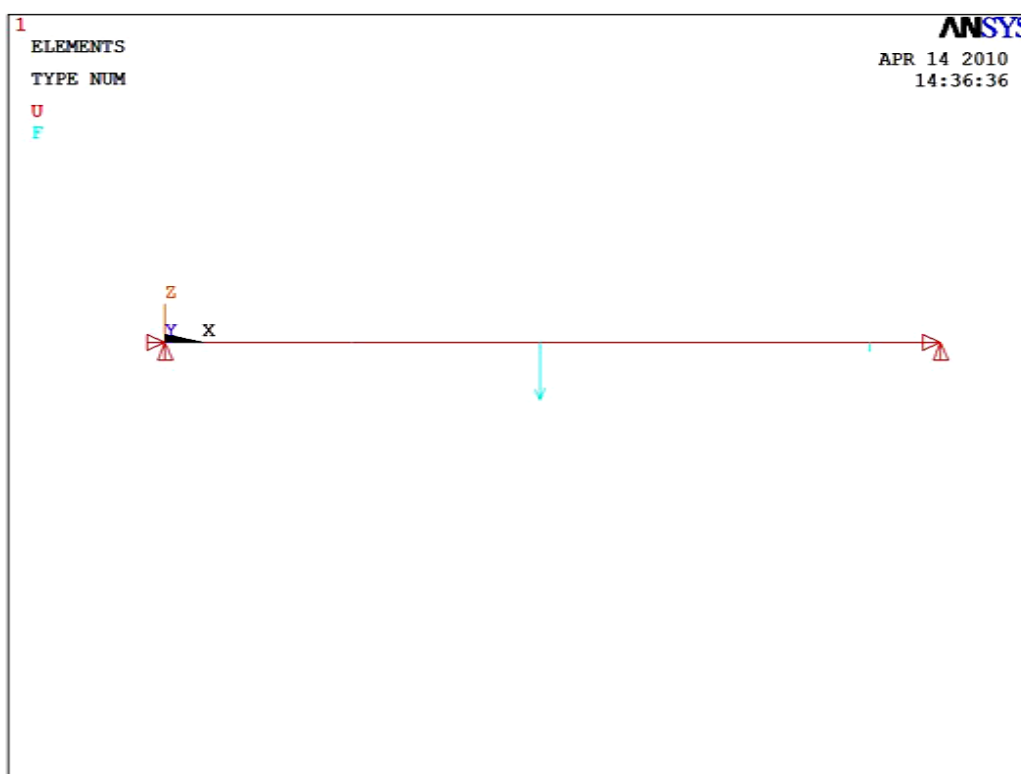


Figura 5.11 – Modelo do eixo com aplicação dos carregamentos e as restrições

Os resultados de deformação juntamente com a tensão indicam que a adição de uma massa desbalanceadora que provoque um desbalanceamento de 10 vezes o desbalanceamento residual admissível, não oferece risco capaz de comprometer a integridade do gerador.

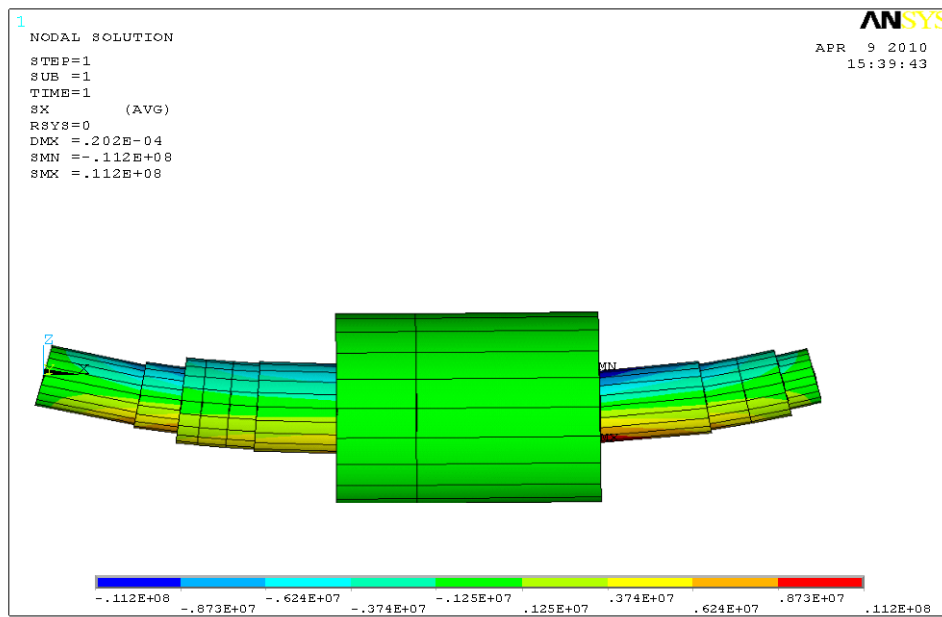


Figura 5.12 – Distribuição de tensões no rotor do gerador

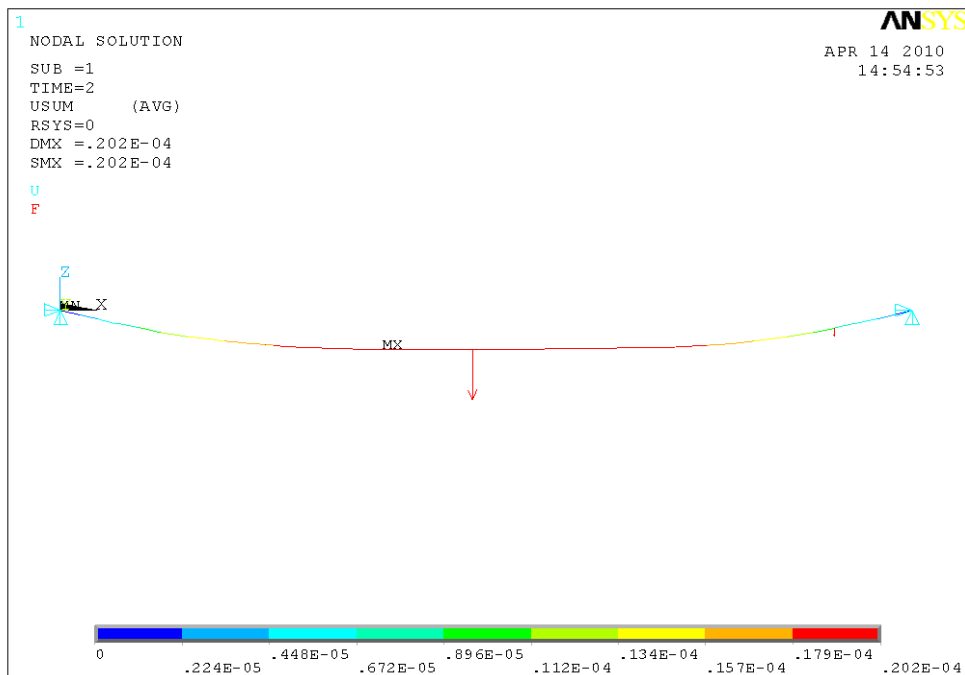


Figura 5.13 – Deformação eixo do gerador

5.3.1.3 Adição da massa de desbalanceamento.

Considerando a análise estática do modelo descrita no tópico anterior definiu – se o valor da massa desbalanceadora para um desbalanceamento de 5 vezes o desbalanceamento residual admissível para o rotor. O valor da massa de desbalanceamento foi determinado por:

$$m_{desb} = \frac{5 \cdot U_{adm}}{r} \tag{5.4}$$

$$m_{desb} = \frac{5 \cdot 537,5}{72,7} = 40g$$

sendo,  $m_{desb}$  a massa desbalanceadora em g,  $r$  o raio de posicionamento da massa desbalanceadora em mm e  $U_{adm}$  o desbalanceamento residual admissível em  $mm.g$ . Na figura 5.14 é mostrado o posicionamento da massa de desbalanceamento.

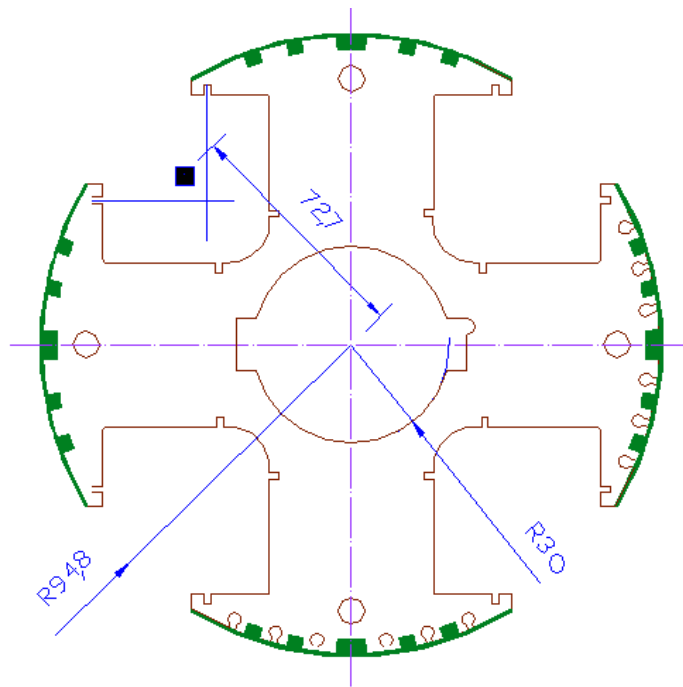


Figura 5.14 – Posicionamento da massa de desbalanceamento

A massa de desbalanceamento foi fixada por meio de pontos de soldas de tal forma que, após os ensaios realizados, essa massa pudesse ser retirada sem danificar o rotor do gerador.

### ***5.3.2. Aplicação dos Defeitos nos Mancais de Rolamento***

Os defeitos foram feitos em quatro rolamentos sendo: 2 rolamentos SKF 6211 ZZ (mancal dianteiro) e 2 rolamentos SKF 6209 ZZ (mancal traseiro). Esses defeitos foram obtidos utilizando uma microretífica, e estão localizados nas pistas interna e externa dos rolamentos. Na Figura 5.15 pode-se visualizar a imagem do rolamento SKF 6209 ZZ.



Figura 5.15 – Rolamento dianteiro SKF 6209

Os defeitos induzidos nos rolamentos foram pontuais devido à dificuldade de se manusear a microretífica e provocar defeitos de maiores dimensões. Em cada rolamento foi aplicado apenas um defeito e não houve a preocupação com o tamanho dos defeitos, visto que, o objetivo é verificar a sensibilidade das técnicas de análise de sinais em identificar esses tipos de defeitos.

*5.3.2.1 Determinação das Frequências de Ressonâncias do Sistema*

A frequência de ressonância (frequência natural) é a frequência em que a estrutura vibrará naturalmente quando excitada por um impacto. Estas frequências são importantes porque elas limitam a faixa de operação dos transdutores e porque elas podem causar grandes mudanças na resposta das vibrações.

A frequência de ressonância é frequentemente identificada porque há uma variação acentuada do nível de vibração nas frequências próximas dos picos de ressonância. A ressonância não gera vibração, apenas amplifica vibrações de pequenas amplitudes oriundas de outras fontes.

No caso estudado, as fontes que provocam esse tipo de vibração são os defeitos em rolamentos, pois estes produzem uma série de impactos impulsivos, sendo sua energia transmitida à estrutura na qual o rolamento está inserido (Nunes, 1989). Estes impactos vão excitar o conjunto mancal de rolamento, o qual responde nas suas frequências naturais.

A estrutura na qual o mancal está inserido, funciona como um amplificador mecânico. Como esses impactos são de curtíssima duração, eles contêm uma taxa muito alta de energia, essa energia se concentra mais nas altas frequências do que nas baixas e médias frequências.

Conforme descrito no Capítulo 3, para um bom resultado da técnica do envelope a identificação das frequências de ressonância das componentes da estrutura excitadas em função dos defeitos nos rolamentos, torna de suma importância neste trabalho. Além disso, outro ponto considerado de grande importância para se identificar a região de ressonância da estrutura estudada é devido à limitação do sistema de aquisição, pois o mesmo apresenta uma frequência de corte de 2 kHz. Assim, torna-se importante verificar se as frequências de ressonância da estrutura excitada pelos defeitos serão capturadas pelo sistema de aquisição permitindo a aplicação da técnica do envelope.

Assim, objetivando fazer a identificação dessas frequências, realizou-se um procedimento experimental que consiste em excitar a estrutura na qual o rolamento está assentado com o martelo de impacto e, em seguida, tanto o sinal de força quanto o sinal de aceleração são capturados nos dois canais do Analisador, o qual após o processamento fornece a Função Resposta em Frequência – FRF do tipo inércia (ou aceleração) do sistema. A FRF é o resultado da divisão do sinal captado pelo acelerômetro (resposta) com o sinal do transdutor de força (excitação), no domínio da frequência.



Para a realização do procedimento experimental montou-se a cadeia de medição composta de: Analisador de Sinal HP – 35665A; Martelo de Impacto com Célula de Carga PCB-086C03 e Acelerômetro PCB – 352B68. De maneira geral a cadeia de medição pode ser visualizada na Figura 5.16.

O ponto escolhido para a excitação da estrutura está localizado na tampa dianteira do gerador, que devido à complexidade do gerador selecionou-se o ponto externo acessível mais próximo do rolamento possível, conforme mostra a Figura 5.17.

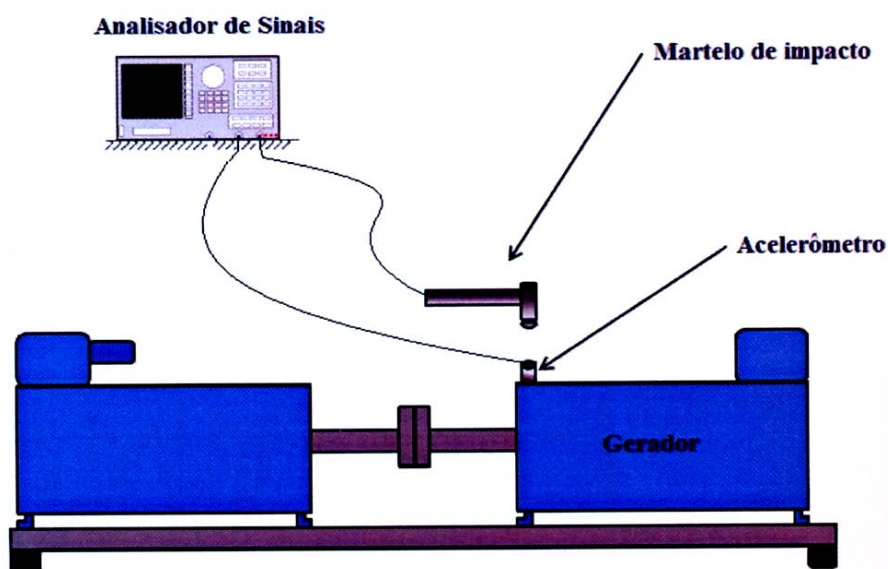


Figura 5.16 – Cadeia de medição

A partir de observações da FRF apresentada na 5.18, pode-se verificar picos nas frequências de 820, 1017 e 1168 HZ. Para melhor identificação dessas frequências, plotou-se também o gráfico da fase da FRF, identificando cada uma dessas frequências, que pode ser observada nas Fig. 5,19; 5,20 e 5,21Hz. Vale ressaltar, que os picos próximos a região de ressonância não se destacaram no espectro devido à grande quantidade de amortecimento presente no sistema.



Figura 5.17 – Procedimento experimental para obtenção da frequência de ressonância

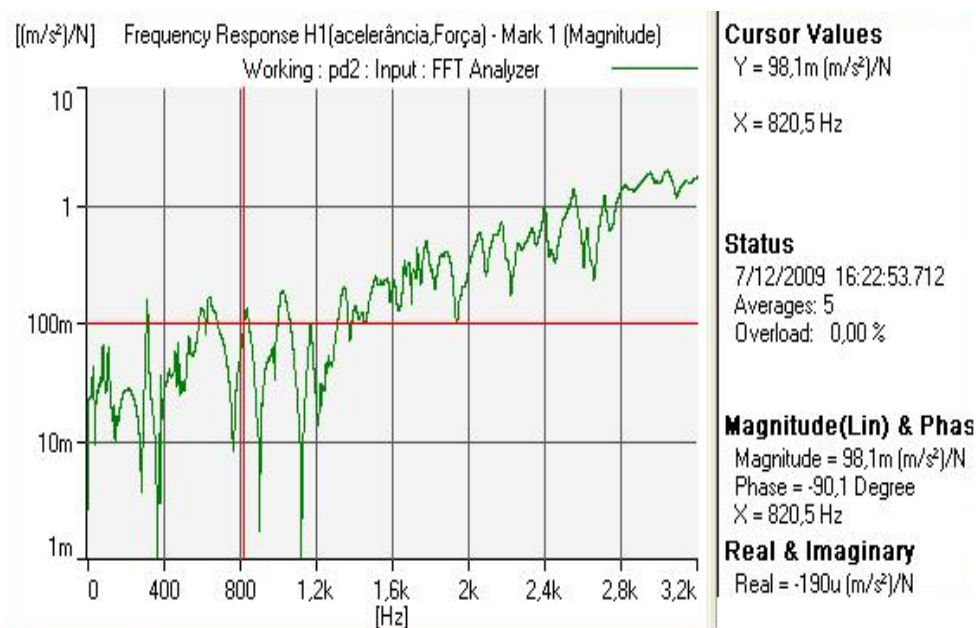


Figura 5.18 – Função de resposta em frequência do sistema

Analisando a função de coerência entre o sinal de excitação e o sinal de resposta mostrado na figura 5.22, observa-se uma boa relação entre os sinais nas regiões próximas a da ressonância da estrutura.

Assim, após a identificação da região de ressonância, determinou se faixa entre de 800 a 2000 Hz como sendo a região de interesse para aplicação da técnica do envelope, sendo essa região capturada pelo sistema de aquisição.

