

**ARLINDO MERTENS JUNIOR**

**UMA ABORDAGEM SOBRE DETECÇÃO DE BARRAS  
QUEBRADAS EM MOTORES DE INDUÇÃO**

**Curitiba**

**Setembro de 2008**

**ARLINDO MERTENS JUNIOR**

**UMA ABORDAGEM SOBRE DETECÇÃO DE BARRAS  
QUEBRADAS EM MOTORES DE INDUÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau de Mestre no Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr Eduardo Parente Ribeiro.

**Curitiba**

**Setembro de 2008**

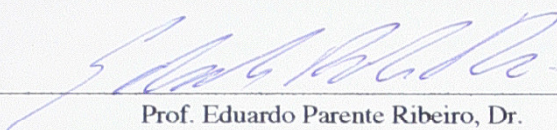
# UMA ABORDAGEM SOBRE DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

ARLINDO MERTENS JUNIOR

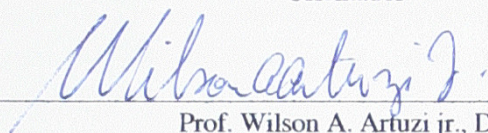
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

da Universidade Federal do Paraná

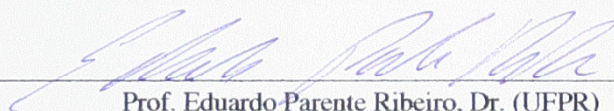


Prof. Eduardo Parente Ribeiro, Dr.  
Orientador

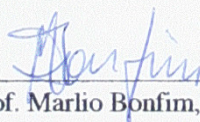


Prof. Wilson A. Artuzi jr., Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

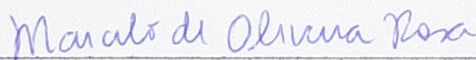
## Banca Examinadora



Prof. Eduardo Parente Ribeiro, Dr. (UFPR)  
Presidente



Prof. Marlio Bonfim, Dr. (UFPR)



Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr. (UFPR)



Prof. Humberto Gamba, Dr. (UTFPR)

Curitiba, 26 de setembro de 2008

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha esposa Rafaela, minha mãe Gilza e a todos meus familiares pelo apoio e pela força.

Ao meu orientador professor Dr. Eduardo Parente Ribeiro pelo apoio, ensinamentos e orientação neste trabalho.

Aos professores e funcionários do departamento de engenharia elétrica da UFPR.

A todos que, de alguma forma, contribuíram e ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE PADRÕES .....	2
1.2 MOTIVAÇÃO .....	3
1.3 ANÁLISE DA ASSINATURA ESPECTRAL.....	4
1.4 ESTRUTURA .....	4
<b>2 CARACTERÍSTICAS DE MOTORES COM BARRAS QUEBRADAS.....</b>	<b>5</b>
2.1 BARRAS QUEBRADAS - ANÁLISE POR CORRENTE ELÉTRICA .....	8
2.2 BARRAS QUEBRADAS - ANÁLISE POR VIBRAÇÃO MECÂNICA .....	13
2.3 APLICAÇÃO DE CORRENTE E VIBRAÇÃO NA DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS.....	16
<b>3 APLICAÇÃO DO MÉTODO.....</b>	<b>19</b>
3.1 SISTEMA DE ENSAIO E AMOSTRAS .....	19
3.2 NORMALIZAÇÃO DOS SINAIS .....	24
3.3 CÁLCULO DAS COMPONENTES LATERAIS DE FREQUÊNCIA.....	27
3.3.1 DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE PROCURA E ERROS .....	33
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>36</b>
4.1 ESPECTRO DA CORRENTE ELÉTRICA .....	37
4.2 ESPECTRO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA .....	43
4.3 AVALIAÇÃO DA TAXA DE AQUISIÇÃO E RUÍDO DE FUNDO.....	49
<b>5 APLICAÇÃO DE REDES NEURAS NA DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS.....</b>	<b>53</b>
5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	56
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Falhas em motores de indução [12].</i>	5
<i>Figura 2 – Estrutura interna de um motor de indução [13].</i>	6
<i>Figura 3 – Comparação entre barras quebradas e barras normais de um rotor.</i>	7
<i>Figura 4 – Caracterização do espectro na região da frequência fundamental.</i>	10
<i>Figura 5 – Caracterização do espectro de vibração na região da frequência de rotação.</i>	14
<i>Figura 6 – Fluxograma para diagnóstico de barras quebradas usando vibrações.</i>	17
<i>Figura 7 – Fluxograma para diagnóstico de barras quebradas usando corrente.</i>	18
<i>Figura 8 – Barras em um rotor.</i>	20
<i>Figura 9 – Vista geral da bancada de testes de barras quebradas.</i>	21
<i>Figura 10 – Diagrama do sistema de aquisição de corrente elétrica.</i>	22
<i>Figura 11 – Detalhe do condicionador de corrente tipo efeito “Hall”.</i>	22
<i>Figura 12 – Diagrama do sistema de aquisição de vibração mecânica.</i>	23
<i>Figura 13 – Algoritmo de Normalização dos Sinais Adquiridos.</i>	25
<i>Figura 14 – Sinal de corrente adquirido.</i>	25
<i>Figura 15 – Exemplo de um espectro de corrente elétrica normalizada.</i>	26
<i>Figura 16 – Espectro total de vibração mecânica do compressor.</i>	26
<i>Figura 17 – Valores de <math>f_{m2}</math> e <math>f_2</math> em um compressor com duas barras quebradas a <math>180^\circ</math>.</i>	27
<i>Figura 18 – Valores de frequências laterais de um compressor com barras a <math>180^\circ</math>.</i>	29
<i>Figura 19 – Cálculo da frequência de rotação mecânica – 2º Harmônico.</i>	31
<i>Figura 20 – Implementação das equações das frequências laterais - corrente.</i>	31
<i>Figura 21 - Implementação das equações das frequências laterais - vibração.</i>	33
<i>Figura 22 – Exemplo de seleção de intervalo de procura.</i>	34
<i>Figura 23 – PSD da Corrente de um compressor sem barras quebradas.</i>	37
<i>Figura 24 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas a <math>90^\circ</math>.</i>	38
<i>Figura 25 – PSD da Corrente de um compressor com uma barra quebrada.</i>	38
<i>Figura 26 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas a <math>180^\circ</math>.</i>	39
<i>Figura 27 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas adjacentes (<math>13,3^\circ</math>).</i>	39
<i>Figura 28 – PSD da Corrente de um compressor com quatro barras quebradas adjacentes.</i>	40
<i>Figura 29 – PSD da Corrente de um compressor com cinco barras quebradas adjacentes.</i>	40
<i>Figura 30 – Gráfico da amplitude PSD de corrente da banda esquerda.</i>	41
<i>Figura 31 – Gráfico da amplitude PSD de corrente da banda direita.</i>	41
<i>Figura 32 – PSD da Vibração de um compressor sem barras quebradas.</i>	43
<i>Figura 33 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas a <math>90^\circ</math>.</i>	44
<i>Figura 34 - PSD da Vibração de um compressor com uma barra quebrada.</i>	44
<i>Figura 35 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas a <math>180^\circ</math>.</i>	45

<i>Figura 36 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas adjacentes (13,3º).</i>	45
<i>Figura 37 – PSD da Vibração de um compressor com quatro barras quebradas adjacentes.</i>	46
<i>Figura 38 – PSD da Vibração de um compressor com cinco barras quebradas adjacentes.</i>	46
<i>Figura 39 – Gráfico de amplitude PSD da vibração da banda esquerda.</i>	47
<i>Figura 40 – Gráfico de amplitude PSD da Vibração da banda direita.</i>	48
<i>Figura 41 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada.</i>	49
<i>Figura 42 – PSD do sinal original e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada (região de 116 a 122 Hz).</i>	50
<i>Figura 43 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com quatro barras quebradas.</i>	51
<i>Figura 44 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da decimação de 50 amostras (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada.</i>	51
<i>Figura 45 - Modelo de um neurônio artificial proposto por McCulloch-Pitts [19].</i>	53
<i>Figura 46 - Funções de ativação [20].</i>	54
<i>Figura 47 – Exemplo de uma rede neural tipo Feedforward.</i>	55
<i>Figura 48 – QuikNET - Software usado na análise por redes neurais.</i>	56
<i>Figura 49 – Representação das entradas e saídas da rede neural para o caso 1.</i>	58

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Relação das amostras avaliadas.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2 – Comparação das frequências laterais calculadas e medidas.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3 – Caso 1 – número de interações para atingir um erro de 2%.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 4 – Resultados para o caso 1 com três camadas. ....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5 – Número de interações para o caso 2. ....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 6 – Número de interações para o caso 3. ....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 7 – Número de interações para o caso 4. ....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 8 – Avaliação de erros para cada caso. ....</i>	<i>62</i>

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

$f_l$       Frequência da rede elétrica.

$s$           Escorregamento do motor

$f_{sincro}$       Frequência síncrona do motor.

$f_m$           Frequência de rotação mecânica do motor.

$p$           Número de pólos do motor.

$T$           Duração da amostra de aquisição de dados.

$f_2$           Frequência resultante da interação estator x rotor.

$f_{m2}$         Segundo harmônico da frequência de rotação mecânica do motor.

$f_{Lateral}$       Frequências laterais resultantes da barras quebradas.

**Freq.** – Frequências.

**Squirrel Cage** - Gaiola de esquilo (rotor).

**MCSA** – Motor-Current Signature Analysis - Análise da assinatura da corrente do motor.

**FFT** - Fast Fourier Transform - Transformada Rápida de Fourier.

**Piezo-film** - Sensor filme piezelétrico.

**PSD** – Power Spectral Density – Densidade Espectral de Potência.

**SFDR** - Spurious-Free Dynamic Range - Faixa Dinâmica Livre de Impurezas.

## RESUMO

A garantia da qualidade e a eficiência em motores elétricos são essenciais num mundo onde cada vez mais tenta-se evitar o desperdício de recursos. Motores elétricos do tipo gaiola de esquilo são equipamentos baratos e muito difundidos em ambientes industriais, comerciais e residenciais. Estes motores podem apresentar alguns defeitos ainda no processo de fabricação, mas que pode se manifestar somente algum tempo depois de seu uso. Métodos de procura de defeitos não-invasivos são cada vez mais pesquisados, pois permitem uma análise rápida sem alteração significativa do produto. Este trabalho propõe a utilização de aquisição de dados de vibrações mecânicas e de corrente elétrica como base para a análise de defeitos de barras quebradas em sistemas fechados como motores lacrados e compressores de refrigeração. Este método combina o melhor dos dois métodos, ou seja, a sensibilidade da corrente elétrica com os dados de rotação e escorregamento provenientes dos dados de vibração mecânica. Neste trabalho foram utilizadas várias amostras com diferentes posições de barras quebradas, diversificando o universo estudado. A posição das barras quebradas pode influenciar na sua detecção, sendo no caso de  $90^\circ$  o mais crítico. Um estudo adicional foi feito usando redes neurais como um método para detecção das barras quebradas de difícil detecção. Os resultados deste trabalho mostram que o método desenvolvido é eficaz na maioria dos casos de barras quebradas em motores elétricos onde existe dificuldade de acesso ao eixo do motor.