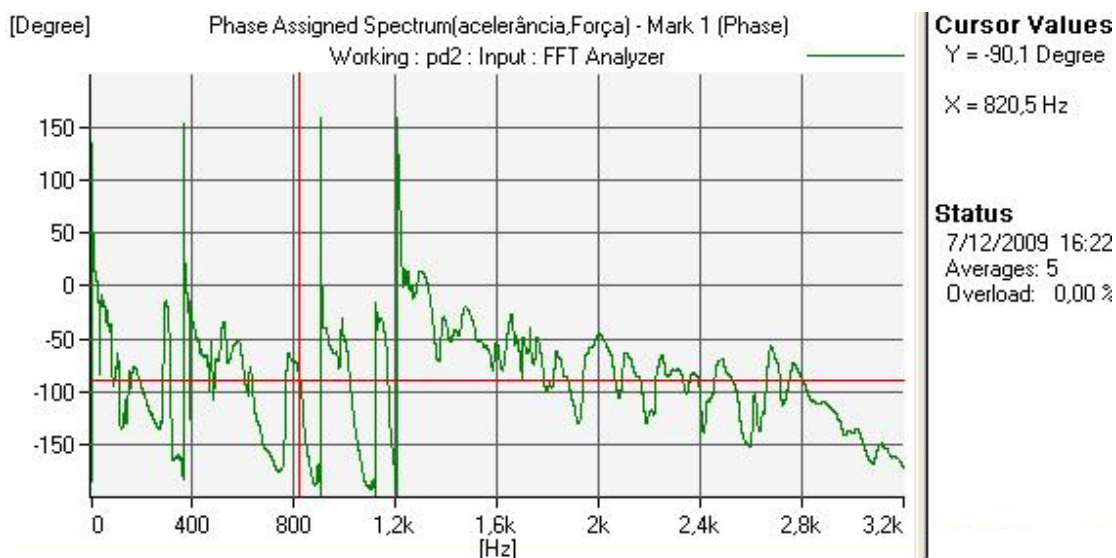


Figura 5.19 – Gráfico da fase da FRF identificando a frequência de ressonância de 820 Hz

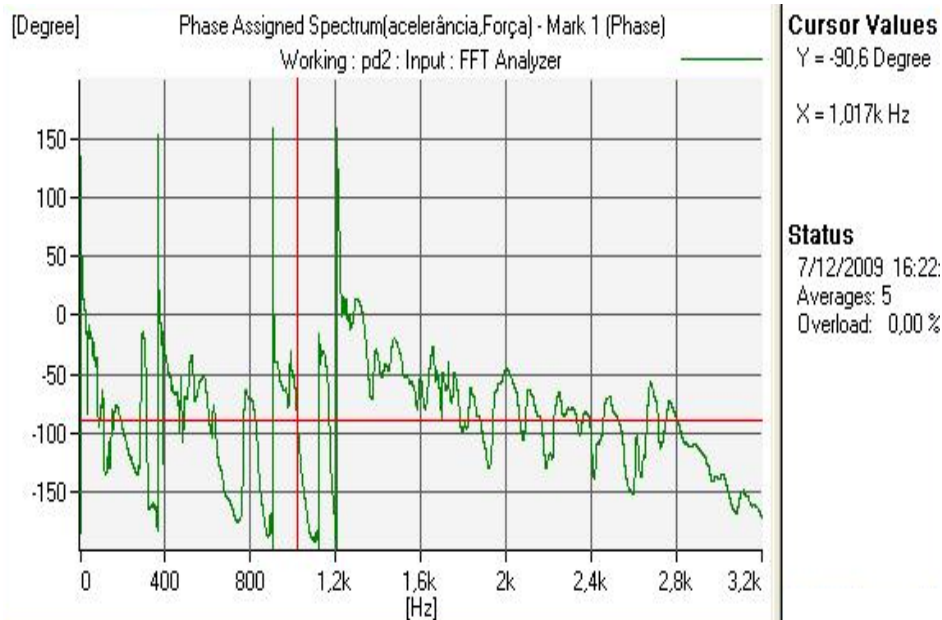


Figura 5.20 – Gráfico da fase da FRF identificando a frequência de ressonância de 1017 Hz

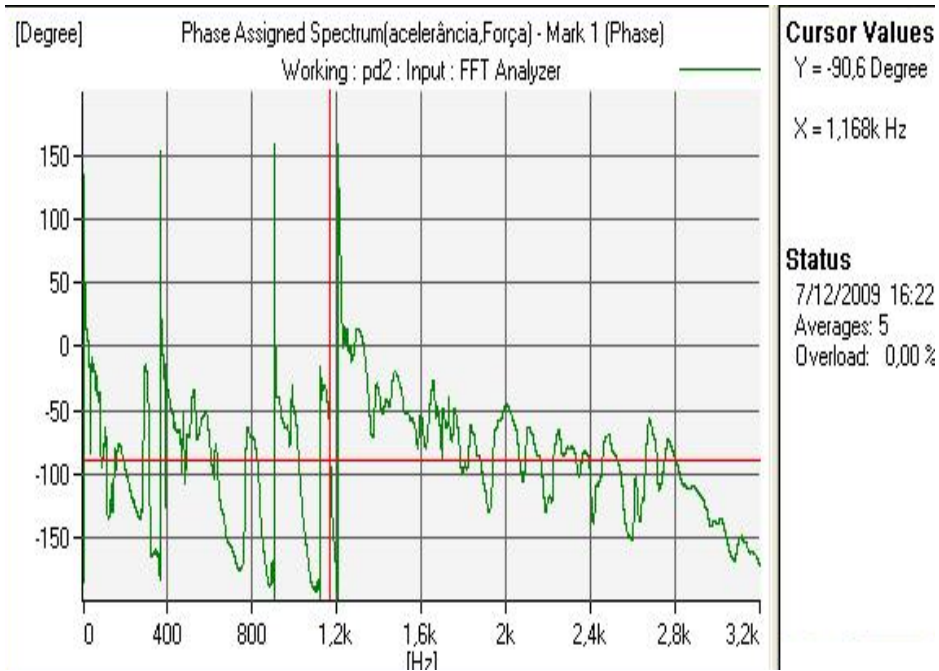


Figura 5.21 – Diagrama de fase para identificar a frequência de ressonância de 1168 Hz

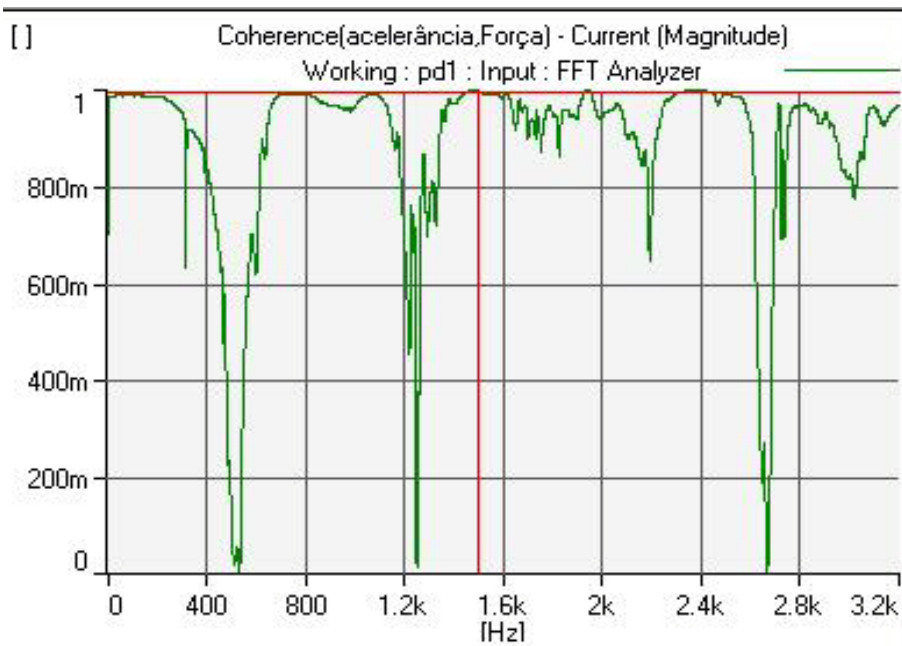


Figura 5.22 – Função de coerência do sistema

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as medições e resultados obtidos, com o intuito de verificar a sensibilidade das técnicas de análise de sinais, valor de pico ( $X_{pico}$ ), valor rms ( $X_{rms}$ ), fator de crista (Fc), fator K (Fk), curtose (K), análise espectral, técnica do envelope e cepstrum, na detecção dos defeitos de desbalanceamento e nos elementos dos mancais de rolamento, induzidos no gerador da bancada experimental.

Primeiramente as técnicas foram aplicadas nas análises dos sinais de vibrações com o propósito de detectar os defeitos. Posteriormente, as técnicas de análise espectral e cepstrum foram aplicadas nos sinais de corrente para verificar o comportamento dos mesmos na presença desses defeitos. Essas técnicas foram escolhidas, em virtude de suas características possibilitarem a identificação das frequências harmônicas características que podem surgir nos sinais de corrente, em função dos defeitos induzidos.

#### 6.2 CARACTERIZAÇÃO DA CONDIÇÃO NORMAL DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR.

Para se realizar as medições, foram definidos alguns parâmetros de operação como: rotação do sistema de 1800 rpm (30 Hz), frequência da linha de 60 Hz e valor da carga do sistema de 15 A.

Inicialmente foram medidos os sinais de vibração e corrente para o gerador em condição normal de funcionamento, a qual foi definida tendo por base os limites máximos de vibração estabelecidos pelas normas IEC 60034-14 e ABNT – NBR 7094. Esses valores podem ser visualizados na Tab. 6.1, extraída do catálogo do fabricante do gerador.

Para as medições realizadas com o gerador no estado inicial, pode-se observar que o valor  $X_{rms}$  de 2,18 mm/s<sup>2</sup> está abaixo do valor  $X_{rms}$  de 2,8 mm/s<sup>2</sup> estabelecido na Tab. 6.1, pelo

que se pode dizer que o gerador está com o nível de vibração aceitável. A Fig. 6.1 apresenta o gráfico no domínio do tempo para melhor visualização do resultado.

Assim, baseado no resultado do valor  $X_{rms}$  de aceleração obtido para o gerador no estado inicial, estabeleceu-se a condição normal de funcionamento do gerador (sem defeito).

Tabela 6.1 – Limites de vibração conforme IEC60034-14, (Fonte: Catálogo Weg).

Grau de Vibração	Montagem	Valores Limites da Amplitude de Vibração em Deslocamento, Velocidade e Aceleração (rms).								
		Carcaças 56 a 132			Carcaças 132 a 280			Carcaça 280 e acima		
		Desloc. (µm)	Veloc. (mm/s)	Acel. (mm/s <sup>2</sup> )	Desloc. (µm)	Veloc. (mm/s)	Acel. (mm/s <sup>2</sup> )	Desloc. (µm)	Veloc. (mm/s)	Acel. (mm/s <sup>2</sup> )
A Normal	Suspensão livre	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Rígida	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B Especial	Suspensão livre	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Rígida	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Grau A – Aplica – se para máquinas sem requisitos especiais de vibração.

Grau B – Aplica – se para máquinas com requisitos especiais de vibração montagem rígida não é considerada aceitável para máquinas com carcaça menor que 132.

Na Tab. 6.2 encontram-se os valores de  $X_{pico}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$  obtidos para o gerador em condição normal de funcionamento. Esses valores foram utilizados como referência nas análises comparativas entre o gerador sem defeito e com defeito.

Tabela 6.2 – Valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$  para o gerador em condição normal de funcionamento.

Parâmetros	Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )
$X_{pico}$	5,67
$X_{rms}$	2,18
$F_c$	2,6
$F_k$	12,36
$K$	1,95

Além da análise dos sinais no domínio do tempo, foi realizada uma análise espectral para estabelecer os espectros de referências. Nas Figs. 6.2, 6.3 e 6.4 pode-se visualizar os espectros de vibrações, em aceleração, velocidade e deslocamento, para a condição normal de funcionamento do gerador.

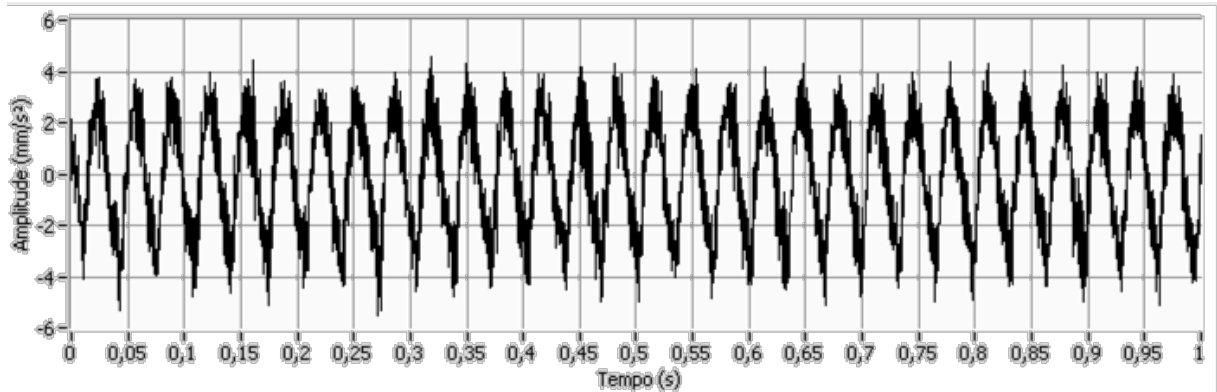


Figura 6.1 – Sinal de aceleração no domínio do tempo para o gerador em condição normal de funcionamento

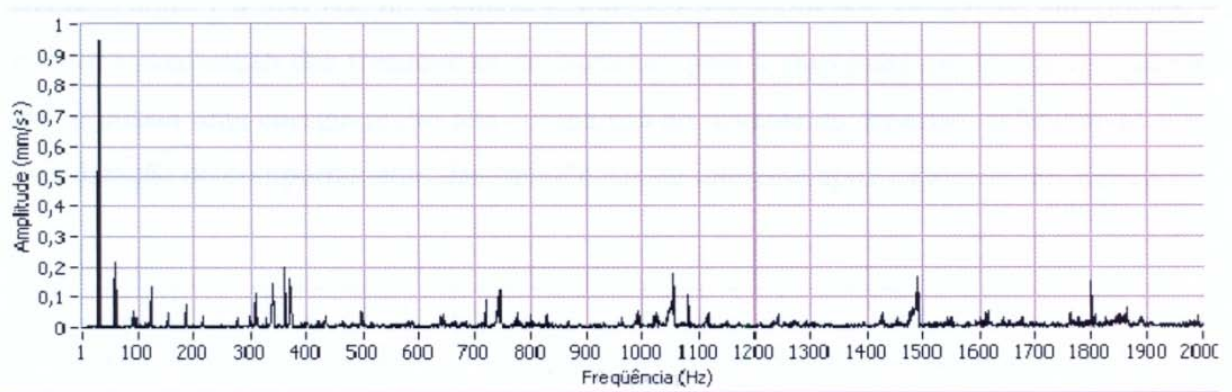


Figura 6.2 – Espectro de aceleração do gerador em condição normal de funcionamento

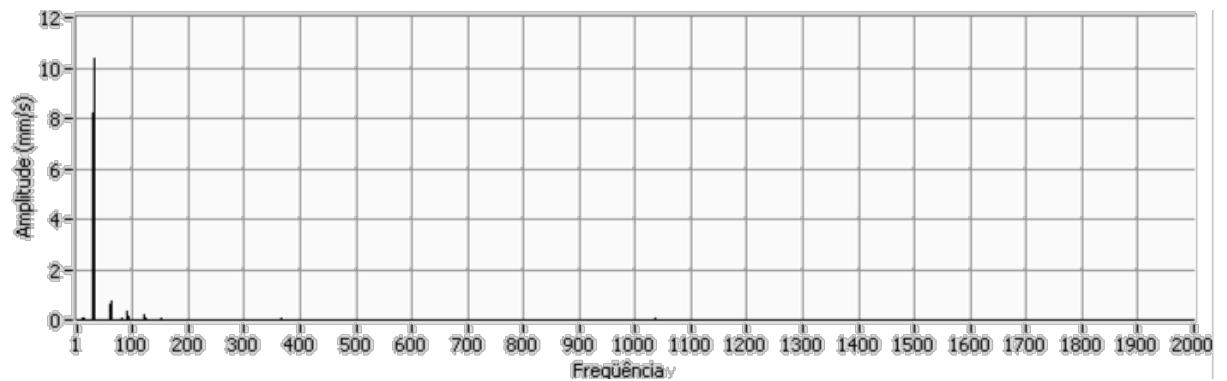


Figura 6.3 – Espectro de velocidade do gerador em condição normal de funcionamento

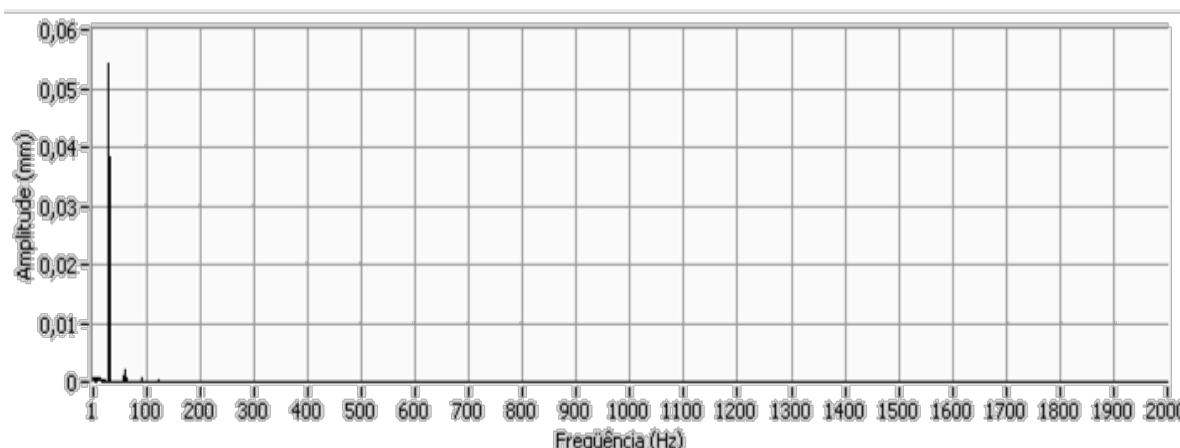


Figura 6.4 – Espectro de deslocamento do gerador em condição normal de funcionamento

Usando o procedimento empregado, em relação ao sinal de vibração, para o sinal de corrente, foi possível estabelecer o sinal de corrente a ser tomado como referência. Assim, nas Fig. s 6.5 (a) e 6.5 (b) são apresentados os espectros de corrente do estator do gerador para a condição normal de funcionamento. No primeiro espectro, o sinal é apresentado na faixa de frequência de 1 a 500 Hz, no segundo é aplicado um zoom nos valores de amplitudes, para melhor visualização das frequências de interesse, pois a amplitude em 60 Hz (frequência da linha) possui uma energia muito alta comparada ao restante do espectro, dificultando assim, a visualização do comportamento das frequências de interesse após a indução dos defeitos.

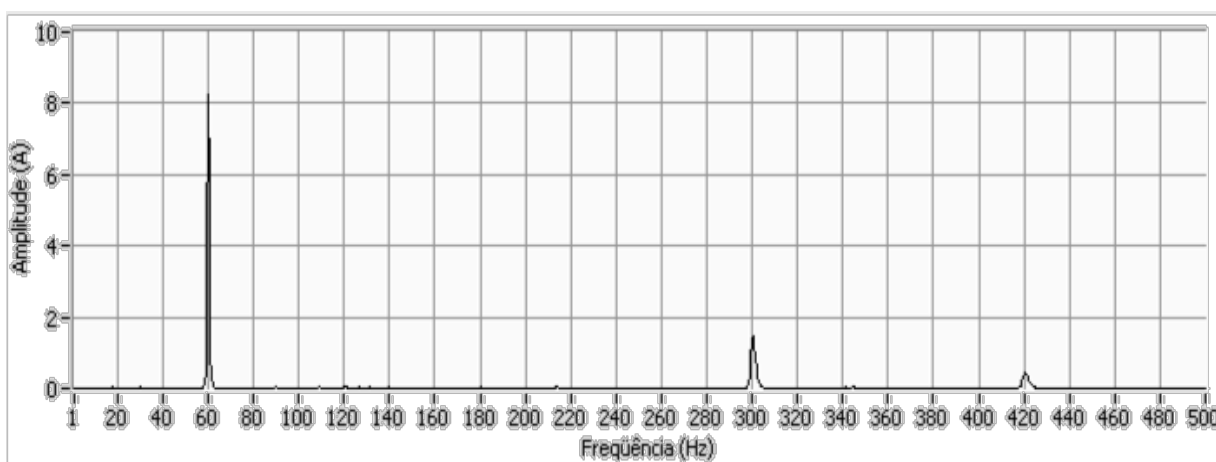


Figura 6.5 (a) – Espectro de corrente do estator para o gerador em condição normal de funcionamento



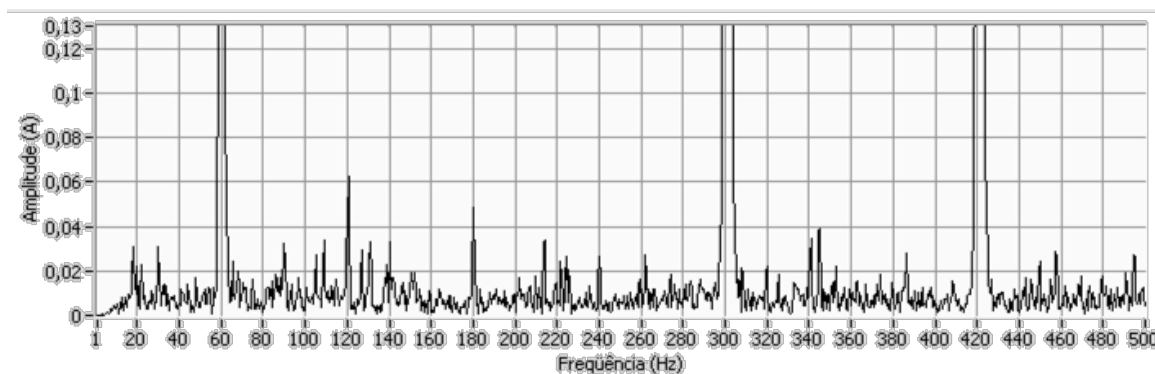


Figura 6.5 (b) – Zoom no espectro de corrente do estator do gerador em condição normal de funcionamento

### 6.3. DETECÇÃO DOS DEFEITOS NOS ROLAMENTOS

Nas análises mostradas a seguir, foi adotado que os sinais em preto são utilizados para o gerador sem defeito e os sinais em vermelho para o gerador com defeito.

#### 6.3.1 Detecção dos Defeitos nos Rolamentos por Análise de Vibração

As técnicas de análise de sinais de vibração foram aplicadas para detectar os defeitos que foram induzidos nos rolamentos 6209 e 6211. Inicialmente, os sinais de vibração foram analisados no domínio do tempo para se obter os valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ . Então, aplicou-se as técnicas de análise espectral, envelope e cepstrum.

##### 6.3.1.1 Análise no Domínio do Tempo

Foram realizadas as medições dos sinais de vibrações no domínio do tempo, em aceleração, para os rolamentos, com os defeitos localizados nas pistas externa e interna.

A Tab. 6.3 apresenta um comparativo entre os valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$  medidos para o rolamento SKF 6209 ZZ sem defeito e com defeitos nas pistas (externa e interna) e na Tab. 6.4 aqueles relativos ao rolamento SKF 6211 ZZ.

Analisando os dados das Tabs. 6.3 e 6.4, verifica-se que os valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ , aumentaram quando os rolamentos estavam com defeitos nas pistas externa e interna.

Pode-se observar ainda, que os valores de  $X_{rms}$  são maiores que os estabelecidos na Tab. 6.1, mostrando que o gerador apresenta um nível de vibração acima do aceitável.

Tabela 6.3 – Valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ , para o rolamento 6209 sem defeito e com defeito nas pistas (externa e interna).

	Sem defeito	Rolamento 6209	
		Defeito na pista	Defeito na pista
		externa	interna
$X_{pico}(m/s^2)$	5,67	10,73	11,09
$X_{rms}(m/s^2)$	2,18	3,05	3,12
$F_c$	2,6	3,52	3,55
$F_k$	12,36	32,73	34,60
$K$	1,95	2,7	2,79

Tabela 6.4 – Valores de  $X_{pico}$ ,  $X_{rms}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ , para o rolamento 6211 com e sem defeito.

Parâmetros	Sem defeito	Rolamento 6211	
		Defeito na pista	Defeito na pista
		externa	interna
$X_{pico}(m/s^2)$	5,67	13,56	14,63
$X_{rms}(m/s^2)$	2,18	4,13	5,12
$F_c$	2,6	3,29	2,86
$F_k$	12,36	56	74,90
$K$	1,95	2,8	2,56

### 6.3.1.2 Análise Espectral

Como já visto no capítulo 3, os defeitos localizados nas pistas interna e externa de um rolamento gera uma série de impactos de vibrações devido ao choque dos elementos rolante

com a pista defeituosa. Essas vibrações ocorrem em frequências características, que são estimadas em função da velocidade da rotação do eixo e da geometria dos componentes do rolamento. As referidas frequências podem ser obtidas a partir das Equações (3.33) e (3.34), que foram apresentadas no capítulo 3 e aqui são repetidas por conveniência:

$$BPFO = \frac{S \cdot n}{2} \left( 1 - \frac{d}{D} \cos\theta \right); \quad BPFI = \frac{S \cdot n}{2} \left( 1 + \frac{d}{D} \cos\theta \right)$$

os valores respectivos destas frequências são apresentados na Tab. 6.5, os quais foram obtidos a partir dos dados característicos dos rolamentos apresentados na Tab. 6.6. Vale lembrar que os valores calculados para frequências de defeitos são aproximados, visto que em geral quando os rolamentos estão submetidos à velocidade de rotação pode haver escorregamento do elemento girante na pista.

Tabela 6.5 – Frequências de defeito dos rolamentos.

Frequências de defeitos	Rolamento SKF 6209 ZZ	Rolamento SKF 6211 ZZ
<i>BPFO</i>	123,60 Hz	124,30 Hz
<i>BPFI</i>	176,40 Hz	175,70 Hz

Tabela 6.6 – Características dos rolamentos.

Parâmetros	Rolamento SKF 6209 ZZ	Rolamento SKF 6211 ZZ
<i>n</i> (n° de esferas)	10	10
<i>d</i> (diâmetro das esferas)	12,3 mm	14,28 mm
<i>D</i> (diâmetro primitivo)	69,9mm	83,38mm
$\theta$ (ângulo de contato)	0°	0°
<i>S</i> (frequência de rotação)	30 Hz	30 Hz

**a) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6209 ZZ**

A Fig. 6.6 apresenta os espectros de aceleração, na faixa de frequência de 1 a 2000 Hz, medidos para o rolamento sem defeito e com defeito na pista externa. Pode-se observar que

no espectro do rolamento defeituoso, as amplitudes de aceleração aumentaram na faixa de frequência de 700 a 2000 Hz e que há o surgimento de harmônicos da frequência de defeito de 123,6 Hz.

Para melhor visualização dessas frequências no espectro, aplicou – se um filtro passa – banda com as frequências de corte de 100 e 700 Hz, para que se pudesse visualizar a região correspondente à frequência fundamental do defeito e/ou suas harmônicas. O resultado deste procedimento é apresentado na Fig. 6.7, através da qual se pode observar claramente a presença das 2ª, 3ª e 5ª harmônicas da frequência fundamental do defeito na pista externa.

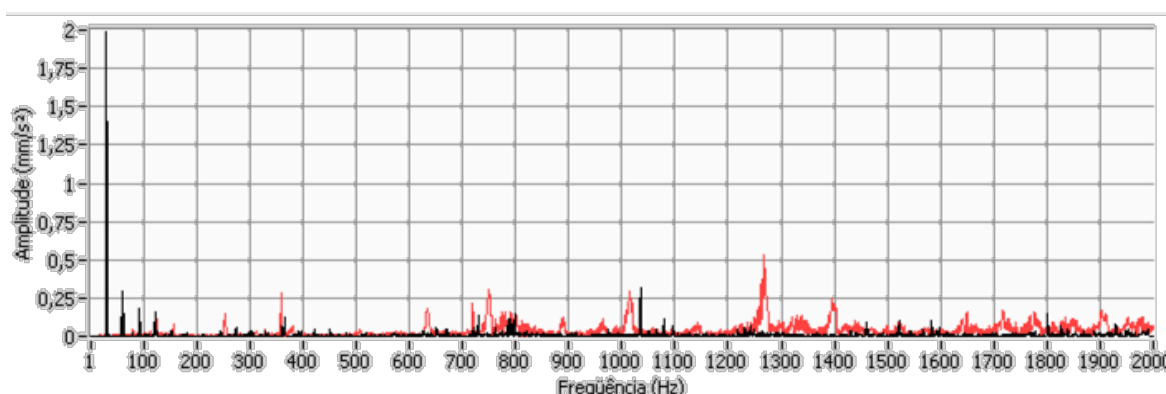


Figura 6.6 – Espectros de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ

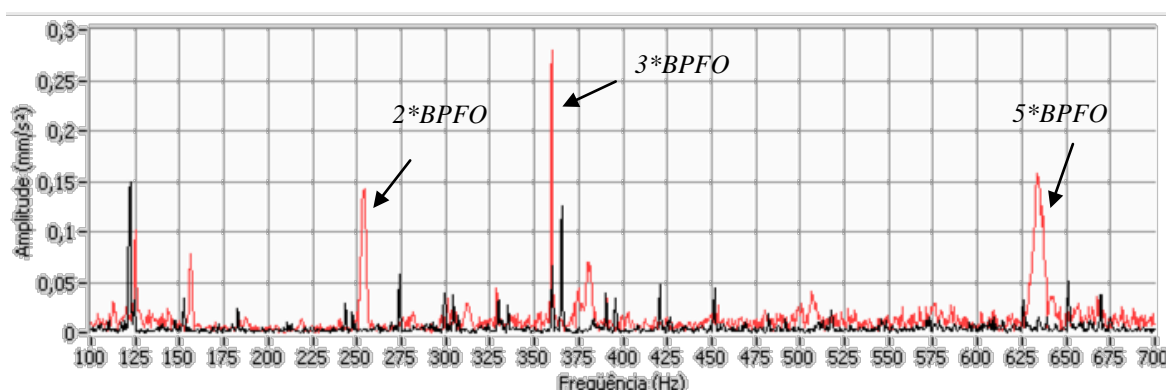


Figura 6.7 – Espectros filtrados de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ

**b) Detecção do Defeito na pista interna do rolamento SKF 6209 ZZ**

O espectro do rolamento com defeito na pista interna pode ser visualizado na Fig. 6.8. Observa-se que as amplitudes de aceleração aumentaram na faixa de frequência de 1800 a 2000 Hz, quando comparado com o espectro do rolamento sem defeito. Além disso, pode-se

observar a presença de algumas frequências harmônicas da frequência de defeito na pista interna que é de aproximadamente 176,4 Hz.

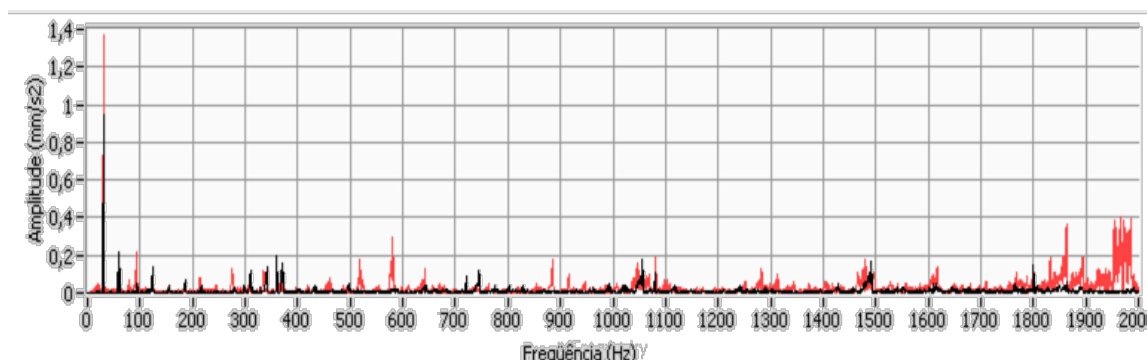


Figura 6.8 – Espectros de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ

Aplicando-se um filtro passa – banda com as frequências de corte de 100 e 1000 Hz, é possível visualizar a frequência característica do defeito e alguns dos seus harmônicos, conforme mostrado na Fig. 6.9, onde são destacadas a 3ª e a 5ª harmônicas da frequência fundamental do defeito da pista interna.

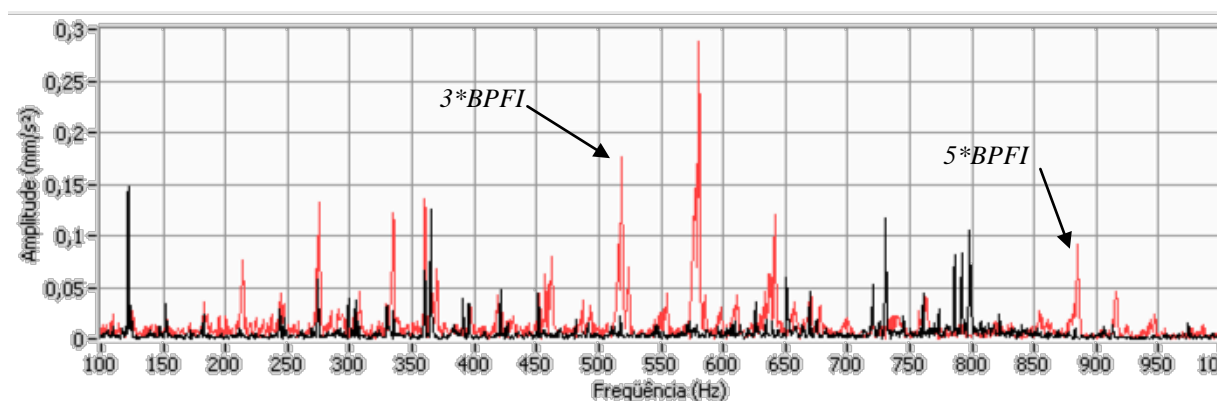


Figura 6.9 – Espectros filtrados de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ

**c) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6211 ZZ**

Na Fig. 6.10, tem-se os espectros do rolamento **SKF 6211 ZZ** sem defeito e com defeito na pista externa. Pode-se observar pelo espectro, que as amplitudes de aceleração aumentaram na faixa de frequência de 1000 a 2000 Hz, quando o rolamento apresenta defeito na pista externa. Neste caso, de forma distinta do rolamento 6209 ZZ, não foram detectadas as harmônicas da frequência fundamental do defeito na pista externa.