# 1 INTRODUÇÃO

Motores de indução estão presentes na vida cotidiana seja em ambientes industriais, comerciais ou residenciais. Desenvolvido por Nikola Tesla em 1888 nos Estados Unidos, este tipo de motor rapidamente substituiu sistemas mecânicos de baixa eficiência. Os motores de indução de gaiola de esquilo são baratos, de construção fácil e confiável, se comparáveis com outros tipos de motores como os de corrente contínua ou com motores síncronos.

Os motores de indução trifásicos são amplamente utilizados na indústria e os motores de indução monofásicos são mais utilizados em ambientes residenciais ou onde não existe rede trifásica disponível. Os motores de indução monofásicos não possuem um campo girante como os motores trifásicos, mas sim um campo magnético pulsante. Isto dificulta a partida do mesmo, pois no rotor se induzem campos magnéticos alinhados com o campo do estator. Para fazer a partida do motor utiliza-se uma bobina auxiliar que cria um campo defasado “virtual” que forma um campo girante necessário para o arranque.

Devido à imensa quantidade de aplicações em atividades humanas, o estudo do comportamento e a melhoria da qualidade de motores de indução são fundamentais a fim de se evitar quebras ou avarias dos sistemas aos quais estes estão associados. Este trabalho está concentrado na avaliação de barras quebradas de motores de indução monofásicos que são componentes de compressores herméticos usados em refrigeração. Devido à sua natureza construtiva, os defeitos em compressores herméticos não são facilmente detectados. A forma de avaliação dos defeitos nestes equipamentos é fundamental, pois seu diagnóstico pode ser difícil e caro em equipamentos já em funcionamento.

## 1.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE PADRÕES

Nos últimos anos a análise de padrões adquiriu um novo impulso, basicamente devido ao avanço da computação e eletrônica como ferramentas de apoio para a melhoria da qualidade de produtos manufaturados. A análise de sinais dinâmicos usando o computador como ferramenta, evoluiu com a disseminação do uso de hardware específico, como placas de aquisição de dados, transdutores e condicionadores de sinais [1].

A evolução da eletrônica e da informática permitiu, a partir dos anos 90, a utilização da chamada instrumentação virtual, onde o instrumento padrão e clássico dá lugar a um instrumento mais versátil. O antigo instrumento foi substituído por placas de aquisição inseridas em um computador e por um software de controle. A versatilidade deste conjunto permite uma análise mais profunda dos dados coletados através do desenvolvimento de ferramentas específicas feitas em software, além do fato de permitir a integração de outros sistemas computacionais.

Até bem pouco tempo atrás a análise dos valores obtidos em um sistema de aquisição de sinais dinâmicos era feita utilizando sistemas especialistas, baseados no conhecimento e na experiência adquiridos por pessoas encarregadas em definir limites de aprovação e reprovação das amostras testadas [2]. Este tipo de análise ainda é muito utilizado, mas apresenta o inconveniente de que toda base de conhecimento está diretamente relacionada com experiências e vivências de pessoas. Além disso, o desenvolvimento de novos algoritmos e melhorias nas ferramentas de análise que utilizam redes neurais e outras técnicas de inteligência artificial permitiu uma divulgação maior deste método fora dos meios acadêmicos e dos departamentos de pesquisa e desenvolvimento de empresas [2].

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A necessidade de melhoria contínua em processos produtivos, o controle de qualidade na fabricação de produtos e a confiabilidade nas medições e avaliações em linhas de produção são grandes motivadores para a realização deste trabalho. Um dos grandes problemas encontrados é como avaliar a imensa quantidade de informações disponíveis em sistemas de aquisição de dados, principalmente em análise de sistemas dinâmicos, incluído ai análise de ruído, vibração e sinais elétricos.

Na saída de um sistema dinâmico têm-se dados relativos a sinais captados de diversos transdutores, sejam eles sinais elétricos ou mecânicos. Os sinais elétricos de uma máquina rotativa incluem valores temporais de tensão e corrente, que depois de armazenados podem ser utilizados para obter-se a assinatura espectral da amostra. Já os sinais mecânicos lidam com pressões, ruídos e vibrações captadas através de transdutores *piezo-eletricos* de resposta rápida.

Esse trabalho tem como objetivo fazer uma análise do conjunto de informações obtidas através desta coleta de dados em amostras selecionadas com defeito de barras quebrada a fim de detectar falhas em compressores. A idéia básica é avaliar o desempenho dos métodos de reconhecimento de defeitos em barras quebradas, utilizando dados reais de compressores herméticos. Existem vários métodos para avaliação de padrões de defeitos, basicamente são sistemas especialistas, desenvolvidos para casos específicos e pouco flexíveis. Mas nada impede que este sistema funcione em outras aplicações de motores elétricos.

### **1.3 ANÁLISE DA ASSINATURA ESPECTRAL**

A análise do espectro de frequência pode-se tornar uma ferramenta de extrema importância em um sistema dinâmico. Esta análise pode ser muito rica de informações, permitindo uma avaliação bastante elaborada. Na aplicação específica de barras quebradas, a análise espectral de frequência de corrente, ruído e vibração é importante, pois através delas é possível se obter dados das condições do rotor. Sistemas não-invasivos são preferenciais a sistemas invasivos, devido à facilidade de medição.

O trabalho proposto foi limitado à avaliação da assinatura espectral de frequência dos sinais de corrente e vibração do compressor. O sinal de ruído sonoro apesar de importante não foi medido devido a uma dificuldade especial com relação ao isolamento do sistema em relação ao ruído externo, muitas vezes de valor elevado em ambientes industriais. A análise de barras quebradas pode apresentar dificuldades quando tem-se como produto motores lacrados ou compressor herméticos. Estes produtos não permitem acesso direto a seus eixos e componentes internos. Este trabalho busca uma solução para este problema, utilizando uma combinação de análise do espectro de vibração e de corrente.

### **1.4 ESTRUTURA**

No capítulo 2 são explicadas as principais características que motores com barras quebradas apresentam e é feita uma revisão dos principais trabalhos relacionados à análise e reconhecimento destas falhas. No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada. O capítulo 4 descreve os resultados experimentais da aplicação do método criado. No capítulo 5 foi usado o método de redes neurais como alternativa para o reconhecimento de padrões dos defeitos mais difíceis de serem detectados. Finalmente no capítulo 6 são apresentados os comentários conclusivos.

## 2 CARACTERÍSTICAS DE MOTORES COM BARRAS QUEBRADAS

Existem inúmeros artigos e trabalhos a respeito de falhas existentes em motores elétricos [1] [3][4][5][6][7][8][9][10][11]. Nestes artigos e trabalhos, são citados vários métodos de análise e reconhecimento destas falhas. Métodos não invasivos e não destrutivos são os métodos mais desenvolvidos e utilizados justamente pela questão econômica [8]. Dentre as falhas conhecidas em motores de indução, as que mais ocorrem são: defeitos em mancais e rolamentos, falhas no estator e falhas no rotor. Na Figura 1 tem-se a distribuição de falhas em motores de indução trifásicos [12].

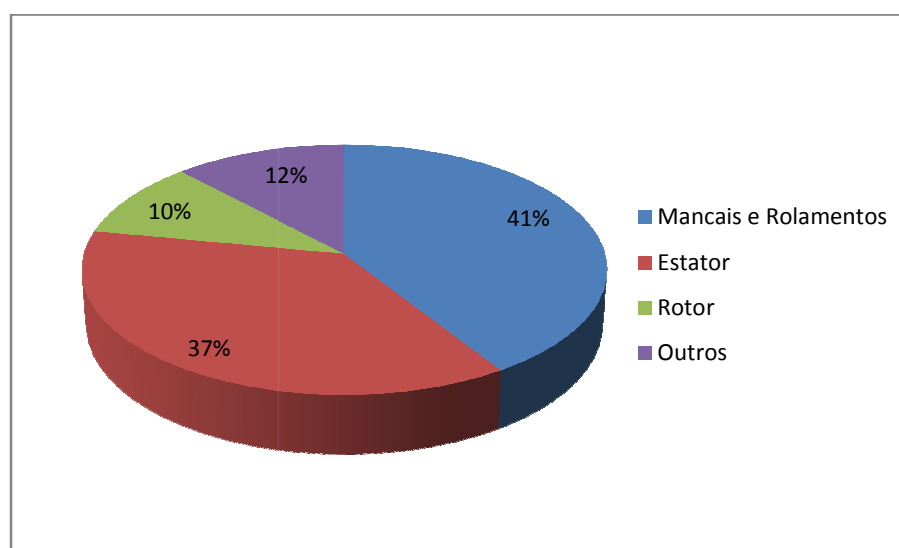


Figura 1 – Falhas em motores de indução [12].

Nota-se que as falhas em barras quebradas representam 10% do total de falhas em motores de indução. Apesar de ter um número baixo no índice de falhas, as barras quebradas e sua forma de detecção são menos conhecidas que os demais problemas relacionados a motores.

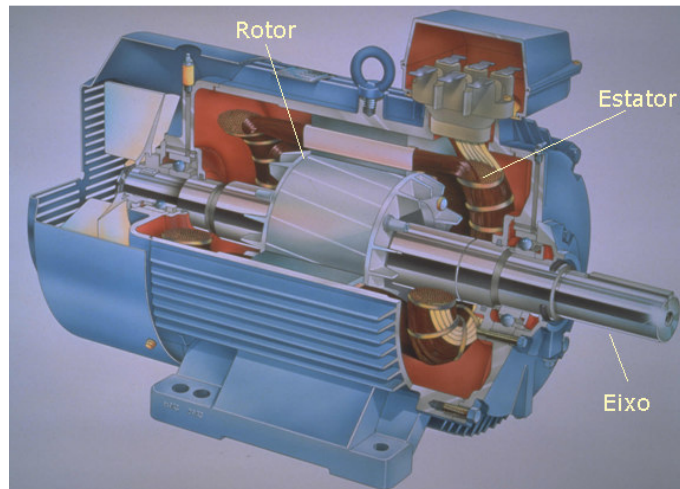


Figura 2 – Estrutura interna de um motor de indução [13].