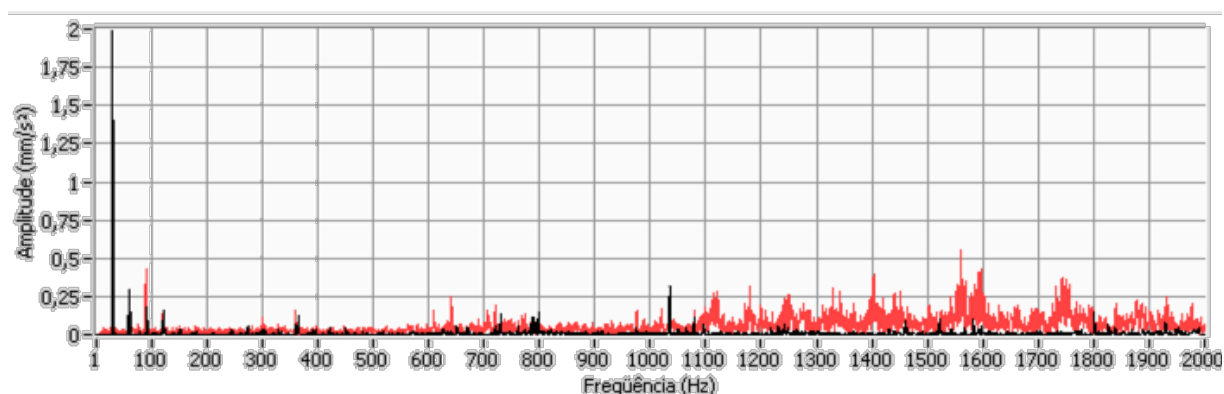


Figura 6.10 – Espectros de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6211 ZZ

Buscando identificar a presença de harmônicos da frequência do defeito na pista externa do rolamento 6211 ZZ, aplicou-se ao sinal um filtro passa – banda com as frequências de corte de 100 a 700 Hz, sendo o resultado apresentado na Fig. 6.11, onde se pode visualizar a 3ª e 5ª harmônicas da frequência fundamental do defeito na pista externa do rolamento, a qual tem como valor 124,30 Hz

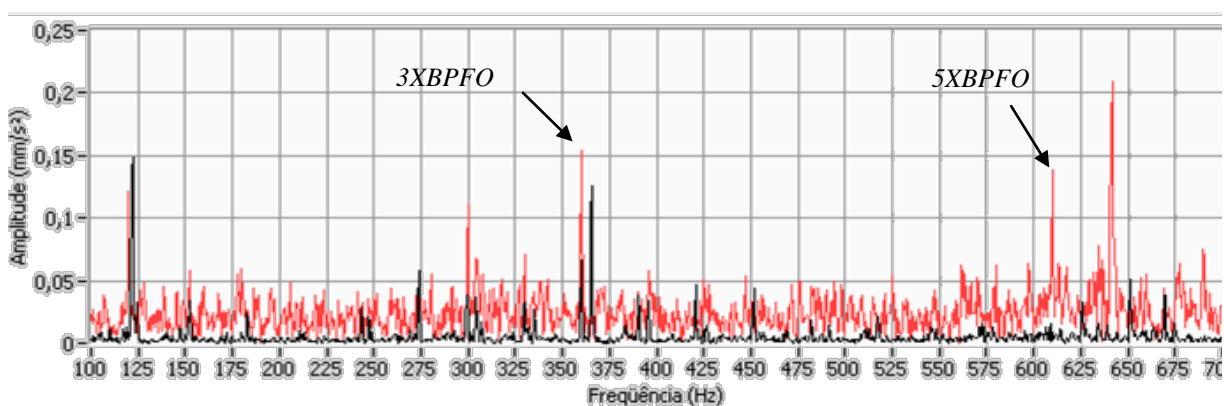


Figura 6.11 – Espectros filtrados de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6211 ZZ

**d) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6211 ZZ**

Os espectros para o rolamento SKF 6211 ZZ, sem defeito e com defeito na pista interna, estão apresentados na Fig. 6.12, a partir da qual se pode observar o aumento da amplitude de aceleração na faixa de frequência de 600 a 2000 Hz, devido à presença de defeito na pista interna do rolamento.

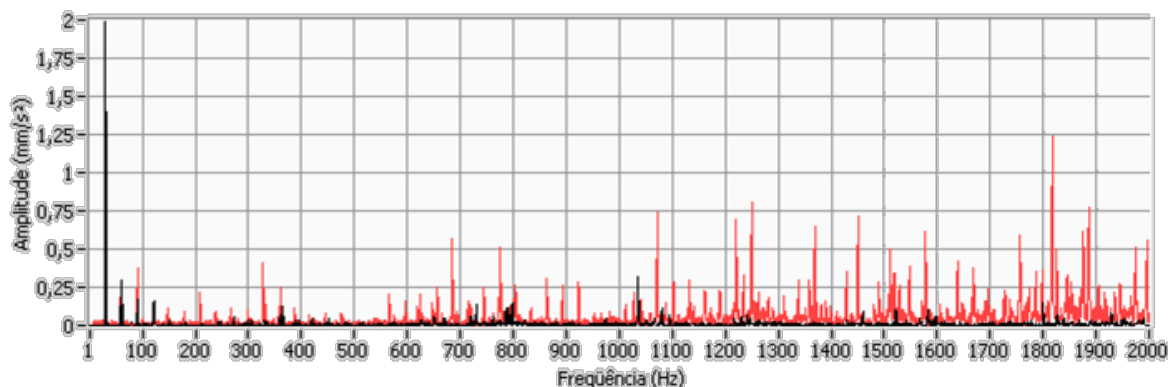


Figura 6.12 – Espectros de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento SKF 6211 ZZ

Uma vez aplicado ao sinal de aceleração um filtro passa – banda com frequências de corte de 100 e 800 Hz, tornam-se visíveis picos na frequência fundamental do defeito na pista interna (175,7 Hz) e no seu segundo harmônico.

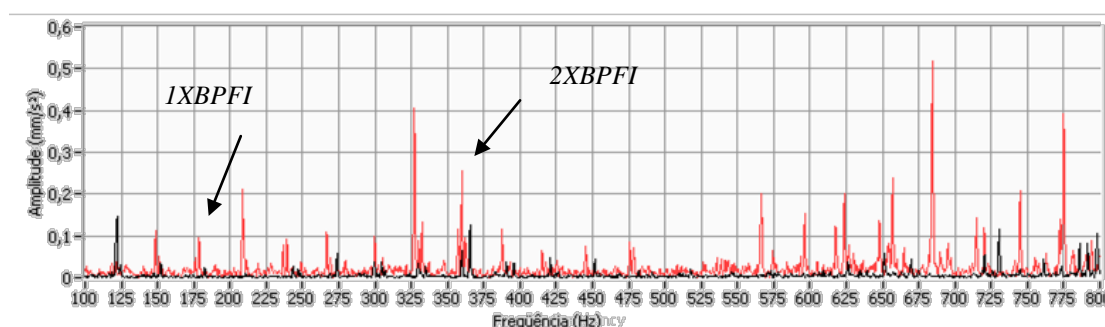


Figura 6.13 – Espectros filtrados de aceleração, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento SKF 6211 ZZ

### 6.3.1.3 Técnica do Envelope

Com base no que foi apresentado na seção 5.6 do capítulo 5, definiu-se que as frequências de corte do filtro passa – banda, utilizado na aplicação da técnica do envelope, seriam estabelecidas de acordo com as observações feitas nos espectros direto dos sinais do rolamento quando possível, pois, a partir da análise espectral pode-se verificar através da comparação de um espectro do rolamento sem defeito e com defeito, a região em alta frequência que tiveram os valores de amplitudes aumentados em função dos defeitos no rolamento.

**a) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6209 ZZ**

A Fig. 6.14 mostra os espectros dos envelopes de aceleração dos sinais de vibração do rolamento sem defeito e com defeito na pista externa. Apesar das limitações do sistema de aquisição existente, pode-se perceber claramente o surgimento da frequência fundamental do defeito na pista externa que é de 123,60 Hz e sua 2ª harmônica.

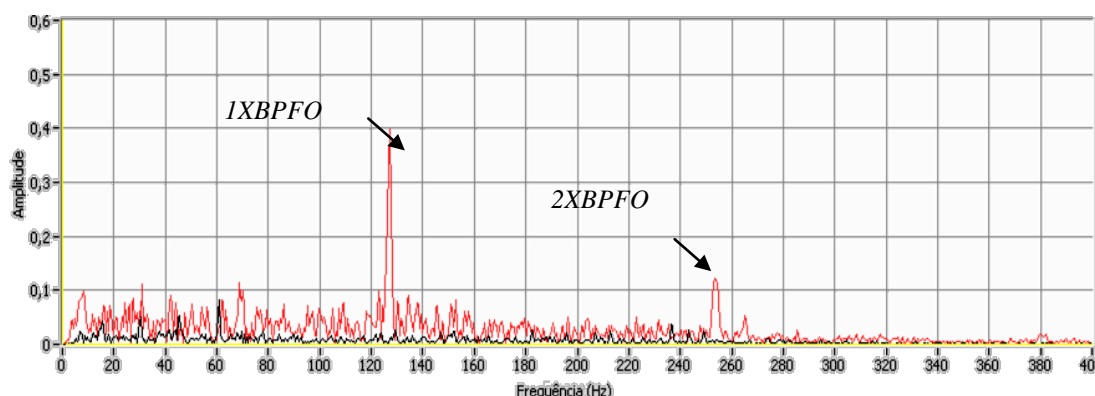


Figura 6.14 – Espectros de envelope de aceleração do sinal, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ. Filtro passa – banda de 700 a 2000 Hz

**b) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6209 ZZ**

A Fig. 6.15 apresenta os espectros dos envelopes de aceleração para o rolamento sem defeito e com defeito na pista interna. Observando-se o espectro do envelope do rolamento defeituoso, vêem-se alguns picos correspondentes a frequência de rotação do gerador (S) e suas harmônicas.

A presença de picos nas harmônicas da frequência de rotação do gerador já era esperada, pois quando um rolamento apresenta defeito na pista girante (geralmente a pista interna), frequências naturais do mancal ou estrutura podem ser moduladas em amplitude pela frequência do defeito, e esta, por sua vez, pode ser modulada pela frequência de rotação da máquina, devido à variação da amplitude de vibração quando o defeito na pista interna e elemento rolante entram e saem da zona de carga (Mesquita, 2002).

Assim, apesar das limitações do sistema de aquisição dos sinais, que não permitiram a detecção da frequência do defeito na pista interna, os picos nas harmônicas da frequência de rotação do gerador (S) sugerem a existência de um defeito na pista girante.



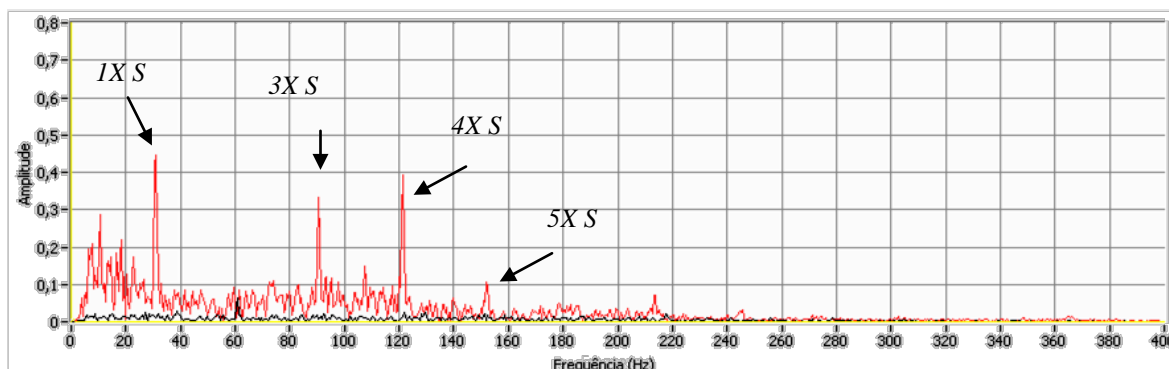


Figura 6.15 – Espectros do envelope de aceleração do sinal sem defeito (preto) e sinais com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento SKF 6209 ZZ

**c) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6211 ZZ**

Na Fig. 6.16, apresenta-se o espectro do envelope do sinal do rolamento **SKF 6211 ZZ** com defeito na pista externa. No espectro mostrado na Fig., embora possa ser percebida a presença de pico na frequência do defeito de 124,6 Hz, existe a presença de muitos outros picos significativos que não têm relação direta com o tipo de defeito induzido no rolamento.

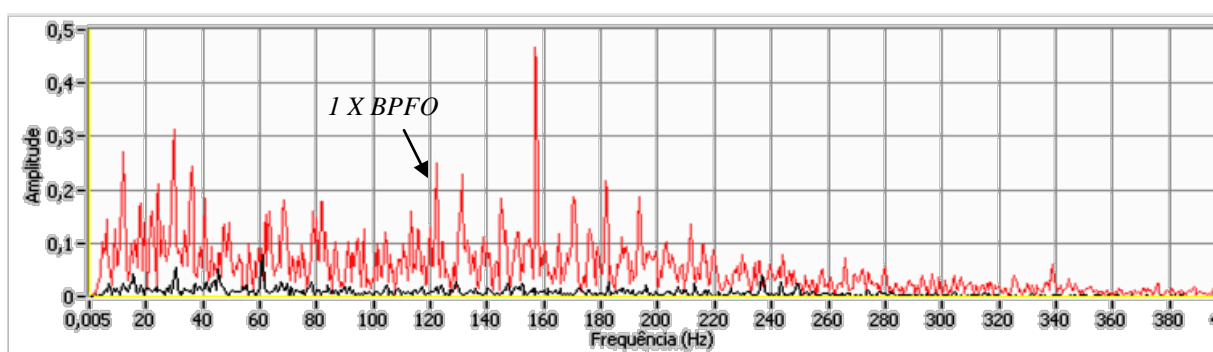


Figura 6.16 – Espectros do envelope de aceleração do sinal, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho), para o rolamento SKF 6211 ZZ. Filtro de 1500 a 2000 Hz

**d) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6211 ZZ**

O espectro do envelope do sinal do rolamento com defeito na pista interna encontra-se representado na Fig. 6.17. Comparando com o espectro do envelope do rolamento sem defeito, observa-se a presença de picos na frequência de rotação da máquina, além da presença das 3ª, 6ª e 8ª harmônicas.

Da mesma forma que se concluiu para o defeito na pista interna do rolamento **SKF 6209 ZZ**, a presença de picos na frequência de rotação do gerador e suas harmônicas sugerem o defeito na pista interna do rolamento em questão.

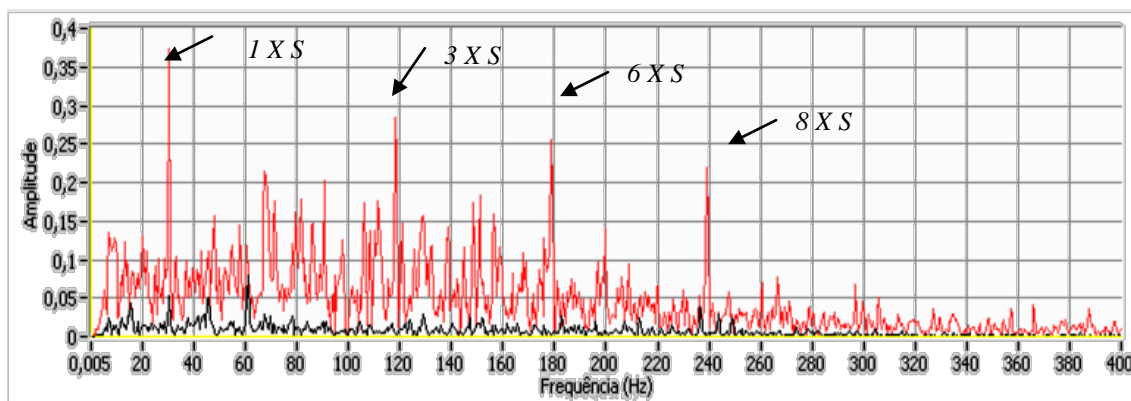


Figura 6.17 – Espectros do envelope de aceleração do sinal, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho), para o rolamento *SKF 6211 ZZ*. Filtro de 1500 a 2000 Hz

### 6.3.1.4 Técnica de Cepstrum

A técnica de cepstrum é uma ferramenta muito poderosa para identificar defeito em rolamento. A seguir são mostrados os resultados das análises dos sinais de vibração com aplicação da técnica de cepstrum, para identificar os defeitos nas pistas externa e interna dos rolamentos usados nos ensaio.

#### a) Detecção do defeito na pista externa do rolamento *SKF 6209 ZZ*

Na Fig. 6.18, tem-se na curva em vermelho o cepstrum do sinal de um rolamento com defeito na pista externa. Em comparação com o cepstrum do sinal do rolamento sem defeito, curva em preto, observa-se a presença de picos com espaçamentos de 0,008 s, cujo valor inverso é 125 Hz, portanto, a frequência de defeito.

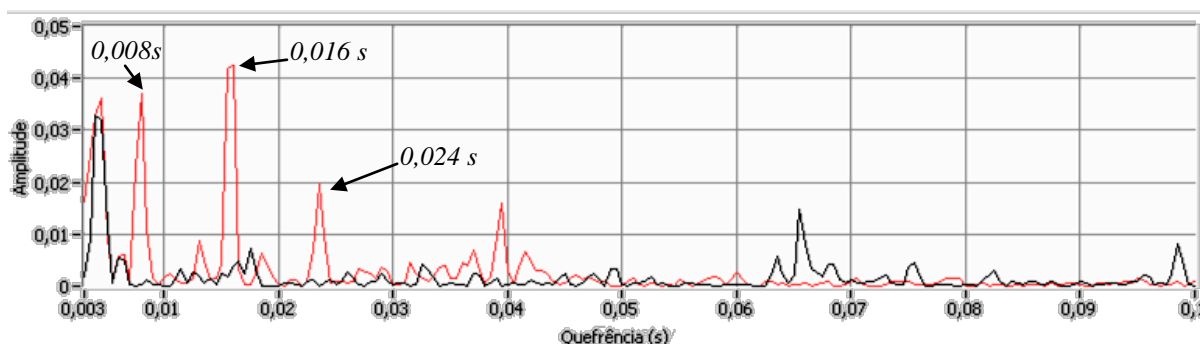


Figura 6.18 – Cepstrum do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho)

**b) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6209 ZZ**

O cepstrum do sinal do rolamento com defeito na pista interna encontra-se representado na Fig. 6.19, curva em vermelho. Observa-se que em comparação com o cepstrum do sinal do rolamento sem defeito, curva em preto, tem-se a presença de um pico com valor de 0,032s, cujo inverso é 31,25 Hz, que corresponde aproximadamente a frequência de rotação do gerador (S), portanto a frequência de modulação do sinal.

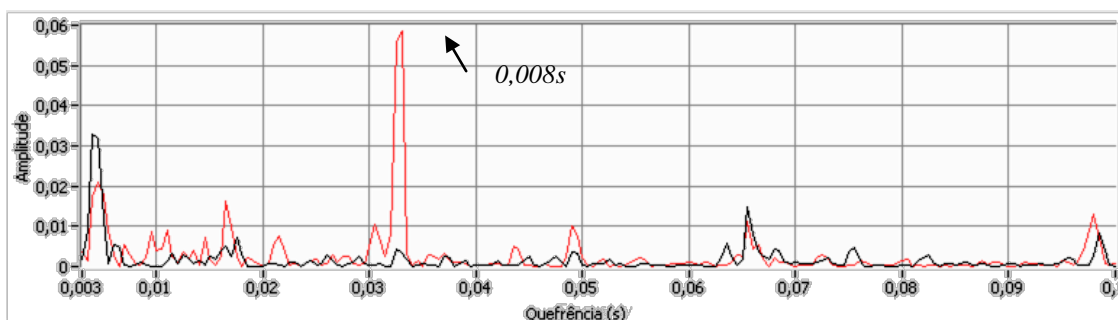


Figura 6.19 – Cepstrum do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho).

**c) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6211 ZZ**

Na Fig. 6.20, tem-se o cepstrum do sinal do rolamento com defeito na pista externa, comparando-se os cepstrum obtidos, pode-se observar que não há presença de picos relacionados à frequência de defeito.

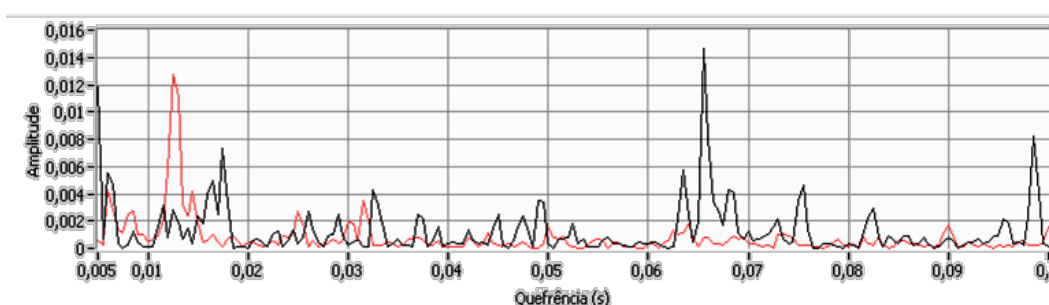


Figura 6.20 – Cepstrum do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho)

**d) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6211 ZZ**

Os cepstrum dos sinais do rolamento sem defeito e com defeito na pista interna estão representados pela Fig. 6.21. Comparando os dois sinais, pode-se observar a presença de a presença de um pico com valor de 0,032s, cujo inverso é 31,25 Hz, que corresponde

aproximadamente a frequência de rotação do gerador (S), portanto a frequência de modulação do sinal.

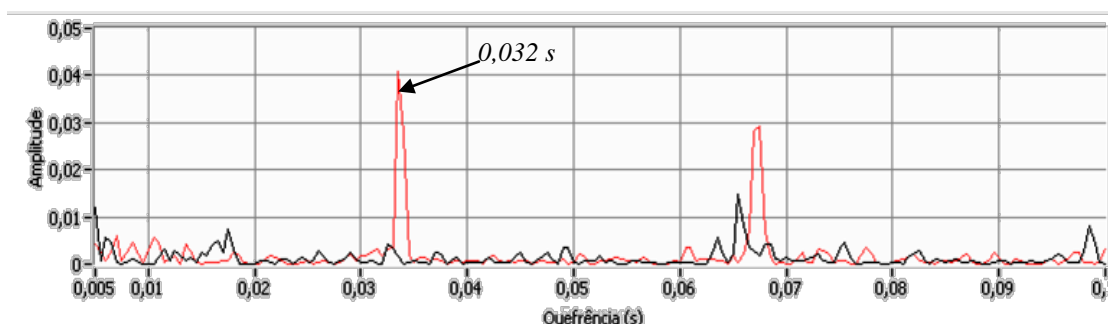


Figura 6.21 - Cepstrum do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho)

### 6.3.2 Detecção dos Defeitos nos Rolamentos por Análise da Corrente do Estator.

Após a detecção por análise de vibração dos defeitos nas pistas interna e externa dos rolamentos, aplicou-se a técnica espectral e de Cepstrum nos sinais de corrente.

As frequências características do defeito no espectro de corrente são as mesmas na análise de vibração. Entretanto, elas aparecem modulando a frequência fundamental da corrente do estator (Almeida e Góz, 2002).

A Eq. 3.38, mostrada no Capítulo 3, calcula as frequências de interesse no espectro de corrente, para o rolamento

$$f_{rol} = 60 \pm kf_v,$$

sendo  $f_v$  a frequência de defeito do rolamento. Para o rolamento **SKF 6209 ZZ** são:  $f_v = BPFO = 123,6$  Hz e  $f_v = BPF1 = 176,4$  Hz; e para o rolamento **SKF 6211 ZZ** são:  $f_v = BPFO = 124,3$  Hz e  $f_v = BPF1 = 175,7$  Hz.

Vale ressaltar que na análise espectral do sinal de corrente, as componentes das frequências de defeitos nos rolamentos são relativamente pequenas quando comparadas ao resto do espectro. As componentes de maiores amplitudes no espectro são as múltiplas da frequência fundamental da corrente do estator. Essa diferença entre as amplitudes se torna uma dificuldade para se identificar as frequências de interesse pelo espectro geral. Assim para

melhor visualização da frequência de interesse é aplicado um zoom no espectro, com o objetivo de se identificar as frequências relativas aos defeitos.

### 6.3.2.1 Análise Espectral

Na Fig. 6.22 são mostrados os espectros gerais para o rolamento sem defeito e com defeito na pista externa. Pode-se observar que é difícil de visualizar qualquer alteração no espectro referente às frequências características do defeito. Portanto nas análises a seguir serão expostos apenas os espectros com zoom nos valores de amplitudes, para se identificar os defeitos.

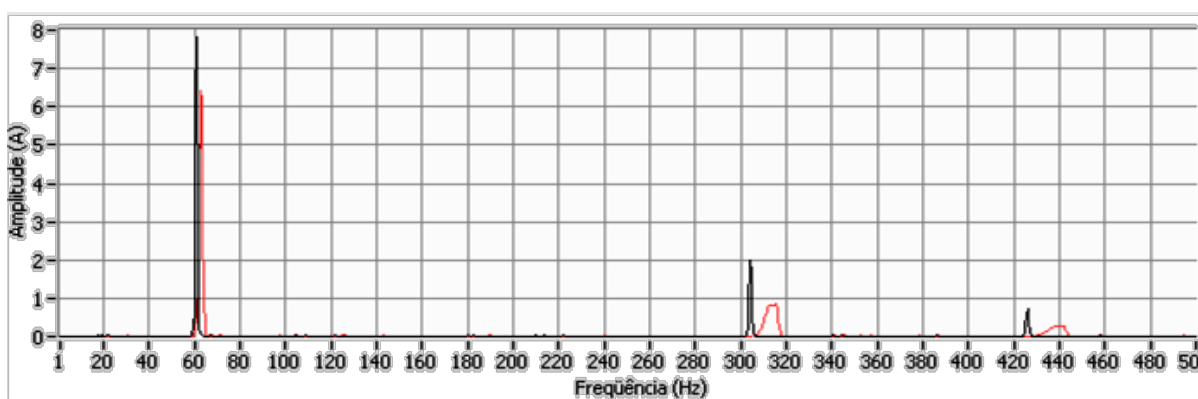


Figura 6.22 – Espectro geral de corrente para o rolamento com defeito na pista externa

#### a) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6209 ZZ

Os espectros do rolamento sem defeito e com defeito na pista externa estão representados na Fig. 6.23. Pode-se observar a presença das componentes  $f = |60 \pm 1 * BPFO$ .

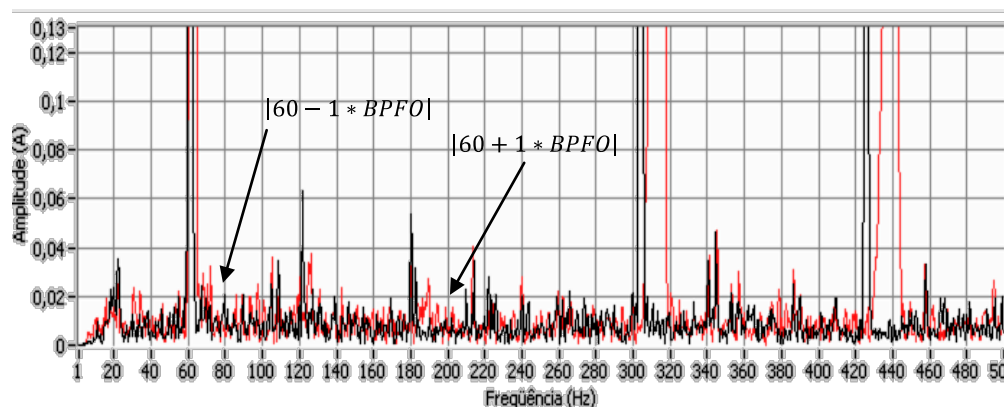


Figura 6.23 – Espectro de corrente para o rolamento *SKF 6209 ZZ*, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho)

**b) Detecção do defeito na pista interna do rolamento *SKF 6209 ZZ***

A Fig. 6.24 mostra os espectros do sinal do rolamento com defeito e sem defeito na pista interna. Observa-se a presença das componentes de  $f = |60 \pm 1 * S|$ ,  $f = |60 + 3 * S|$ , essas frequências provavelmente surgiram em virtude do defeito está localizado na pista girante.

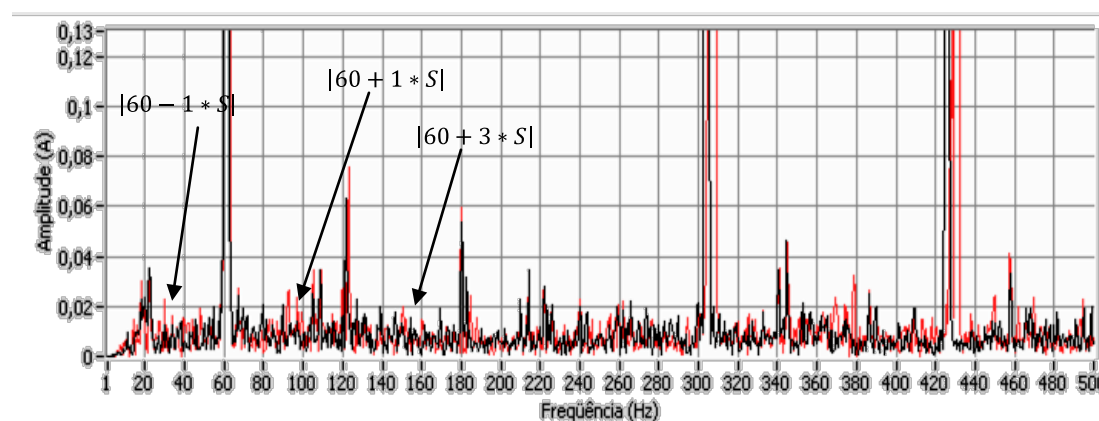


Figura 6.24 – Espectro de corrente para o rolamento *SKF 6209 ZZ*, sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho)

**c) Detecção do defeito na pista externa do rolamento *SKF 6211 ZZ***

De acordo com a Fig. 6.25, não há presença de frequências características de defeito na pista externa. Pode-se observa ainda que as amplitudes em 120 e 180 Hz aumentaram, porém, não se pode afirma que esse aumento esteja relacionado ao tipo de defeito presente no rolamento, visto que não estão relacionados com as equações que determinam as frequências dos harmônicos da corrente.

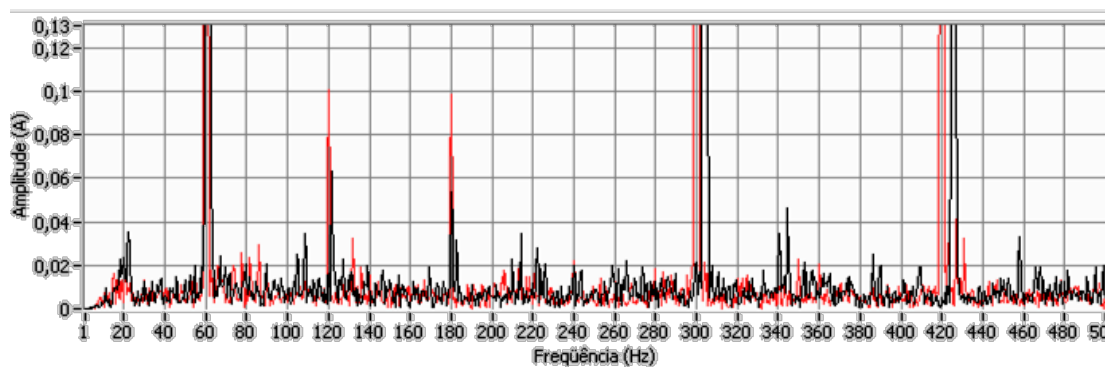


Figura 6.25 – Espectro de corrente para o rolamento *SKF 6211 ZZ*, sem defeito (preto) e com defeito na pista externa (vermelho)

*d) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6211 ZZ*

A Fig. 6.26 mostra os espectros do sinal do rolamento com defeito e sem defeito na pista interna. Observa-se um aumento da amplitude das componentes de,  $f = 60 + 2 * S$ ,  $f = 60 + 4 * S$ . Esses principais componentes presentes no espectro atual ocorrem em múltiplos da frequência da corrente e são causadas pela saturação, distribuição, e a tensão. O aumento dessas amplitudes dificulta a detecção das frequências harmônicas características de defeitos.

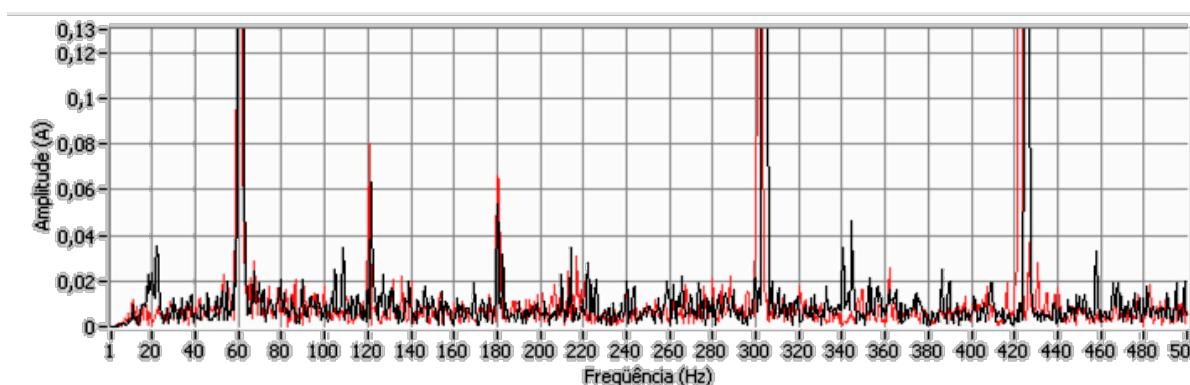


Figura 6.26 – Espectro de corrente para o rolamento sem defeito (preto) e com defeito na pista interna (vermelho)

6.3.2.2 Técnica de Cepstrum

A técnica de cepstrum foi aplicada nos sinais de corrente para o rolamento com defeito nas pistas externa e interna, pois como já mencionado anteriormente, as frequências

característica de defeitos nos elementos dos rolamentos aparecem no espectro de corrente modulando a frequência fundamental da corrente do estator.

**a) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6209 ZZ**

O cepstrum do sinal de corrente para o rolamento com defeito na pista externa é mostrado na Fig. 6.27 Evidencia-se facilmente o surgimento de picos espaçados de 0,008 s, cujo inverso corresponde a frequência de 125,00 Hz, aproximadamente a frequência de defeito.

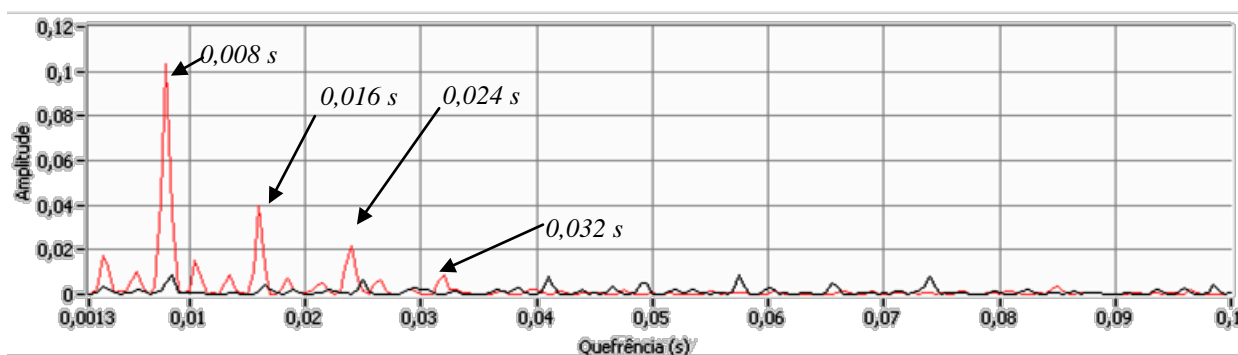


Figura 6.27 – Cepstrum do sinal sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho)

**b) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6209 ZZ**

Na Fig. 6.28 é mostrado o cepstrum do sinal do rolamento com defeito na pista interna. Pode-se observar a presença de um pico com valor de 0,0325s, cujo inverso deste valor é 30,77 Hz, que corresponde a frequência de modulação do sinal.