Um motor elétrico de indução é basicamente composto de um estator, de um rotor e um eixo. Neste rotor, o eixo transmite o movimento ao exterior. Para potências de até 500CV o rotor mais usado é do tipo gaiola de esquilo ou *squirrel cage* na qual não existe contato elétrico entre este rotor e o exterior (Figura 2). Esta característica garante uma enorme vantagem em relação ao sistema bobinado, pois além de não existir contato elétrico, o sistema é muito robusto, confiável e de baixo custo. O rotor do tipo gaiola de esquilo é constituído de um conjunto de barras curto-circuitadas, feitas de um material condutor e cujo interior é formado por lâminas de aço silício. O material condutor das barras é usualmente o alumínio, mas pode também ser feito de cobre ou liga de cobre. O cobre é pouco usado devido o seu alto custo, mas em alguns casos onde se necessita de um alto torque de partida, ele é mais indicado. O uso do cobre em barras reduz as perdas em até 20% no motor, além de reduzir o aquecimento. A utilização de alumínio para a construção das gaiolas de esquilo está relacionada à facilidade do projeto, redução da inércia e baixo custo de produção em alta escala. O alumínio tem ponto de fusão inferior ao do cobre, facilitando a confecção dos moldes.

Na Figura 3 pode-se observar um exemplo de barras quebradas ou barras mal formadas durante o processo de injeção de alumínio. Neste caso o rotor está comprometido para uso.

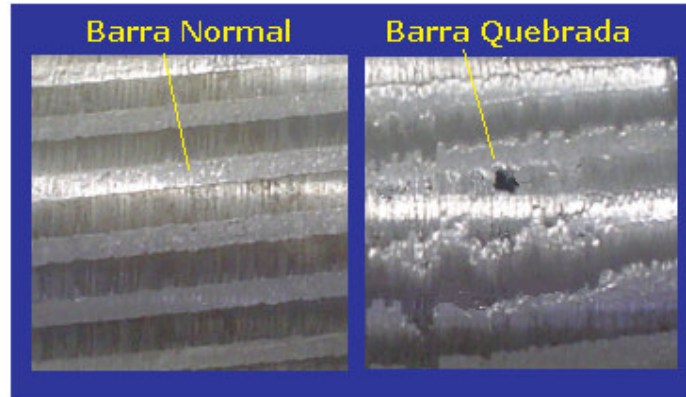


Figura 3 – Comparação entre barras quebradas e barras normais de um rotor.

Um bom indicador de barras quebradas em um rotor é excessiva vibração, ruídos e faiscamento durante a partida do motor. Infelizmente estas características também estão presentes em outros defeitos de motores, dificultando a detecção correta do problema. Foram desenvolvidas algumas técnicas na detecção de barras quebradas a partir dos anos 80, a grande maioria delas é baseada na MCSA ou análise da assinatura da corrente do motor [8]. Com a evolução dos sistemas de aquisição de dados, iniciou-se a aplicação da análise de vibração mecânica e ruído sonoro na detecção de barras quebradas [10]. Existem também outros métodos conhecidos, como por exemplo, a análise do fluxo de corrente no estator [11].

A detecção de barras quebradas em motores de indução baseia-se na monitoração do espectro de frequência e na detecção de anormalidades em determinadas frequências. O espectro de corrente elétrica e de vibração mecânica com barras quebradas é diferente do espectro de motores normais. O valor destas frequências anormais vai depender do escorregamento do motor. Em alguns casos, esta análise pode ser influenciada pela variação do torque durante a aquisição de dados. Para evitar problemas deve-se manter o torque constante durante os testes [14].

## 2.1 BARRAS QUEBRADAS - ANÁLISE POR CORRENTE ELÉTRICA

Os vários estudos relacionados à detecção de barras quebradas utilizam as componentes de bandas laterais de frequências como referência. Segundo [8], a equação que define estas frequências no caso da análise de corrente elétrica é:

$$f_{Lateral} = (1 \pm 2s)f_l \quad (1)$$

Onde

$f_l$  é a frequência da rede elétrica.

$s$  é o escorregamento do motor

$f_{Lateral}$  são as frequências laterais resultantes da barras quebradas.

O escorregamento é definido como sendo a velocidade mecânica relativa à velocidade síncrona do motor:

$$s = \frac{f_{sincro} - f_m}{f_{sincro}} \quad (2)$$

Onde:

$s$  é o escorregamento do motor.

$f_{sincro}$  é a frequência síncrona do motor.

$f_m$  é a frequência de rotação mecânica do motor.

A velocidade síncrona do motor está relacionada com a frequência da rede  $f_l$ , através do número de pólos do motor:

$$f_{sincro} = \frac{2f_l}{p} \quad (3)$$

Onde:

$f_l$  é a frequência da rede.

$p$  é o número de pólos do motor.

As barras quebradas produzem outras frequências e podem ser determinadas pela fórmula:

$$f_{Lateral} = (1 \pm 2ks)f_l \quad \text{onde } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

Onde

$f_l$  é a frequência da rede elétrica.

$s$  é o escorregamento do motor

$f_{Lateral}$  são as frequências laterais resultantes das barras quebradas.

$n$  é um inteiro maior que zero.

A Figura 4 mostra as componentes de frequências específicas no caso de barras quebradas dado pela equação (4) para os casos de  $k=1$  e 2. Nota-se que as amplitudes vão caindo conforme as bandas laterais resultantes de barras quebradas afastam-se da fundamental (equação 4). As amplitudes mostradas na Figura 4 são apenas ilustrativas. Desta forma, entende-se que as melhores frequências a serem analisadas são as frequências mais próximas a fundamental. Neste estudo utilizaram-se somente as frequências localizadas em  $(1 \pm 2s)f_l$ , as mais próximas da fundamental, com amplitudes maiores e facilmente distinguíveis de ruídos e interferências.

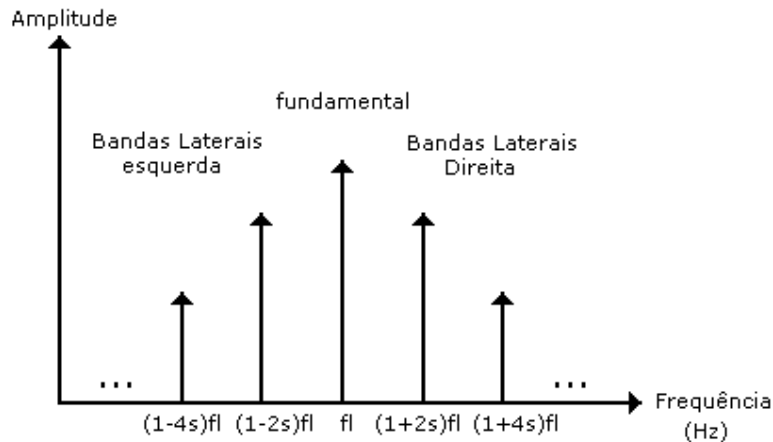


Figura 4 – Caracterização do espectro na região da freqüência fundamental.

Outra caracterização importante a ser feita é a determinação do intervalo de procura das freqüências de banda laterais. Esta informação é importante tendo em vista que podem existir outras freqüências geradas por problemas mecânicos próximos as freqüências geradas por barras quebradas.

A decomposição de um sinal temporal em uma representação espectral apresenta algumas características que devem ser consideradas. A utilização de uma FFT produz um espectro discreto composto de pontos, ou seja, estes pontos que compõem o espectro estão separados por uma distância  $\Delta f$  que é a resolução em freqüência e é determinado pelo inverso do período de amostragem  $\Delta f = 1/T$ .

Assim uma componente de freqüência  $f_0$  localizado no espectro pode estar dentro do intervalo  $f_0 \pm \frac{\Delta f}{2}$  [10]. Por exemplo, se o período de aquisição de um sinal é de 10 segundos, o valor de  $\Delta f$  ou a resolução deste sinal é 0,1 Hz. Desta forma tem-se um espectro gerado com pontos distanciados a cada 0,1 Hz e conseqüentemente um ponto indicando 60 Hz no gráfico, pode na verdade na região entre  $60 \pm 0,05$  Hz.

Para achar o intervalo onde se encontram as frequências laterais deve-se substituir (2) em (1) e considerar o intervalo de frequências devido à resolução da FFT:

$$f_{Lateral} = \left( 1 \pm 2 \left( \frac{f_{sincro} - f_m}{f_{sincro}} \right) \right) f_{sincro} \quad (5)$$

Onde:

$f_{Lateral}$  são as frequências laterais resultantes da barras quebradas.

$f_{sincro}$  é a frequência síncrona do motor.

$f_m$  é a frequência de rotação mecânica do motor.

Nos casos específicos das frequências laterais esquerda e direita tem-se:

$$f_{Lateral\ esq.} = (1 - 2s)f_l \quad (6)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = (1 + 2s)f_l \quad (7)$$

Substituindo a equação do escorregamento (2) em (6) e (7):

$$f_{Lateral\ esq.} = 2 * f_m - f_l \quad (8)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = 3 * f_l - 2 * f_m \quad (9)$$

Considerando que o erro possível para  $f_l$  e  $f_m$  é  $\pm \frac{\Delta f}{2}$  então as equações que definem os intervalos de frequências são:

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = 2 * \Delta f_m - \Delta f_l \quad (10)$$

$$\Delta f_{Lateral\ dir.} = 3 * \Delta f_l - 2 * \Delta f_m \quad (11)$$

Seja  $\Delta f_m = \Delta f_l = \pm \frac{\Delta f}{2}$

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = 2 * \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) - \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) \quad (12)$$

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = \pm \frac{3}{2} \Delta f \quad (13)$$

e

$$\Delta f_{Lateral\ dir.} = 3 * \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) - 2 * \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) \quad (14)$$

$$\Delta f_{Lateral\ dir.} = \pm \frac{5}{2} \Delta f \quad (15)$$

Conclui-se que as componentes de freqüência resultantes de barras quebradas deverão estar dentro dos intervalos  $f_{Lateral\ esq.} \pm \frac{3}{2} \Delta f$  e  $f_{Lateral\ dir.} \pm \frac{5}{2} \Delta f$ . Conhecendo o valor do tempo de amostragem (e seu inverso  $\Delta f$ ), calculam-se os intervalos de procura com as equações acima. Os valores dos intervalos foram inseridos no software desenvolvido, para cálculo dos valores de freqüência resultantes de barras quebradas.

## 2.2 BARRAS QUEBRADAS - ANÁLISE POR VIBRAÇÃO MECÂNICA

A análise de barras quebradas usando vibração mecânica segue o mesmo princípio da análise da corrente elétrica, diferindo apenas da localização das frequências geradas por barras quebradas. No caso da detecção de barras quebradas usando corrente elétrica, a velocidade mecânica do motor deve ser medida, pois este valor será usado na equação de cálculo do escorregamento (2). Isto pode ser um problema principalmente quando não se tem acesso ao eixo de rotação do motor, como no caso de um sistema lacrado ou um compressor hermético. Ao se utilizar a vibração mecânica em um motor elétrico, obtém-se o valor do escorregamento indiretamente através do seu espectro de frequência. No caso de barras quebradas, a resultante está relacionada com a frequência de rotação  $sf_i$ . A interação entre o campo produzido pelo estator com o campo do rotor produz torque e velocidades oscilantes. A frequência destas oscilações pode ser vista em  $2sf_i$  [7]. Considerando que a frequência da tensão e da corrente do estator é  $f_i$  e a frequência da corrente magnetizada no rotor também é  $f_i$ , o fluxo resultante desta interação produz uma frequência que é o dobro da frequência da rede, ou  $2 * f_i$  [6].

Pode-se achar o valor do escorregamento utilizando a vibração mecânica com a seguinte equação:

$$s = \frac{f_2 - f_{m2}}{f_2} \quad (16)$$

Onde:

$f_2$  é a frequência resultante da interação estator rotor, ou  $2 * f_i$ ;

$s$  é o escorregamento;

$f_{m2}$  é o segundo harmônico da frequência de rotação mecânica do motor;

Com  $f_{m2}$  que é possível achar o valor da frequência mecânica  $f_m$  com mais precisão. Neste caso o valor  $f_{m2}$  fica bem próximo a frequência  $f_2$ . Os valores das frequências laterais de vibração mecânica seguem o mesmo modelo das frequências laterais de corrente elétrica [15], mudando apenas a fundamental na equação:

$$f_{Lateral\ esq.} = f_m - 2sf_l \quad (17)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = f_m + 2sf_l \quad (18)$$

Onde:

$f_l$  é a frequência da rede;

$s$  é o escorregamento;

$f_m$  é a frequência de rotação mecânica do motor.

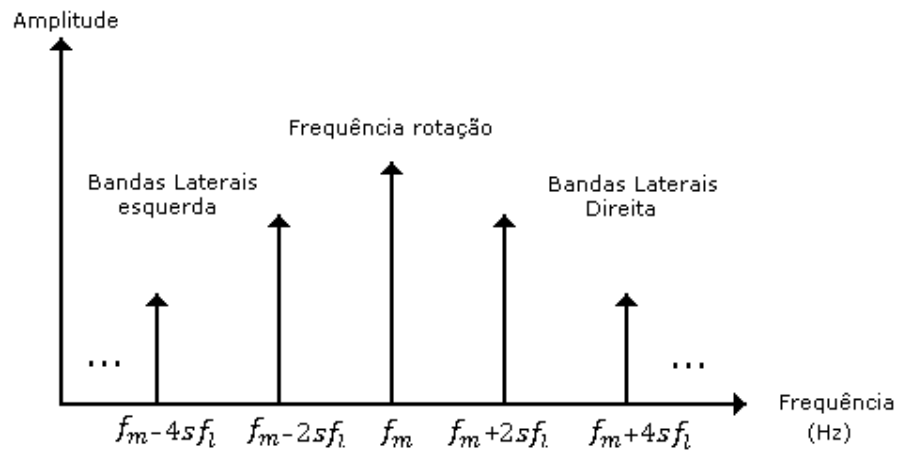


Figura 5 – Caracterização do espectro de vibração na região da frequência de rotação.

A Figura 5 mostra as componentes de frequências geradas por barras quebradas adquiridas através de vibração mecânica. Calculando-se o erro possível devido à resolução para as equações (17) e (18):

$$f_{Lateral\ esq.} = f_m - 2f_l \left( \frac{f_2 - f_{m2}}{f_2} \right) \quad (19)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = f_m + 2f_l \left( \frac{f_2 - f_{m2}}{f_2} \right) \quad (20)$$

Onde

$f_{Lateral}$  são as frequências laterais resultantes das barras quebradas.

$f_2$  é a frequência resultante da interação estator rotor, ou  $2 * f_l$ ;

$f_{m2}$  é o segundo harmônico da frequência de rotação mecânica do motor;

$f_m$  é a frequência de rotação mecânica do motor;

$f_l$  é a frequência da rede.

Simplificando as equações (19) e (20):

$$f_{Lateral\ esq.} = f_m - f_2 + f_{m2} \quad (21)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = f_m + f_2 - f_{m2} \quad (22)$$

Seja  $\Delta f_2 = \Delta f_{m2} = \Delta f_m = \pm \frac{\Delta f}{2}$

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) - \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) + \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) \quad (23)$$

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = \pm \frac{3}{2} \Delta f \quad (24)$$

$$\Delta f_{Lateral\ dir.} = \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) + \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) - \left( \pm \frac{\Delta f}{2} \right) \quad (25)$$

$$\Delta f_{Lateral\ dir.} = \pm \frac{3}{2} \Delta f \quad (26)$$

As componentes de frequência resultantes de barras quebradas para o caso de vibração deverão estar dentro dos intervalos  $f_{Lateral\ esq.} \pm \frac{3}{2} \Delta f$  e  $f_{Lateral\ dir.} \pm \frac{3}{2} \Delta f$ . O valor  $\Delta f$  é o inverso do valor do tempo de amostragem.

## 2.3 APLICAÇÃO DE CORRENTE E VIBRAÇÃO NA DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS

Vários métodos de detecção de barras quebradas utilizam a MCSA como forma de análise. Alguns trabalhos propõem utilizar métodos similares ao MCSA, mas utilizando ruído ou vibração como dados para a análise. Todos buscam por técnicas não invasivas. Os métodos de análise se baseiam na coleta de dados, processamento de sinais, tratamento matemático e um sistema de identificação. Muitos pesquisadores já sugeriram este tipo de abordagem desde os anos 80, utilizando a análise da corrente, ruído, vibração, densidade do fluxo magnético ou sistemas híbridos [4][5][6][7][8][9][10][11][16].

A detecção de barras quebradas usando corrente elétrica é em geral mais sensível que outros métodos, como vibração mecânica e ruído acústico [9]. Analisando a corrente elétrica de motores com barras quebradas no domínio da frequência (espectro de frequência), significativas diferenças são notadas nas bandas laterais ao redor da fundamental. No caso da análise com vibrações, as diferenças também são notadas, mas existe uma variedade de vibrações secundárias relacionadas à rotação do eixo e rotor. Já a análise acústica é muito prejudicada por ruídos externos e interferências [9].

A proposta deste trabalho é fazer a análise de barras quebradas usando os métodos de corrente elétrica e vibração mecânica juntos. Apesar de que a análise de barras quebradas possa ser feita com apenas um dos métodos citados, no caso da análise com corrente elétrica não é sabido o valor do escorregamento, pois o mesmo pode variar com a carga e com o próprio defeito de barras quebradas. Sem a informação do escorregamento, não é possível fazer um correto diagnóstico do defeito. A forma usual para medir o escorregamento é através de um tacômetro acessando diretamente o eixo de rotação do motor. Em casos de sistemas com motores lacrados ou compressores herméticos fica impossível ter acesso a este parâmetro. As informações do fabricante pouco podem ajudar neste caso, pois o escorregamento varia com a carga (torque), e como, já citado o próprio defeito de barras quebradas pode influenciar no valor do escorregamento.

A solução para este caso é utilizar os dados do espectro de frequência de vibração do motor e adquirir estes valores indiretamente [15]. Da combinação da análise da corrente e da vibração, tem-se um método prático para a análise de barras quebradas em motores lacrados e compressores herméticos. Na Figura 6 tem-se o fluxograma do método proposto para detecção de barras quebradas usando como referência a vibração mecânica do motor. O processo é basicamente uma análise espectral da vibração mecânica do motor, onde são medidas as frequências  $f_2$  e  $f_{m2}$ . Estes valores irão compor o valor do escorregamento usado para o cálculo das bandas laterais de frequência de vibração (equação 16).

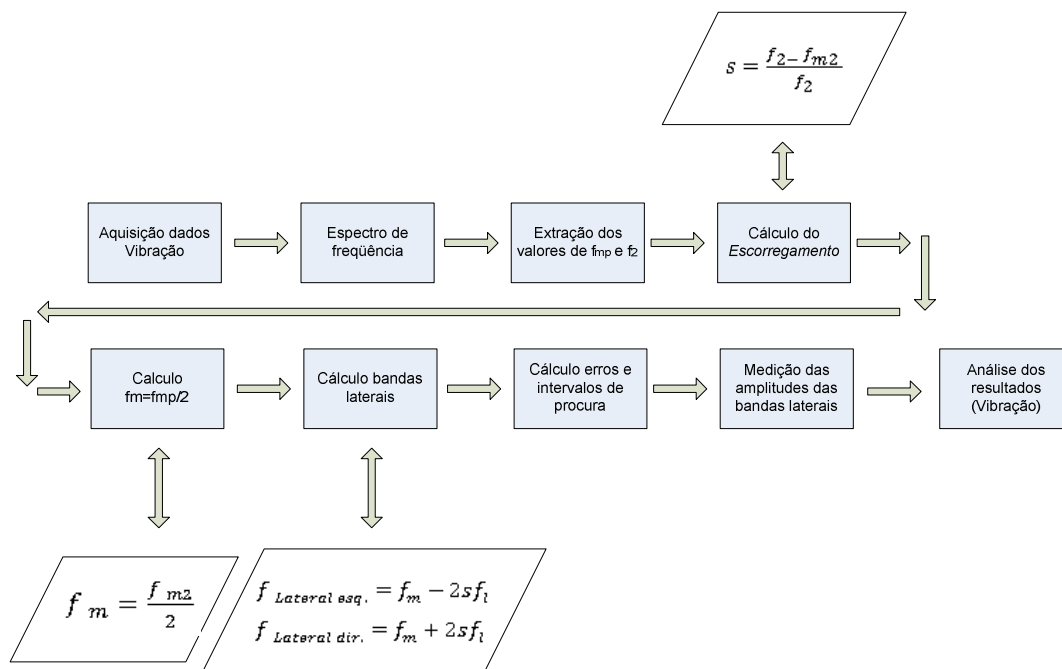


Figura 6 – Fluxograma para diagnóstico de barras quebradas usando vibrações.