**c) Detecção do defeito na pista externa do rolamento SKF 6211 ZZ**

Para o sinal do rolamento com frequência de defeito na pista externa de 124,3 Hz foi aplicado o cepstrum. Através da Fig. 6.29, pode-se determinar a frequência de defeito pelos picos evidenciados. Observa-se que entre os picos destacados o espaçamento é de aproximadamente 0,008 s, cujo valor inverso é 125 Hz, que é aproximadamente a frequência de defeito.



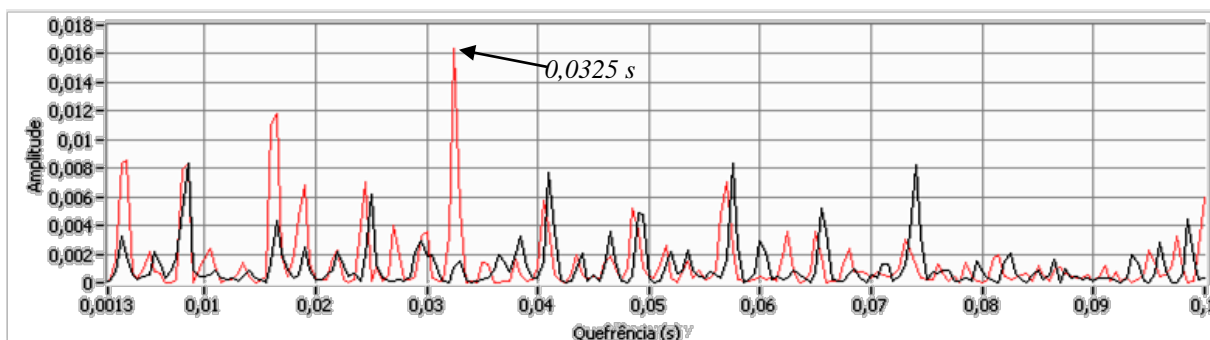


Figura 6.28 - Cepstrum do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista interna (vermelho)

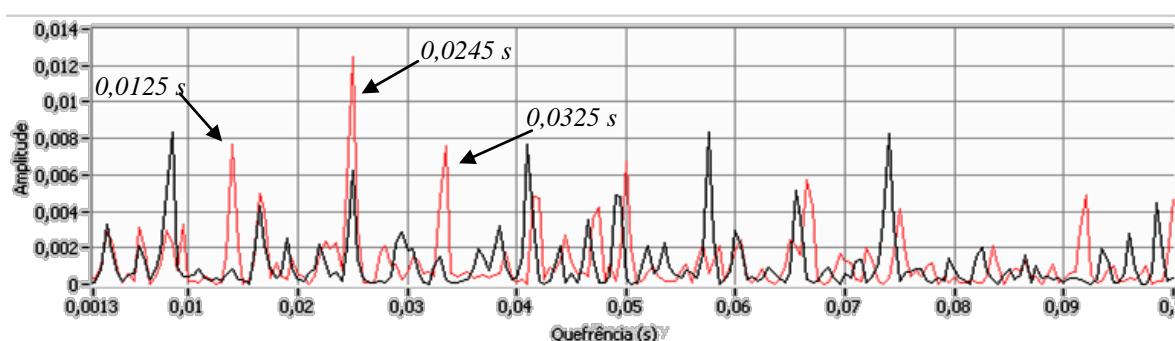


Figura 6.29 - Cepstrum do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal com defeito na pista externa (vermelho)

**d) Detecção do defeito na pista interna do rolamento SKF 6211 ZZ**

No cepstrum aplicado para o sinal do rolamento com defeito na pista interna, mostrado na Fig. 6.30, pode-se observar a presença de um pico com valor de 0,0355s, cujo inverso deste valor é 28,2 Hz, que corresponde a frequência de modulação do sinal.

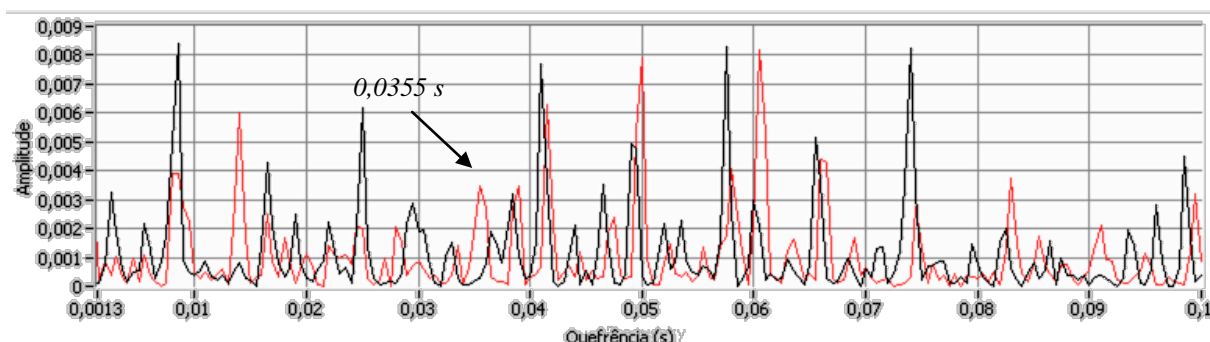


Figura 6.30 - Cepstrum do sinal do rolamento sem defeito (preto) e do sinal do rolamento com defeito na pista interna (vermelho)

#### 6.4. DETECÇÃO DO DEFEITO DE DESBALANCEAMENTO MECÂNICO

Como já mencionado anteriormente, o desbalanceamento do rotor de uma máquina provoca níveis de vibrações acima das permissíveis que aparecem predominantemente na direção radial. Sabendo disso, dentre as técnicas utilizadas neste trabalho para identificação de defeitos, aplicou-se nos sinais de vibração, as técnicas no domínio do tempo e análise espectral para detectar o desbalanceamento mecânico induzido no gerador.

Além disso, visto que o desbalanceamento mecânico causa excentricidade no entreferro do gerador, os sinais de corrente foram analisados através das técnicas de análise espectral e de cepstrum, para identificar a presença de frequências que podem está associadas ao desbalanceamento mecânico.

##### 6.4.1 Detecção do desbalanceamento Mecânico por Análise de Vibração

###### 6.4.1.1 Análise no Domínio do Tempo

Para as medições dos sinais de vibrações no domínio do tempo realizadas para o gerador desbalanceado, pode-se observar na Tab. 6.7, que os valores de  $X_{\text{pico}}$ ,  $X_{\text{rms}}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ , aumentaram, quando comparados com os valores medidos para o gerador em condição normal de funcionamento.

Tabela 6.7 – Comparação dos valores de  $X_{\text{pico}}$ ,  $X_{\text{rms}}$ ,  $F_c$ ,  $F_k$  e  $K$ , para o gerador sem defeito e com desbalanceamento.

Parâmetros	Sem defeito	Desbalanceamento
$X_{\text{pico}}$	5,67	10,7
$X_{\text{rms}}$	2,18	2,93
$F_c$	2,6	3,65
$F_k$	12,36	31,35
$K$	1,95	2,88

Outra observação importante é que a presença do desbalanceamento fez com que o nível de aceleração  $X_{rms}$  fosse maior que o permissível, conforme os dados da Tab. 6.1.

#### 6.4.1.2 Análise Espectral

O defeito de desbalanceamento aparece no espectro em uma frequência igual ao do giro do eixo ao qual está fixado o rotor. Para melhor verificação dessa frequência utilizou – se os espectros em deslocamento.

A Fig. 6.31 mostra o espectro de vibração medido em deslocamento para o gerador com o desbalanceamento. Observa-se que não houve um aumento da amplitude na frequência de rotação do gerador, quando comparado ao do gerador em condição normal de funcionamento.

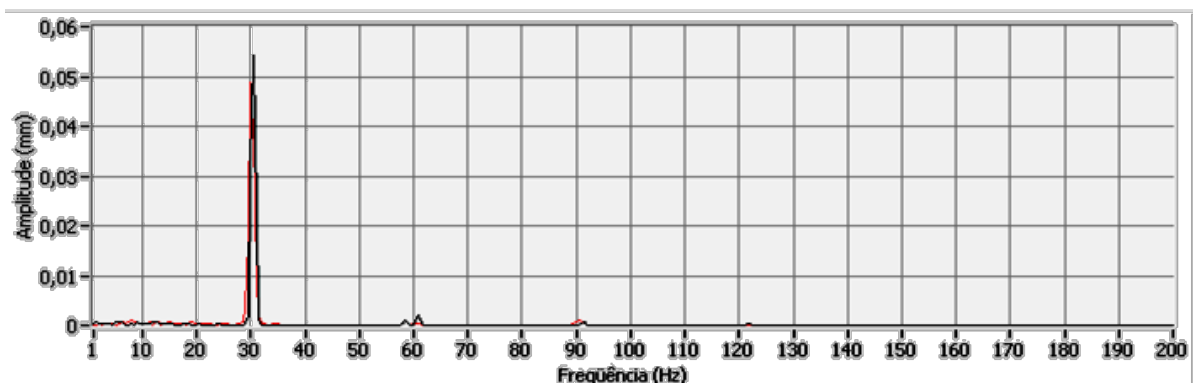


Figura 6.31 - Espectro de vibração em deslocamento, do gerador desbalanceado

#### 6.4.2. Detecção do desbalanceamento por Análise de Corrente

##### 6.4.2.1 Análise Espectral

A Eq. (3.34) mostrada no capítulo 3, determina as frequências para identificar o defeito de desbalanceamento através do espectro de corrente, sendo:  $f_{desb} = |f_e \pm kxf_{rm}|$ . Essas componentes são:  $f1 = |60 \pm 1 * 30|$ ,  $f2 = |60 \pm 2 * 30|$  e  $f3 = |60 \pm 3 * 30|$ .

Na Fig. 6.32 pode-se visualizar o espectro geral da corrente do estator do gerador em condição normal de funcionamento e com desbalanceamento. Como já explicado, as amplitudes nas frequências de interesse apresentam valores bem menores que a amplitude em 60 Hz (frequência fundamental de geração), o que torna difícil visualizar qualquer alteração no espectro, relacionada a essas frequências.

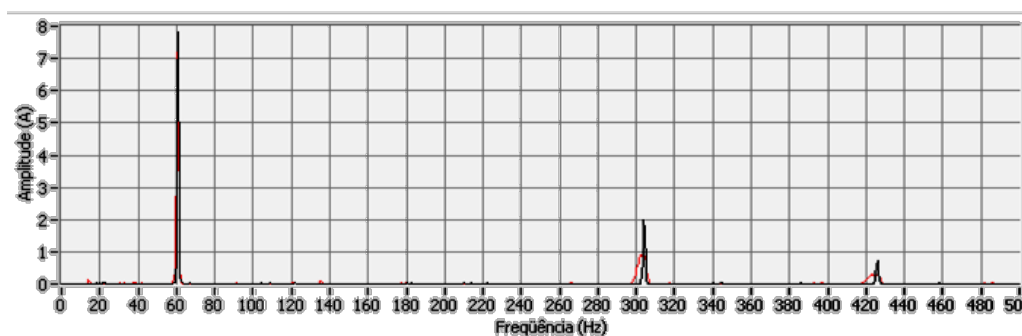


Figura 6.32 – Espectro de corrente do estator do gerador sem defeito e com desbalanceamento

Assim, para se identificar melhor o defeito de desbalanceamento, foi aplicado um zoom nos valores de amplitudes do espectro, com o objetivo de se verificar as alterações nas frequências de interesse.

A Fig. 6.33 mostra os espectros com zoom nos valores de amplitudes para o gerador sem defeito e com desbalanceamento mecânico. Pode-se observar claramente que surgiram as frequências 15 e 135 Hz. Com base na Eq. 3.30, conclui-se que essas frequências não possuem relação direta com o tipo de defeito. Em complementação a análise, observou-se ainda elevações nas amplitudes de 30, 90 e 180 Hz, que correspondem às componentes de  $f_1 = |60 \pm 1 * 30|$  e  $f_1 = |60 \pm 4 * 30|$ .

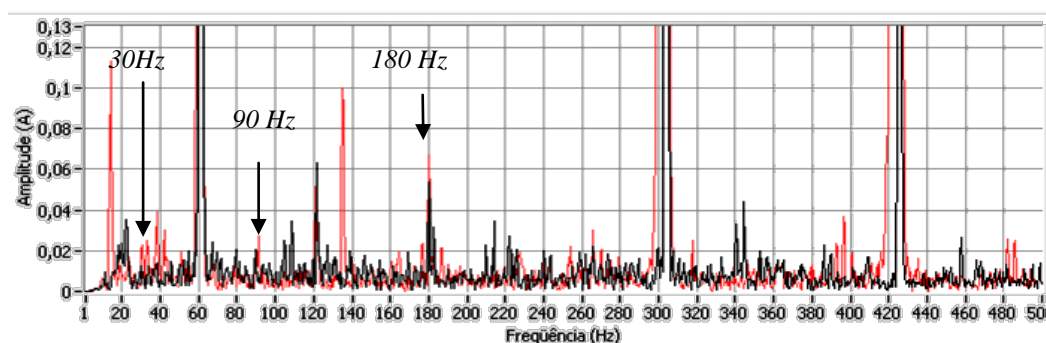


Figura 6.33 – Zoom no espectro de corrente do estator do gerador sem defeito e com desbalanceamento

## 6.4.2.2 Técnica de Cepstrum

Sabendo que o defeito de desbalanceamento causa excentricidade dinâmica no entreferro (*air Gap*), e que por isso a frequência de defeito aparece modulada na (frequência fundamental da corrente), aplicou-se a técnica de cepstrum para se evidenciar essa frequência.

Na Fig. 6.34 pode-se observar que os picos de 0,0083, 0,0165, e 0,033s, cujos valores inversos são 120,48, 60,60 e 30,30 Hz, correspondem aproximadamente as componentes de  $f_1 = |60 - 1 * 30|$ ,  $60$ ,  $f_2 = |60 - 4 * 30|$  e  $f_1 = |60 + 2 * 30|$ .

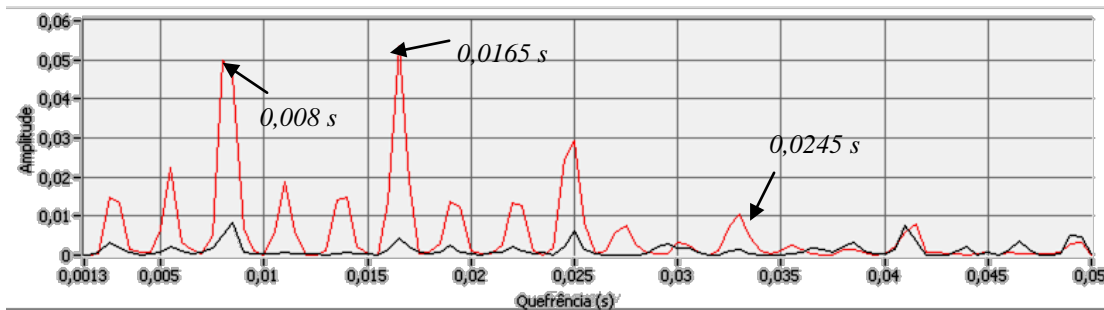


Figura 6.34 – Cepstrum do sinal de corrente do estator do gerador com desbalanceamento.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 7.1. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho realizado.

Este trabalho apresenta uma contribuição aos métodos de identificação de defeitos em máquinas, haja vista que o objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de diagnóstico de defeitos em máquinas elétricas utilizando o método de vibração e correlação com a corrente do estator. Considerando que o método tradicional de vibração em máquinas já tem apresentado grandes contribuições para o entendimento do comportamento operacional de uma máquina e os possíveis defeitos, a combinação dos dois métodos apresentados pode ser uma ferramenta poderosa na identificação de defeitos em máquinas elétricas. Assim, para a obtenção dos resultados, utilizou-se as técnicas de análise de sinais comumente usadas para diagnosticar defeitos em máquinas.

Inicialmente as técnicas foram implementadas em uma aplicativo desenvolvido na plataforma *LabView* e aplicadas a uma sinal, obtidos através de equações matemáticas, que simula um defeito na pista externa de um rolamento. A partir dos resultados obtidos, comprovou-se que as técnicas estavam de acordo com a teoria mostrada no capítulo 3.

Outro ponto a ser destacado no trabalho é o desenvolvimento do sistema de aquisição e análise de sinais para identificação de defeitos em máquinas elétricas, que pelos resultados obtidos na verificação experimental, comprova-se que esse sistema além de ser uma solução de baixo custo foi uma ferramenta essencial na obtenção dos resultados do trabalho.

A bancada experimental foi concebida com o propósito de representar um sistema de geração de energia. Nela foram simuladas situações de condições de operação, onde o sistema foi excitado por diversos defeitos. Primeiramente foi estudada a condição em que o sistema (bancada experimental) foi excitado por um defeito propositado nas pistas (externa e interna) dos rolamentos. Posteriormente, o sistema foi excitado por um desbalanceamento, sendo este defeito foi obtido pela adição de uma massa no rotor do gerador. Nesse sentido, a bancada de teste foi fundamental na verificação experimental para a aplicação da metodologia.

Na verificação experimental, que tinha o propósito de verificar a aplicabilidade e viabilidade da metodologia apresentada, primeiramente foram medidos e analisados os sinais de vibração, onde o principal objetivo era verificar a sensibilidade das técnicas de análise de sinais na identificação dos defeitos.

Para os defeitos introduzidos nas pistas (externa e interna) dos rolamentos do gerador da bancada, pode-se verificar que as técnicas valor RMS, valor de pico, fator de crista, fator K e curtose, tiveram comportamentos semelhantes em todos os casos, elas tiveram seus valores aumentados na presença dos defeitos.

A técnica de análise espectral teve um comportamento semelhante para os defeitos nas pistas externa e interna dos dois rolamentos. Através do espectro geral pode-se observar a elevação das amplitudes nas altas frequências. No espectro após a aplicação do filtro passa – banda, observou-se o surgimento de algumas harmônicas das frequências dos defeitos.