Os dados de escorregamento serão aproveitados para o cálculo das bandas laterais do espectro de corrente elétrica, mostrado na Figura 7.

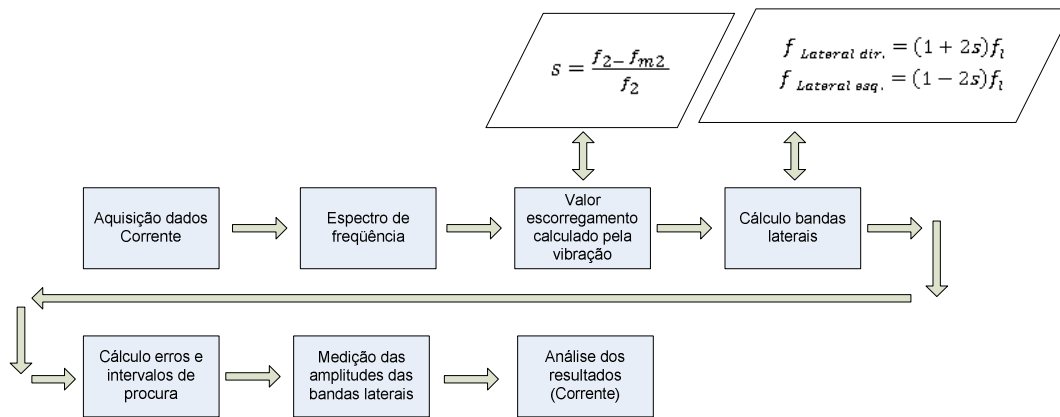


Figura 7 – Fluxograma para diagnóstico de barras quebradas usando corrente.

O método proposto acima combina a medição indireta do escorregamento do motor através da vibração mecânica e a melhor sensibilidade da análise dos sinais através dos sinais de corrente elétrica. Este método foi implementado em um software de aquisição de dados, especificamente para calcular de forma automática as frequências de barras quebradas e exibi-las ao usuário.

### **3 APLICAÇÃO DO MÉTODO**

O método proposto no capítulo anterior foi aplicado na detecção de barras quebradas em amostras de compressores herméticos. Um software foi criado para a aplicação deste método. Neste trabalho utilizou-se uma variedade de amostras com barras quebradas coletadas a partir de compressores herméticos, de um mesmo modelo com as mesmas características mecânicas e elétricas. Os defeitos foram provocados em compressores bons através da perfuração das barras desejadas. Um sistema de ensaios (bancada) foi desenvolvido a fim de coletar os dados de corrente e vibração. Este sistema é baseado em transdutores e placas de aquisição de dados, largamente utilizados em medições e testes de laboratório.

#### **3.1 SISTEMA DE ENSAIO E AMOSTRAS**

Em um trabalho de avaliação de um defeito específico é extremamente importante verificar e garantir a qualidade dos produtos que serão analisados. Isto é, o produto não poderá conter outros defeitos além daquele esperado, senão todo o trabalho de avaliação estará comprometido.

Para este trabalho foi escolhido um compressor bastante comum no mercado e que possui as seguintes características:

- Tensão de trabalho: 115 Volts
- Monofásico, 60 Hz;
- Potência: 180 W com carga máxima;
- Número de pólos do motor: 2;
- Número de barras no rotor: 28.

Na Figura 8 tem-se um modelo de rotor. Observam-se os canais onde o alumínio fundido fica alojado durante o processo de injeção.



Figura 8 – Barras em um rotor.

As amostras de compressores foram separadas conforme seu tipo de defeito na Tabela 1:

<b>Característica</b>	<b>Quantidade</b>
Amostra sem defeitos.	3
Amostra com uma barra quebrada.	2
Amostra com duas barras quebradas a 90°	3
Amostra com duas barras quebradas a 180°	3
Amostra com duas barras quebradas adjacentes (13.3°).	2
Amostra com quatro barras quebradas.	1
Amostra com cinco barras quebradas.	1

Tabela 1 – Relação das amostras avaliadas.

O sistema montado para fazer a coleta dos dados foi baseado em computador e em placas de aquisição de dados analógicas. Um software foi desenvolvido na linguagem *LABView* para o tratamento e pré-análise dos sinais. Na Figura 9 observa-se a bancada onde foram realizados os testes e a aquisição dos dados da amostras. Nela está o painel de força e controle, microcomputador e o produto em teste. O painel de força e controle é composto de transformador 220/115V 2000W, placa conversora de corrente, relês e conectores. A placa conversora de corrente é composta de um sensor de efeito Hall que converte corrente em tensão para ser medido pela placa de aquisição. As placas de aquisição de dados foram instaladas dentro do micro-computador e foram interligadas as placas de condicionamento de sinal através de cabos e conectores específicos.

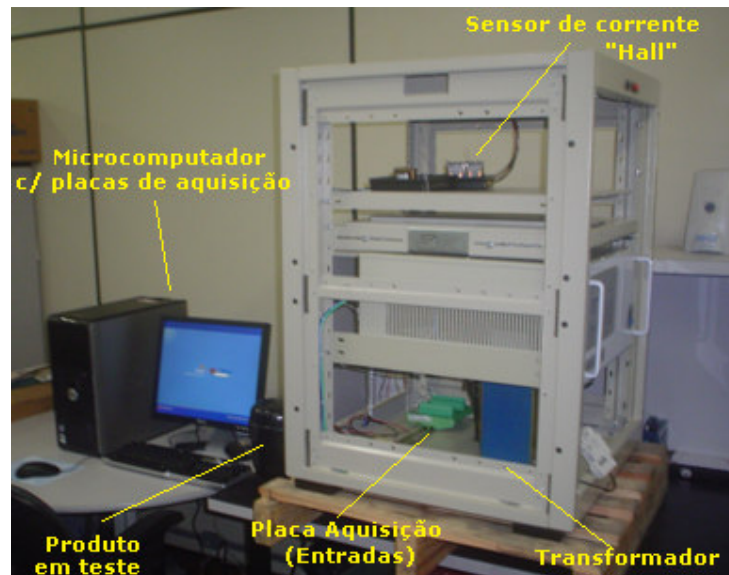


Figura 9 – Vista geral da bancada de testes de barras quebradas

O sistema de aquisição de dados foi composto de duas placas de conversores A/D da marca *National Instruments*, uma com 16-bits de entrada e 250k amostras por segundo para aquisição do sinal de corrente elétrica e outra com 102,4k amostras por segundo com 24 bits de resolução para aquisição de dados de vibração.

Na Figura 10 pode-se ver o diagrama do sistema de aquisição de dados usado na aquisição de corrente elétrica. A medição e condicionamento do sinal de corrente foram feitos por uma placa eletrônica especialmente desenvolvida para este fim. Foi usado um sensor de corrente do tipo Hall modelo LAH 25-NP da LEM com  $\pm 0,3\%$  de precisão e  $0,2\%$  de linearidade máxima. Na Figura 11 pode-se ver o detalhe da placa de conversora de corrente. Nela está o sensor de efeito Hall usado nas medições e

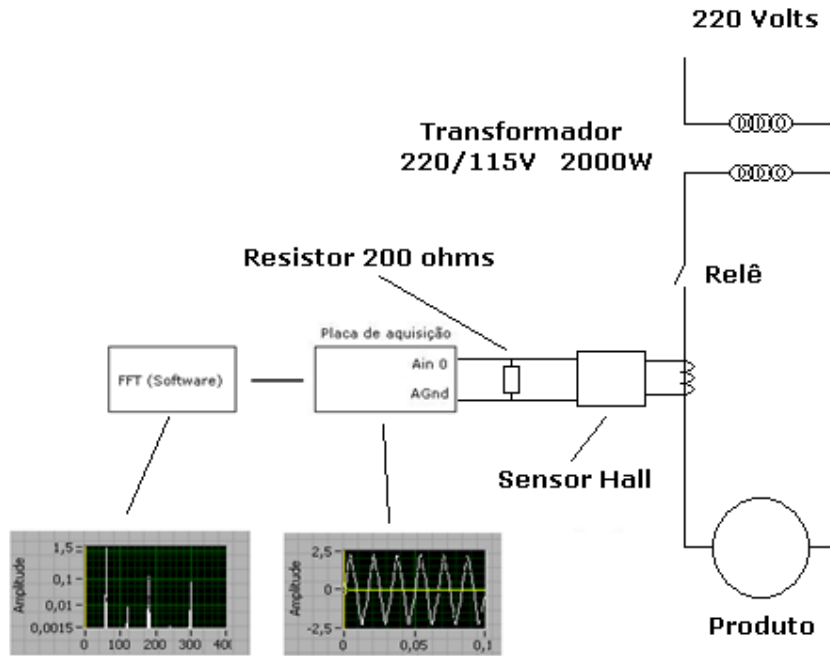


Figura 10 – Diagrama do sistema de aquisição de corrente elétrica.

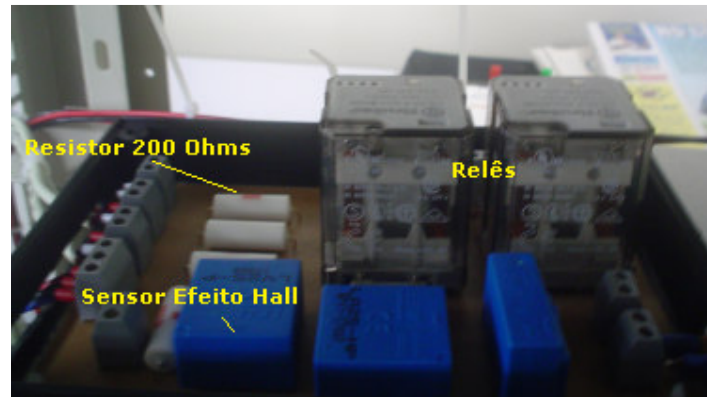


Figura 11 – Detalhe do condicionador de corrente tipo efeito "Hall".

Para a aquisição de dados de vibração mecânica foi utilizado como sensor um acelerômetro. O acelerômetro é um dispositivo que utiliza um cristal do tipo *Piezo-film* transformando movimentos em sinais elétricos. O acelerômetro utilizado neste trabalho é unidimensional, ou seja, somente captura movimentos em uma direção. O modelo usado neste trabalho é o 4397 da B&K com largura de banda de 1 e 25.000 Hz, sensibilidade de 1 mV/g e precisão de 2%. O sistema de aquisição possui *SFDR* de 130 dB para a faixa testada, o que garante uma boa relação sinal ruído. A fim de se evitar captar vibrações de partes mecânicas não desejadas que fazem parte do sistema de bombeamento do compressor, como por exemplo, a movimentação do êmbolo de compressão, das válvulas de fluxo, etc., optou-se em adquirir o sinal de vibração na posição axial em relação ao eixo do motor. Esta posição sofre menos influência de componentes internos do compressor. Segundo [9] não existe significativa alteração das características do sinal de vibração nas posições axial e radial na análise de barras quebradas. Na Figura 12 tem-se o diagrama do sistema de aquisição de vibrações mecânicas. Para a análise de corrente elétrica utilizou-se uma taxa de aquisição de 2000 amostras por segundo, que segundo Nyquist possibilita uma medição de até 1000 Hz. Com relação ao sistema de aquisição de vibrações mecânicas a taxa de aquisição usada foi de 25 kHz, o que permite uma análise de frequência até 12,5 kHz.

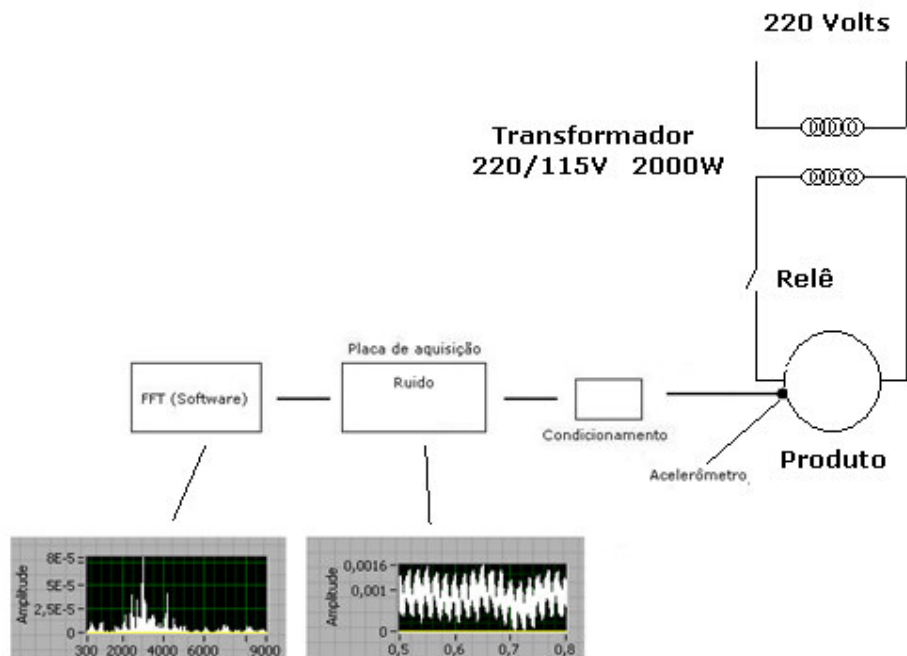


Figura 12 – Diagrama do sistema de aquisição de vibração mecânica.

### 3.2 NORMALIZAÇÃO DOS SINAIS

Para uma visualização mais efetiva foi desenvolvido um algoritmo que normaliza os sinais a 0 dB. Isto significa que o máximo valor do sinal será de 0 dB. No caso específico da análise de barras quebradas, o sinal de interesse estará próximo da frequência da rede e da frequência síncrona do motor. Estes valores podem ser os mesmos dependendo do número de pólos do motor. O software foi desenvolvido e implementado na linguagem LabView.

Este software tem as seguintes características:

- O sinal adquirido é filtrado com a intenção de se eliminar frequências indesejáveis para análise. Este filtro é um passa-banda tipo *Butterworth* de oitava ordem, com faixa de 50 a 70 Hz
- Logo em seguida é realizada análise da densidade espectral de potência do sinal adquirido ou PSD com janelamento do tipo “Hanning”;
- O valor de pico do sinal é detectado e normalizado a 0 dB;
- A região de interesse para visualização e análise é a região próxima a frequência da rede e frequência síncrona, no caso 60 Hz. Assim foram escolhidas para visualização no gráfico as frequências de 56 a 64 Hz;
- A visualização do gráfico é em escala logarítmica.

Na Figura 13 tem-se o diagrama em LabView deste software implementado.

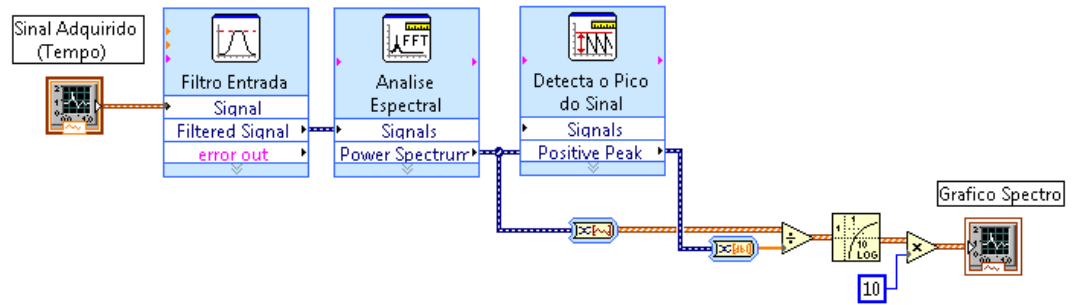


Figura 13 – Algoritmo de Normalização dos Sinais Adquiridos.

A representação matemática da normalização pode ser vista na equação:

$$\text{Espectro}(\text{sinal}) = 10 * \text{Log} \frac{\text{Sinal Adquirido}}{\max(\text{Sinal Adquirido})} \quad (27)$$

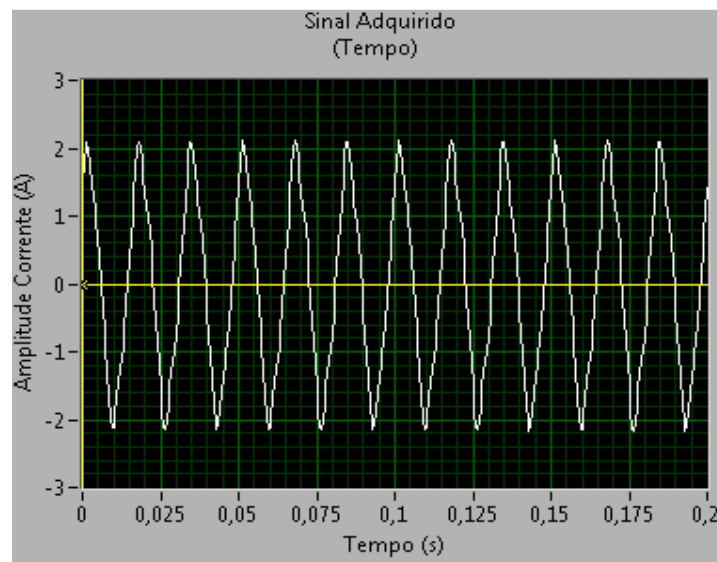


Figura 14 – Sinal de corrente adquirido.

Os sinais de corrente elétrica adquiridos antes de qualquer tratamento apresentam a aparência da Figura 14. Já o sinal do espectro medido e normalizado tem a aparência da Figura 15. Nota-se que sinal ao redor dos 60 Hz apresenta pico máximo em 0 dB, conforme comentado anteriormente.

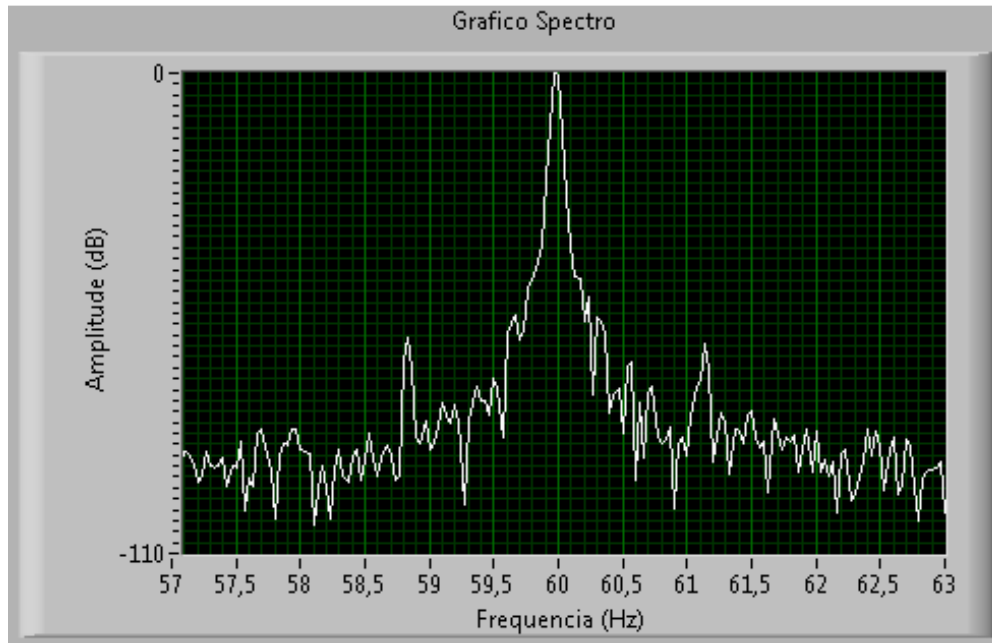


Figura 15 – Exemplo de um espectro de corrente elétrica normalizada.