A técnica do envelope conseguiu identificar a frequência de defeito na pista externa dos dois rolamentos. Para o defeito localizado na pista interna, após aplicação da técnica do envelope evidenciou-se a frequência de rotação da máquina e suas harmônicas. Isso pode ser justificado pelo defeito está localizado na pista girante.

O cepstrum identificou a frequência de defeito na pista externa do rolamento 6209. Porém, não conseguiu detectar a frequência de defeito na pista externa do rolamento 6211. No caso do defeito na pista interna, o cepstrum identificou um pico correspondente à frequência de rotação da máquina, portanto a moduladora do sinal.

Para o desbalanceamento, o uso das técnicas valor RMS, valor de pico, fator de crista, fator K e curtose, tiveram comportamentos semelhantes aos defeitos nos rolamentos, isto é sofreram um aumento na presença dos defeitos. Porém, na análise espectral não se identificou qualquer alteração no espectro.

Finalizando a verificação experimental, os sinais de corrente foram medidos e analisados através das técnicas de análise espectral e cepstrum. Nesta análise, o objetivo é verificar o surgimento de frequências características dos defeitos detectados a partir dos sinais de vibração.

No caso dos defeitos nos rolamentos e desbalanceamento, a análise espectral não se mostrou muito eficiente, visto que pelos resultados apresentados alguns defeitos não foram detectados facilmente ou não foram detectados. Porém, o uso da técnica do cepstrum no sinal de corrente se mostrou muito poderosa, vistos que, os defeitos induzidos provocaram o

surgimento de picos em quefrências, cujos valores inversos, correspondem às frequências características desses defeitos.

Dessa forma, comprova-se o que alguns trabalhos já apresentaram, que as frequências harmônicas dos sinais de corrente podem ser obtidas a partir das frequências de vibração, na presença dos defeitos apresentados.

## 7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante salientar, que o trabalho apresentado é um estudo inicial no diagnóstico de defeitos em máquinas elétricas por análise e vibração e correlação com a corrente, e que os aspectos referentes a sua aplicabilidade em hidrogeradores deverão ser pesquisados posteriormente e que o intuito do trabalho é validar a idéia de que é possível identificar defeitos mecânicos em máquinas elétricas pela correlação entre os sinais de vibração e corrente.

Pelo exposto, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realizar novos estudos com repetitividade dos defeitos apresentados neste trabalho.
- Introduzir novos defeitos na bancada (desalinhamento, curto circuito entre espiras, etc.).
- Expandir o estudo em diferentes máquinas elétricas.
- Dar continuidade no trabalho, fazendo as análises a partir dos dados reais do hidrogerador da UHE de Coaracy Nunes.

É importante observar que esse trabalho é um estudo inicial em relação a análise de corrente, sendo que a carga do sistema é conhecida e mantida constante. Em sistemas em que a carga é desconhecida e sobre variações, sugere-se a análise da tensão gerada.



## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.R. V., ALMEIDA, M.T. de. Análise de falhas em Compressores de Parafuso. In: **CONFERÊNCIA SOBRE TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS**, 6., 2002, Salvador. Anais. Disponível em: <<http://www.aeende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE020.PDF>>. Acesso em 21 fev 2006.

ALMEIDA, F.R. V., ALMEIDA, M.T.de. Diagnóstico de vibrações em máquinas rotativas moduladas em amplitude - AM. **Manutenção y Qualidade**, Rio de Janeiro, v.11, n. 58, p. 24-25, 2005.

ALMEIDA, M. T. de, GÓZ, Ricardo Damião S. **Análise de Vibrações I** medida E Diagnóstico. Apostola do Curso de Análise de Vibração da FUPAI, Itajubá – MG, 2002

ALMEIDA, M. T., GÓZ, R. D. S.. **Identificação de Frequências de Vibrações em Sistemas de Engrenagens e Redutores**. Apostila do Curso de Análise de Vibração da FUPAI, Itajubá – MG.

ANDRADE NETO, P. R., GIACOMIN, J. C. **Aquisição e Análise de Sinais Elétricos**. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. Disponível em: < <http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v3.1/art02.pdf>> Acesso em: 15 maio 2006.

ANTONIOLLI, E. B. **Análise Comparativa das Técnicas de Medição e Análise das Vibrações, aplicadas na Manutenção Preditiva**. 1999. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8008/83. **Balanceamento de corpos rígidos rotativos: qualidade**, 1983.

BARCOV, A., BARCOVA, N., **Condition Assessment Life Prediction of Rolling Element Bearing – Part 1, Sound Vibration/** June, pp. 10-17, 1995.

BENBOUZID, M. H., VIEIRA, A. M e THEYS, C. **Induction Motors' Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques**. IEEE Transactions on power Eletronics, vol. 14, n. 1 Jan 1999. Industry Applications, Atlanta, v. 35, n. 1, p. 94-99, jan./fev. 1999.

BENBOUZID, M. H. e NEJJARI, H. **Monitoring and Diagnosis of Induction Motors Electrical Fault Using a Corrent Park's Vector Patter Learning Approach**. IEEE Transactions on Industry Applications, Atlanta, v. 36, n 3, p. 730 – 735, may/jun,2000.

BEZERRA, R. A. **Detecção de Falhas em Rolamento por Análise de Vibração**, 2004, 152f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

BONALDI, E. L. **Análise e identificação de Falhas em Motores de Indução em em Industrias Petroquímicas através da Técnica de Análise da Assinatura Elétrica – ESA**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, 2008

CAMERON, J. R., THOMPSON, W. T. e ROW A. B. **Vibration and current monitoring for detection air gap eccentricity in large induction motors**. In: Proceedings of International conference on Electrical Machines. London, 173–179. 1982.

CASH, M. A.; HABETLER, T. G.; KLIMAN, G. B., **Insulation Failure Prediction in AC Machines Using Line-Neutral Voltages**. IEEE Transactions on Industry Applications, Atlanta, v. 34, n. 6, p. 1234-1239, nov./dez. 1998.

CASTRO JÚNIOR, C. A. **Geradores Síncronos**. Apostila da disciplina ET720 Sistemas de Energia Elétrica I – Universidade Estadual de Campinas. Disponível em <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro/cursos/et720/Cap3.pdf>>. Acesso em: 20 fevereiro 2006.

CENTRO DE PESQUISA DE ENERGIA, **DiaHGer – Monitoração e Diagnóstico de Hidrogeradores**. Disponível em: <[www.cepel.br](http://www.cepel.br)> Acesso em: 20 maio 2006.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, **Gerador Elétrico**. Disponível em: <<http://www.copel.com/pagcopel.nsf/0/0E02B32569EF57D503256EAC005341E3?OpenDocument>> Acesso em: 15 maio 2006.

DAVID, R. **The industrial application of phase current analysis to detect rotor winding faults in squirrel cage induction motors**. Power Engineering Journal 18, 77–83. 1995.

DELEROI, W **Broken bar in squirrel cage rotor of an induction motor, Part I: Description by superimposed fault currents**, *Arch. Fur Elektrotechnik*, vol. 67, pp. 91-99, 1984.

EISENMANN, R. C. e EISENMANN, R. C, Jr. **Machinery malfunction diagnosis and correction: Vibration analysis and troubleshooting for the process industries**. New Jersey; Editora Prentice Hall.

FILIPPIN, C. G. e LIRA, A. T. **Análise Estrutural de Rotores de Turbinas Hidráulicas para estudo da Incidência de Trincas e Desempenho à Vida de Fadiga**. Disponível em: <<http://citenel.aneel.gov.br/historico%5Cicitenel%5C trabalhos%5C24.pdf>>. Acesso em: 10 abril 2006.

GARCIA, Ariovaldo V. **Máquina Síncrona**. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node85.html>> Acesso em: 10 abril 2006.

GERGES, Samir N.Y. e NUNES, MARCUS A. C. **Detecção de Falhas em rolamentos através de medição do Envelope de vibrações**. VII congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Universid Austral de Chile, 2 a 5 outubro 1996.

GRIMONI, J. A. B. e LOPES, V. J. S. **A Utilização do Software LABVIEW no Ensino Experimental de Sistemas de Energia Elétrica**. Escola Politécnica da USP, São Paulo. Disponível em: <<http://www.univap.br/iasee/anais/trabalhos/Grimoni-Grimoni.pdf>> Acesso em: 15 maio 2006.

HORTA, C.A.; GABELINE, I., GONÇALVES, C. **Modelo reduzido transposto numericamente para o dimensionamento da terceira unidade geradora (turbina hidráulica) para a UHE Coaracy Nunes**. In XVI Seminário Nacional de produção e transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE, Campinas – SP, 2001.

JONES, C.V. **Unified Theory of electral machines** – Butter-Worth, 1967.

KLIMAN, G. B. **The Detection of Fault rotor Bars in Operating Induction Motors**. In: Proceeding International Conference of Electric Machine ( ICEM 86), Munich, Germany, 1986.

KLIMAN, G. B. e STEIN, J. **“Induction motor fault detection via passive current monitoring,”** in Proc. Int. Conj Elec. Mach., Aug. 1990, pp. -, “Methods of motor current signature analysis,” Elec. Mach. Power Syst., vol. 20, no. 5, pp. 463474, Sept. 1992.

LEITH, D e RANKIN, D **“Real time expert system for identifying rotor faults and mechanical influences in induction motor phase current,”** in *IEE 5th Int. Conf Electrical Machines and Drives*, London, Sept. 1991, pp. 46-50.

LENZI, A. **Revisão Bibliográfica sobre Técnicas de Diagnóstico de Defeitos em Máquinas. Relatório Parcial I e II**, Setembro 1991.

LI, W. e MECHEFSKE C. K. **Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods**. Journal of Vibration and Control 2006; 12; 165

LIANG, B.; WNICKI, S.D. I.; BALL A. D, Asymmetrical Stator and rotor Faulty Detection Using vibration, Phase Current And Transient Speed Analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing** 17(4), 857–869.2003.

MARTINS, L.G, **Detecção de Defeitos em Rolamento através do Processamento e Análise de Sinais de Vibrações**. Dissertação de Mestrado, UFSC 1985

MESQUITA, A. L. A., SANTIAGO, D. F. A., BEZERRA, R. A., MIRANDA, U. A., DIAS M. e PEDERIVA, R. **Detecção de falhas em Rolamento Usando Transformadas Tempo – Frequência – Comparação com análise de Envelope**. Mecânica Computacional, 2002. Vol. XXI, PP. 1938-1954

MESQUITA, A. L. A. **Notas de aula da disciplina “análise de vibrações em máquinas”**. UFPA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2005.

MSPC, **Motores Trifásicos**. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/elemag/enel2.asp/>> Acesso em: 15 maio 2006.

NASAR, S. A., **Máquinas Elétricas**; tradução Heloi Jose Fernandes Moreira. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil (Coleção Schaum), 1984.

NATIONAL INSTRUMENTS, **LabView - User Manual**, 2000.

NEPOMUCENO, L.X., **Técnica de Manutenção Industrial e diagnóstico de Falhas**. Revista Mundo mecânico, dezembro de 1984 (14-25)

NEPOMUCENO, L.X., **Manutenção Preditiva em Instalações Industriais**. São Paulo; Editora Edgard Blücher Ltda, 1985.

NEPOMUCENO, L.X., **Técnica de Manutenção Preditiva**. São Paulo; Editora Edgard Blücher Ltda, 1989, Volume I e II.

NERY, R.T.C. **Desenvolvimento de uma ferramenta Virtual para Análise de Vibração em Máquinas Rotativas: Aplicação em uma bancada Didática**. 2008. Trabalho de Conclusão de curso) – Faculdade de Engenharia da Universidade Federal do Pará

NUNES, M. A. C. **Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos pela Técnica do Envelope**. 1989. cap. 2, p. 10-33. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, área de concentração Vibrações e Ruído) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

PONCI, L. P. e CUNHA, P. M. R. **Previsão de Falhas de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope**. *Manutenção y Qualidade*, Rio de Janeiro, v.11, n. 55/56, p. 14-15, 2005.

RIBEIRO, A. A. **Sistema de aquisição e manipulação de dados em LabView para supervisão e análise de protótipo de bomba de calor por absorção H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>**. Faculdade de Ciências Humanas de Aracruz (FACHA), Espírito Santo.

RILEY, C. M., LIN, B. K. HABETLER, T. G. e KLIMAN, G.B. **A method for Sensorless On-line vibration Monitoring of Induction Machines**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Atlanta, v. 34, n. 6, p. 1240-1245, nov./dez. 1998.

RILEY, C. M., LIN, B., HABETLER, T. G. e KLIMAN, G.B. **Stator Current Harmonics and Their Causal Vibrations: A Preliminary Investigation of Sensorless Vibration Monitoring Applications**. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Atlanta, v. 35, n. 1, p. 94-99, jan./fev. 1999.

SCHOEN, R. R. e HABETLER, T. G., **Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines**, in *Con& Rec. 28th Annu. IAS Meeting*, Oct. 1993, pp. 324-330.

SHOEN, R. R. e HABETLER, T. G. **Motor bearing damage detection using stator current monitoring**, in *Conf Rec. 29th Annu. IEEE Ind. Applicat. Soc. Meeting*, Oct. 1995, pp. 11.

SCHILTZ, R. L. **Forcing frequency identification of rolling element bearings**. *Sound and Vibration*, pp. 16-19, May 1990.

SILVA, J. A. B. **Análise do Comportamento Dinâmico de um Grupo Hidrogerador da Usina Hidrelétrica de Coaracy Nunes**, 2006.109fp. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará

**SOUSA, W. S. Desenvolvimento de Sistema Aplicativo LabView para o Monitoramento de Máquinas rotativas com um Módulo de Balanceamento de Rotores.** 2005. 115fp. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará.

**SOUZA, V. H. P. Projeto e Implementação de uma Bancada de Máquinas Elétricas para Monitoração da geração e Diagnóstico.** 2007.247fp. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pará

**VIEIRA FILHO, X. Operação de Sistemas de Potência com Controle Automático de Geração.** Rio de Janeiro: Ed. Campus Ltda, 1984. 410 p.

**YÁCUBSOHN, R. V. El Diagnostico de Fallas por Analisis Vibratorio.** São Paulo: Ed. de Die Technik Ltda, 1983.

## ANEXOS

### ANEXOS 1 – TEORIA SOBRE MODULAÇÃO E DEMODULAÇÃO DE SINAIS DE VIBRAÇÃO (Bezerra, 2004)

#### A.1.1 MODULAÇÃO

Existem diversos tipos de modulação dos quais podemos destacar: modulação em amplitude (AM), em frequência (FM) e em fase (PM). Os rolamentos quando submetidos à velocidade constante, as falhas que ocorrem em pontos da pista ou esfera que se deslocam em relação à região de carga sofrem modulação em amplitude (McFadden, 1984; Braun, 1986; Mitchell, 1993) *apud* Bezerra (2004).

Como foi visto no capítulo anterior, para que haja uma modulação em frequência no rolamento é necessário que a frequência de rotação do rolamento sofra variação durante o processo de aquisição. Durante os ensaios realizados para esse trabalho, a velocidade de rotação do rolamento foi mantida constante, logo se houver modulação em algum sinal de defeito, será em amplitude.

Para que haja modulação são necessárias duas ondas: uma moduladora e uma portadora. Na modulação em amplitude a portadora terá sua amplitude modificada proporcionalmente ao sinal modulante. A portadora é dada por:

$$S_p(t) = A_p \cos(\omega_p t), \quad (\text{A.1})$$

onde,

$A_p$  = amplitude da portadora;

$\omega_p$  = frequência da portadora.

Considerando-se um sinal qualquer modulante  $S_m(t)$  com frequência menor que a frequência do sinal portador. Variando-se a amplitude da portadora, proporcionalmente à moduladora  $S_m(t)$  a amplitude instantânea será:

$$A(t) = A_p[1 + KS_m(t)], \quad (\text{A.2})$$

onde  $K$  é uma constante conhecida como sensibilidade de amplitude.

Obtendo-se uma função modulada dada por:

$$S_{AM}(t) = A(t) \cos(\omega_p t) = A_p[1 + KS_m(t)] \cos(\omega_p t), \quad (\text{A.3})$$

Considerando-se que o sinal modulador  $S_m(t)$  é um sinal senoidal tem-se:

$$S_m(t) = A_m \cos(\omega_m t). \quad (\text{A.4})$$

Substituindo-se a Eq. (A.5) na Eq. (A.4), obtém-se:

$$S_{AM}(t) = [A_p + KA_m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_p t). \quad (\text{A.5})$$

Expandindo-se a Eq. (3.16), obtém-se a seguinte expressão:

$$S_{AM}(t) = \underbrace{A_p \cos(\omega_p t)}_{\text{Portadora}} + \underbrace{\frac{KA_m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t}_{\text{Banda lateral Inferior}} + \underbrace{\frac{KA_m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t}_{\text{Banda lateral Superior}}. \quad (\text{A.6})$$

Um parâmetro importante na modulação é o *índice de modulação* ( $m$ ), que pode ser obtido a partir da razão entre a maior amplitude do sinal modulador pela maior amplitude do sinal portador. Quando o índice de modulação atinge valor maior que a unidade, haverá distorção na modulação (Haykin, 1989; Haykin & Veen, 2001) *apud* Bezerra (2004).

$$m = \frac{A_m}{A_p} \therefore m \begin{cases} < 1 \text{ não haverá distorção} \\ > 1 \text{ haverá distorção} \end{cases}$$

Com a substituição do termo  $A_m$  por  $A_p m$  na Equação (A.6), obtém-se:

$$S_{AM}(t) = A_p \cos(\omega_p t) + \frac{Km A_p}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{Km A_p}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t. \quad (\text{A.7})$$



A Transformada de Fourier a um co-seno é dada por:

$$\mathfrak{F}[\cos(\omega_x t)] = \pi\delta(\omega - \omega_x) + \pi\delta(\omega + \omega_x), \quad (\text{A.8})$$

logo, aplicando-se a Transformada de Fourier à função modulada dada pela Eq. (A.7), obtém-se:

$$\mathfrak{F}[S_{AM}(t)] = A_p [\pi\delta(\omega - \omega_p)] + \pi\delta(\omega + \omega_p) + \frac{Km A_p}{2} [\pi\delta(\omega - (\omega_p - \omega_m)) + \pi\delta(\omega + \omega_p - \omega_m)] + \frac{Km A_p}{2} [\pi\delta(\omega - (\omega_p + \omega_m)) + \pi\delta(\omega + \omega_p + \omega_m)], \quad (\text{A.9})$$

onde, a Fig. A.1 representa o espectro obtido após a aplicação da transformada de Fourier.

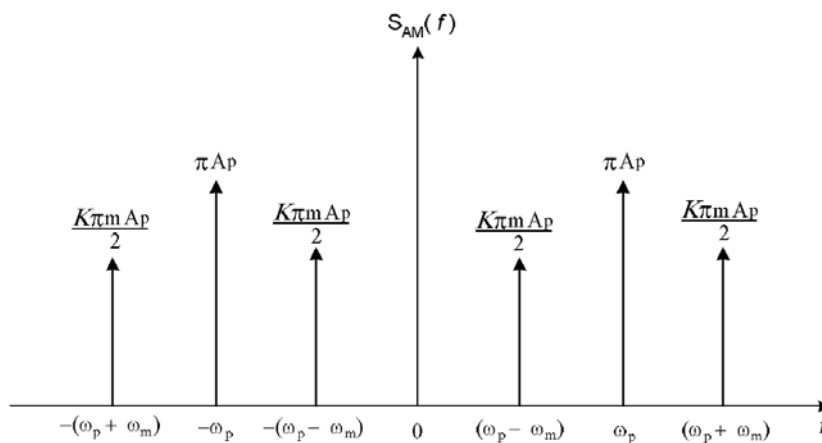


Figura A.1 – Espectro de Frequência de um Sinal AM

Observando-se a Fig. A.1, pode-se verificar que quanto maior a amplitude da frequência portadora maiores serão as amplitudes do espectro. No caso de falhas em rolamentos, estas amplitudes estão diretamente relacionadas às amplitudes das cargas na região de carregamento.

Na Fig. A.2, estão representadas uma função portadora, uma função moduladora, a modulação e o espectro da função modulada. Verifica-se que no espectro da função modulada aparece a frequência do sinal portador ladeada por duas frequências espaçadas, da principal, de um valor igual à frequência do sinal de modulação.

Quando em um rolamento ocorre uma falha em uma ponta da pista que se movimenta, em relação à região de carga, haverá uma modulação cuja frequência é igual a do deslocamento do ponto de falha em relação à região de carregamento.

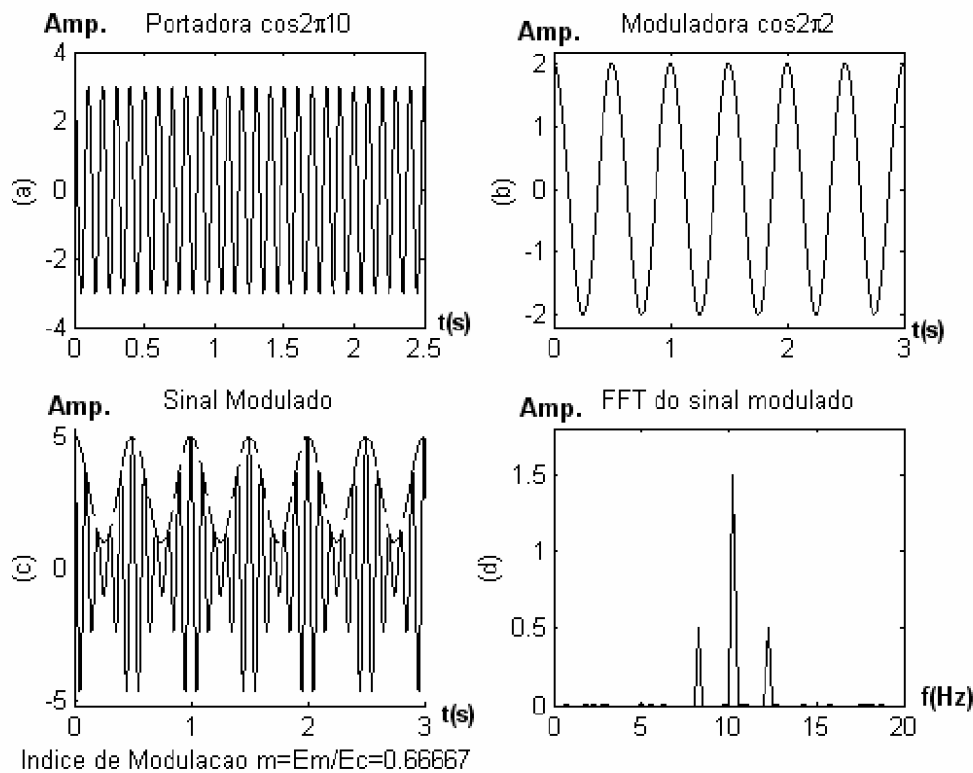


Figura A.2 – (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) fft do sinal modulado.

### A.1.2 DEMODULAÇÃO

Como visto na Fig. A.2 (c), após a modulação, obtém-se um sinal  $S_{AM}(t)$  cujos picos encontram-se ligados por uma curva, representada pela linha tracejada, denominada de envelope. O processo de demodulação em amplitude consiste em extrair o envelope. Na obtenção do envelope, pode ser usado um processo analógico através de placas chamadas de “detector de envelope” ou digitalmente através da transformada de Hilbert (Haykin, 1989; Haykin & Veen, 2001) *apud* Bezerra (2004).

Por ser um procedimento de fácil implementação e versátil, optou-se pela utilização da Transformada de Hilbert. A transformada de Hilbert expressa uma relação entre as componentes reais e imaginárias da transformada de Fourier de um sinal causal. Sinal causal é todo sinal que é nulo para o tempo negativo (Bendat & Piersol, 1986; Randal, 1987) *apud* Bezerra (2004).

Todo sinal causal pode ser obtido pela relação entre um sinal par e um sinal ímpar. A Fig. 3.A (a), (b) e (c) representa um sinal causal e a função par e ímpar que adicionadas geram o sinal causal.

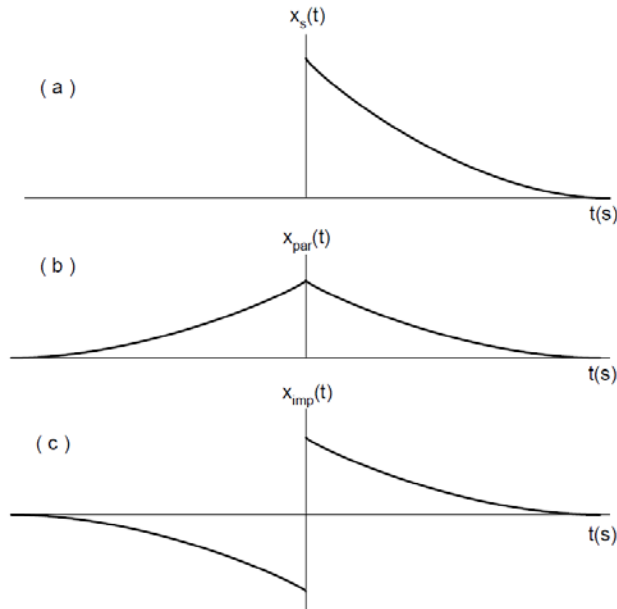


Figura A.3 – Sinal causal (a) sinal causal; (b) função par; (c) função ímpar.

Observando-se a Fig. A.3 pode-se ver que o sinal causal, pode ser obtido a partir da relação:

$$x_s(t) = x_{par}(t) + x_{imp}(t) \quad (\text{A.10})$$

onde:

$x_{par}(t)$  = função par;

$x_{imp}(t)$  = função ímpar.

Usando-se uma função sinal  $sgn(t)$ , onde  $sgn(t) = 1$  para  $t > 0$  e  $sgn(t) = -1$  para  $t < 0$ , a partir da qual as funções, par e ímpar podem ser expressas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} x_{par}(t) &= x_{imp}(t) \, sgn(t) \\ x_{imp}(t) &= x_{par}(t) \, sgn(t). \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

A relação acima garante que os sinais pares e ímpares não são independentes. A partir destes conceitos iniciais, serão desenvolvidas algumas relações com a transformada de

Fourier com o objetivo de relacionar as componentes pares e ímpares do sinal e as partes reais e imaginárias da transformada Fourier. Como a única diferença entre as transformadas direta e inversa de Fourier é o sinal da exponencial, algumas relações podem ser estabelecidas. De forma mais geral, as seguintes relações são válidas (Randal, 1987):

$$x(t) \overset{\mathfrak{F}}{\leftrightarrow} X(f) \overset{\mathfrak{F}}{\leftrightarrow} x(-t) \overset{\mathfrak{F}}{\leftrightarrow} X(-f) \overset{\mathfrak{F}}{\leftrightarrow} x(t) \quad (\text{A.12})$$

Tem-se ainda, que para um sinal real a propriedade:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt = X^*(-f), \quad (\text{A.13})$$

é válida, onde  $X^*(-f)$  é o conjugado de  $X(f)$ , logo:

$$\text{Re}(f) = \text{Re}(-f) \quad e \quad \text{Im}(f) = -\text{Im}(-f) \quad (\text{A.14})$$

$$X(f) = \text{Re}(f) + i \text{Im}(f) \quad (\text{A.15})$$

Pode-se concluir que a parte real da transformada de Fourier é uma função par e a parte imaginária é uma função ímpar. Da Eq. A.12, tem-se que para um sinal real e par  $x(t)=x(-t)$ , pode-se então concluir que  $X(f)=X(-f)$ . A partir da Equação A.13 chega-se a:

$$\text{Re}(f) + i \text{Im}(f) = \text{Re}(f) - i \text{Im}(f) \quad (\text{A.16})$$

Logo, para que a relação seja válida  $\text{Im}(f) = 0$ . Seguindo-se o mesmo procedimento anterior, para um sinal real e ímpar, podemos afirmar que:

- Para um sinal real par o seu espectro é real par;
- Para um sinal real ímpar o seu espectro é imaginário e ímpar.

De posse das relações observadas anteriormente, volta-se as Equações A.10 e A.11, a fim de se estabelecerem algumas relações entre as componentes reais e imaginárias da transformada de Fourier do sinal, assim:

$$\mathfrak{I}\{x(t)\} = \mathfrak{I}\{x_{par}(t)\} + \mathfrak{I}\{x_{imp}(t)\} \quad (\text{A.17})$$

$$\mathfrak{I}\{x(t)\} = \mathfrak{I}\{X(f)\} = X_{Re}(f) + iX_{im}(f) \quad (\text{A.18})$$

Levando-se em conta as relações estabelecidas anteriormente, tem-se:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{I}\{x_{par}(t)\} \quad (\text{A.19})$$

$$X_{im}(f) = \mathfrak{I}\{x_{imp}(t)\} \quad (\text{A.20})$$

Como dito anteriormente, a transformada de Hilbert expressa a relação entre a parte real e imaginária da transformada de Fourier de um sinal, tem-se que:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{I}\{x_{par}(t)\} = \mathfrak{I}\{x_{imp}sgn(t)\} \quad (\text{A.21})$$

Pelo teorema da convolução, a relação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{I}\{x_{imp}\} * \mathfrak{I}\{sgn(t)\} \quad (\text{A.22})$$

Como  $\mathfrak{I}\{sgn(t)\} = \frac{1}{i\pi f}$ , a Equação A.21 pode ser reescrita obtendo - se:

$$X_{Re}(f) = iX_{im}(f) \frac{1}{i\pi f} = X_{im}(f) \frac{1}{\pi f} \quad (\text{A.23})$$

Logo, a transformada de Hilbert do sinal pode ser expressa por:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{1}{1-\tau} = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t}\right) \quad (\text{A.24})$$

O gráfico (c) da Fig. A.4 representa um sinal que, após o processo de modulação, foi “envelopado”, e o gráfico (d), representa o envelope obtido após a aplicação da transformada de Hilbert.

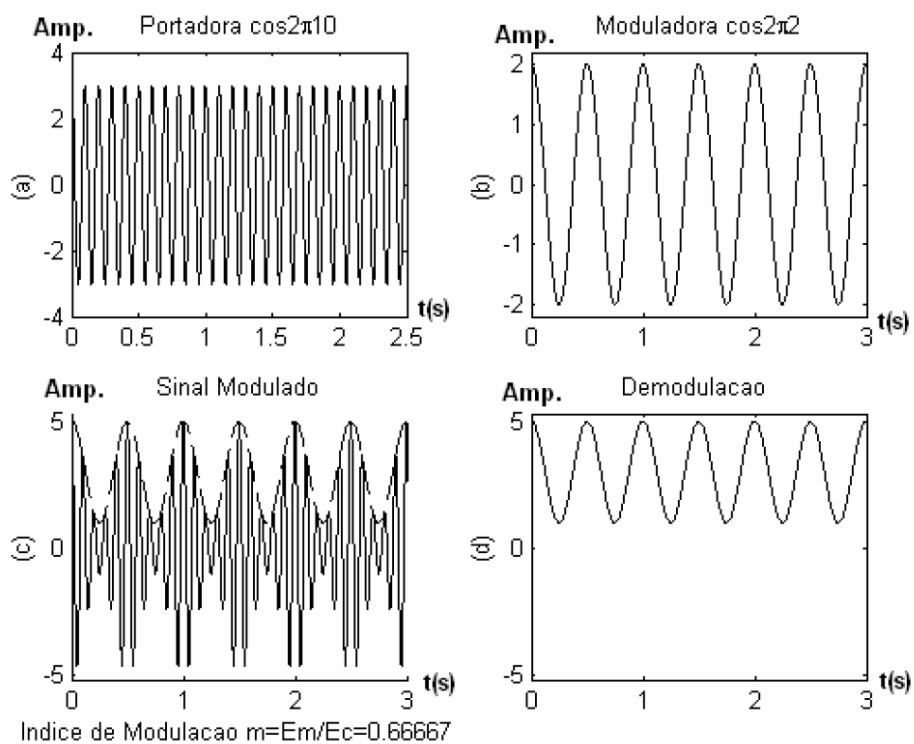


Figura A.4 – Demodulação de um sinal; (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) envelope do sinal modulado.

## ANEXO 2 – GRAUS DE QUALIDADE DE BALANCEAMENTO DE ROTORES SEGUNDO ISO 1940/1

Grau de balanceamento	$e_{adm} \omega$ (mm/s)	Tipos de rotores - exemplos
G4 000	4 000	virabrequim/acionamento <sup>1)</sup> de motores diesel marítimos lentos <sup>2)</sup> com montagem rígida com número ímpar de cilindros;
G1 600	1 600	virabrequim/acionamento de grandes motores de dois tempos com montagem rígida;
G630	630	virabrequim/acionamento de grandes motores de quatro tempos com montagem rígida;
G250	250	virabrequim/acionamento de motores diesel marítimos com montagem flexível;
G100	100	virabrequim/acionamento de motores de quatro cilindros rápidos <sup>2)</sup> com montagem rígida;
G40	40	virabrequim/acionamento de motores diesel rápidos <sup>2)</sup> com seis ou mais cilindros; motores completos (gasolina e diesel) para automóveis, caminhões e locomotivas <sup>3)</sup> ;
G16	16	rodas de automóveis, aros de rodas, assentos de rodas, eixos de acionamento; virabrequim/acionamento de motores de quatro tempos rápidos (gasolina ou diesel) com seis ou mais cilindros; virabrequim/acionamento de motores de automóveis, caminhões e locomotivas; eixos de acionamento (eixos de propulsores, eixos cardan) com requisitos especiais; partes de máquinas de prensagem; partes de maquinário agrícola; componentes individuais de motores (gasolina e diesel) de automóveis, caminhões e locomotivas; virabrequim/acionamento de motores com seis ou mais cilindros com requisitos especiais;
G6,3	6,3	partes de máquinas de processo de plantas; engrenagens principais de turbinas marítimas (marinha mercante); tambores centrífugos; cilindros de máquinas de papel; cilindros de impressão; ventiladores; rotores de turbinas aeronáuticas à gás compostas; volantes de inércia; impelidores de bombas hidráulicas; ferramenta e partes de máquinas em geral; armaduras grandes e médias de motores elétricos (motores elétricos com pelo menos 80 mm de altura do eixo) sem requisitos especiais; armaduras pequenas de motores elétricos, em geral de produção seriada, em aplicações tolerantes à vibração e/ou com isolamento de vibração; componentes individuais de motores com requisitos especiais;
G2,5	2,5	turbinas à gás e à vapor, incluindo turbinas principais marítimas (marinha mercante); rotores de turbo-geradores rígidos; tambores e discos de memória de computadores; turbo-compressores; acionamento de máquinas de ferramenta; armaduras grandes e médias de motores elétricos com requisitos especiais; armaduras elétricas pequenas não enquadradas em uma das duas categorias da classe de balanceamento G6,3; bombas acionadas por turbinas;
G1	1	acionamento de gravadores de fita e fonógrafo (gramofones); acionamento de retíficas; armaduras elétricas pequenas com requisitos especiais;
G0,4	0,4	fusos, discos, e armaduras de retíficas de precisão; giroscópios.

1) Um virabrequim/acionamento é o conjunto que inclui virabrequim, volante de inércia, embreagem, polias, amortecedor de vibração, partes rotativas das bielas, etc;

2) No contexto dessa parte da norma ISO 1940, motores diesel lentos são aqueles cujos pistões tem velocidade inferior a 9 m/s, e motores diesel rápidos são aqueles cujos pistões tem velocidade superior a 9 m/s;

3) A massa do rotor para motores completos compreende a soma das massas de todos os componentes do virabrequim/acionamento descrito no item 1).

**ANEXO 3 – DESBALANCEAMENTO RESIDUAL ADMISSÍVEL  
SEGUNDO ISO 1940/1**