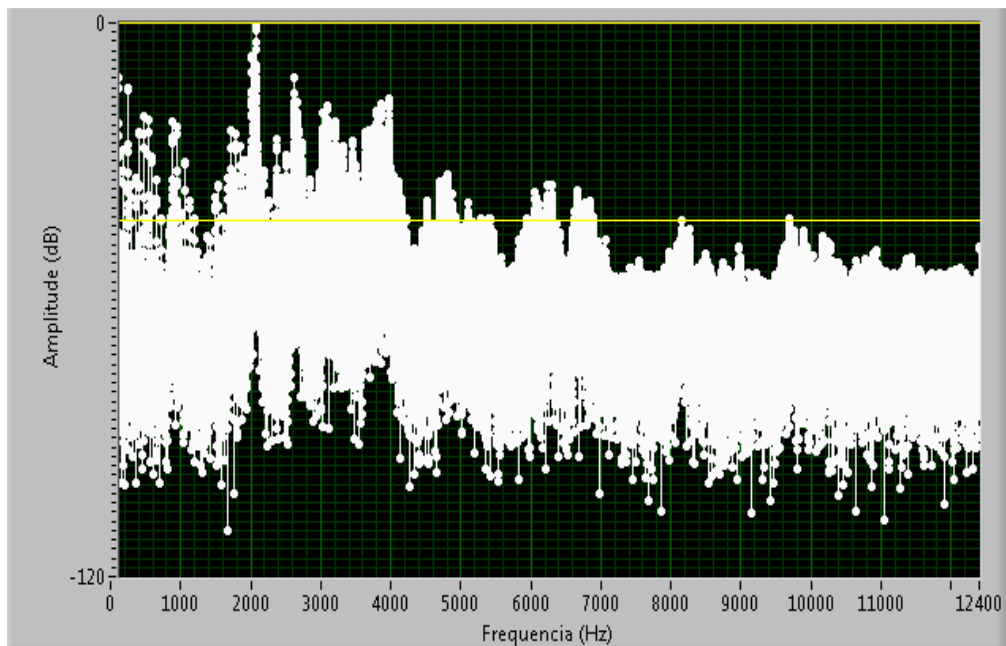


Figura 16 – Espectro total de vibração mecânica do compressor.

Na Figura 16 tem-se a PSD de vibrações mecânicas. Este gráfico é uma amostra de todo espectro até 12,4 kHz. Observa-se que para esta amostra específica, o pico fica na região de 2000 Hz.

### 3.3 CÁLCULO DAS COMPONENTES LATERAIS DE FREQUÊNCIA

Para a detecção de barras quebradas é necessário saber o valor do escorregamento do motor. Conforme visto no capítulo 2.2, este valor pode ser obtido diretamente da análise da PSD de vibração. Através da equação (16), obtêm-se o valor do escorregamento usando as frequências  $f_{m2}$  e  $f_2$ .

$$s = \frac{f_2 - f_{m2}}{f_2} \quad (28)$$

Ambos  $f_{m2}$  e  $f_2$  são obtidos através de medições na região próxima ao dobro do valor da frequência da rede, ou no caso 120 Hz.

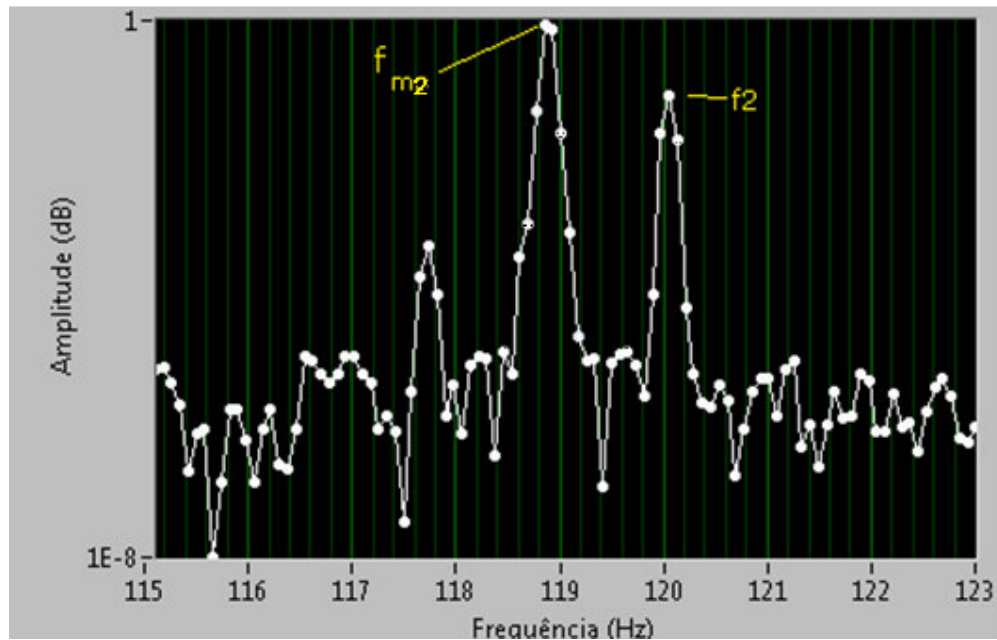


Figura 17 – Valores de  $f_{m2}$  e  $f_2$  em um compressor com duas barras quebradas a 180°.

Na Figura 17 observam-se  $f_{m2}$  e  $f_2$ . No caso, os valores das amplitudes não são importantes. Entretanto é necessário medir as frequências onde ocorrem os picos. No caso de  $f_2$ , o pico ocorre na frequência de 120 Hz, justamente no dobro da frequência da rede, como previsto na teoria [10]. O valor  $f_{m2}$  é o segundo harmônico da rotação mecânica do compressor e está na frequência de 118,85 Hz (Figura 17). Como este é o múltiplo de 2 da frequência de rotação, então a frequência de rotação ( $f_m$ ) é de 59,42 Hz.

Da equação (16) obtém-se o valor de  $s$  (escorregamento):

$$s = \frac{120-118,85}{120} = 0,0095 \quad (29)$$

A partir do valor calculado do escorregamento pode-se achar o valor das frequências geradas pelas barras quebradas. Como existem duas frequências de falhas distintas, iremos chamá-las de frequência esquerda e frequência direita.

As equações (17) e (18) definem as frequências esquerda e direita de barras quebradas. Para o nosso exemplo (caso da Figura 17) pode-se completar as equações numericamente:

$$\text{Freq}_{\text{esquerda}} = 58,28 \text{ Hz}$$

$$\text{Freq}_{\text{direita}} = 60,56 \text{ Hz}$$

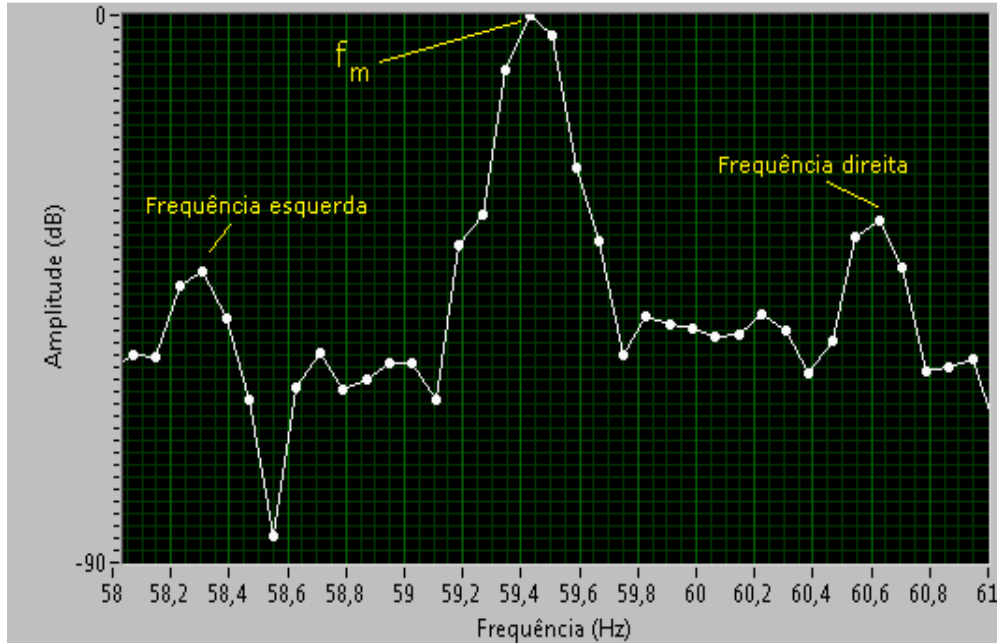


Figura 18 – Valores de frequências laterais de um compressor com barras a 180°.

Agora pode-se comparar os valores obtidos através das fórmulas (17) e (18) com os valores obtidos diretamente do gráfico da Figura 18 na região próxima de 60 Hz. Os valores são muito próximos, como se pode ver na Tabela 2. Os valores dos erros calculados na tabela são resultados das equações 24 e 26 para frequência de 0,1 Hz, ou seja, 0,15 Hz. O valor de 0,05 Hz refere-se ao erro da leitura do gráfico com resolução de 0,1 Hz.

	Calculado	Medido	Diferença
<b>Freq. Esquerda</b>	58,28 ± 0,15 Hz	58,30 ± 0,05 Hz	0,02 Hz
<b>Freq. Direita</b>	60,56 ± 0,15 Hz	60,62 ± 0,05 Hz	0,06 Hz

Tabela 2 – Comparação das frequências laterais calculadas e medidas

Pode-se simplificar os cálculos na equação (28) e considerar  $f_2$  como uma constante de 120 Hz. Nos testes realizados este valor não se alterou, pois ele é resultado da própria frequência da rede multiplicado por dois:

$$s = \frac{120 - f_{m2}}{120} \quad (30)$$

Para a implementação no software usa-se a equação (30) em (6) e (7) para o cálculo das frequências (bandas) laterais de corrente elétrica:

$$f_{Lateral\ esq.} = f_l - 2f_l \left( \frac{120 - f_{m2}}{120} \right) \quad (31)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = f_l + 2f_l \left( \frac{120 - f_{m2}}{120} \right) \quad (32)$$

Seja  $f_l$  a frequência da rede de 60 Hz:

$$f_{Lateral\ esq.} = 60 - 120 \left( \frac{120 - f_{m2}}{120} \right) \quad (33)$$

$$f_{Lateral\ esq.} = f_{m2} - 60 \quad (34)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = 60 + 120 \left( \frac{120 - f_{m2}}{120} \right) \quad (35)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = 180 - f_{m2} \quad (36)$$

O diagrama em blocos do software que procura a frequência mecânica  $f_{m2}$  está na Figura 19. Esta frequência é sempre o maior valor de amplitude abaixo do 2º harmônico da frequência da rede (120 Hz).

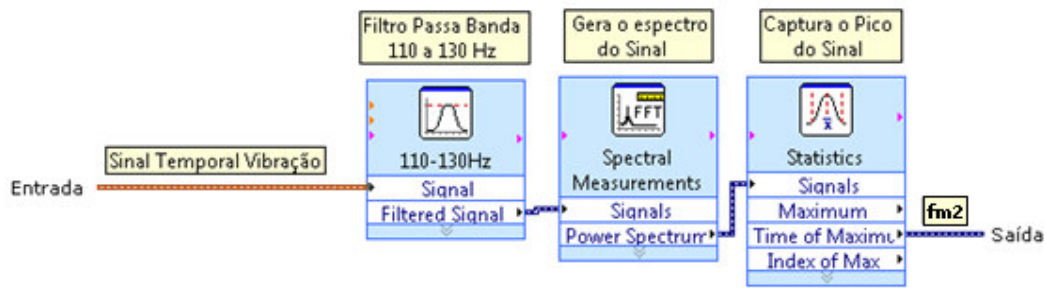


Figura 19 – Cálculo da frequência de rotação mecânica – 2º Harmônico.

A partir da frequência mecânica encontrada, aplicam-se as equações (34) e (36) no software a fim de achar os valores das frequências laterais. Na Figura 20 tem-se esta implementação, onde as equações estão aplicadas.

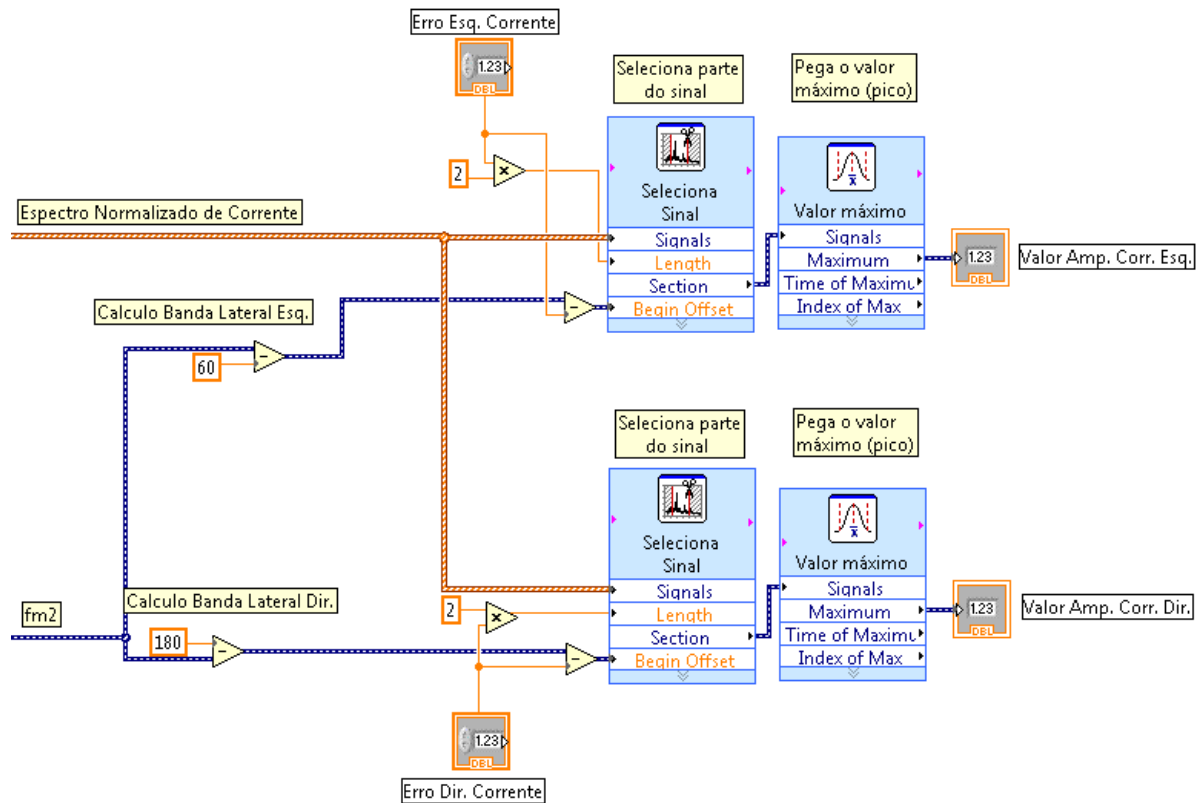


Figura 20 – Implementação das equações das frequências laterais - corrente.

O mesmo caso se aplica para a implementação do software de vibração mecânica. Das equações (21) e (22) tem-se:

$$f_{Lateral\ esq.} = f_m - f_2 + f_{m2} \quad (37)$$

$$f_{Lateral\ esq.} = \frac{f_{m2}}{2} - 120 + f_{m2} \quad (38)$$

$$f_{Lateral\ esq.} = \frac{3}{2}f_{m2} - 120 \quad (39)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = f_m + f_2 - f_{m2} \quad (40)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = \frac{f_{m2}}{2} + 120 - f_{m2} \quad (41)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = -\frac{1}{2}f_{m2} + 120 \quad (42)$$

Na Figura 21 tem-se a implementação (39) e (42) no software, usando-se o mesmo princípio do software implementado para corrente elétrica. Também existe a implementação do intervalo de procura baseado na informação do “erro de vibração” que deve ser alimentado manualmente nas variáveis “Erro Esq. Vibração” e “Erro dir. Vibração”.

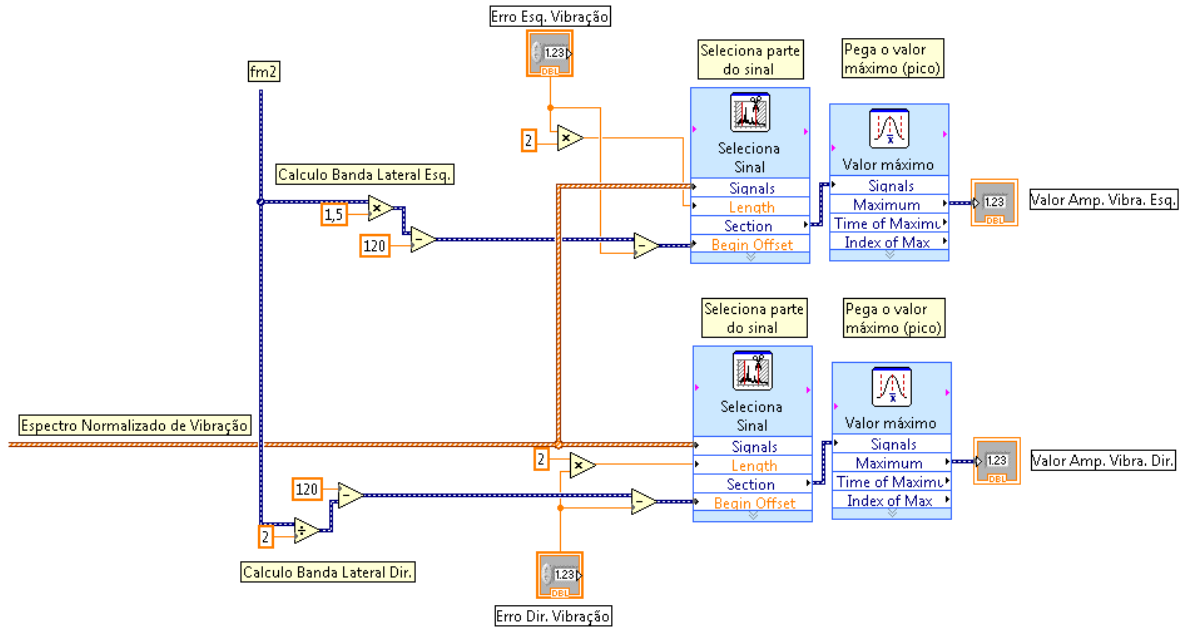


Figura 21 - Implementação das equações das frequências laterais - vibração.

### 3.3.1 DEFINIÇÃO DO INTERVALO DE PROCURA E ERROS

No software desenvolvido existe um campo na qual se deve informar o intervalo de procura das frequências de barras quebradas. Este campo chama-se “erro corrente” e ele define o intervalo de procura de onde será adquirido o valor máximo da amplitude e exibido na saída “Valor Amplitude Corrente”.

Um exemplo da implementação do bloco “Selecciona parte do Sinal” pode ser vista na Figura 22, onde a frequência onde será procurado o valor máximo está entre 58,4 Hz e 58,9 Hz. Neste caso o que o software faz é usar o valor da frequência de barras quebradas calculado anteriormente, determinar a região onde o valor de pico será procurado e medir o valor de pico. O valor de pico achado é o valor da amplitude de barras quebradas.

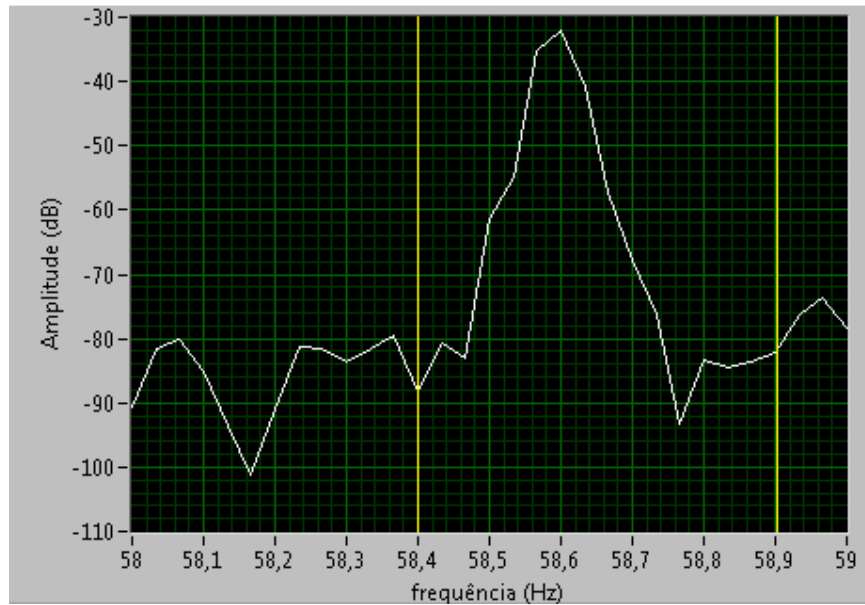


Figura 22 – Exemplo de seleção de intervalo de procura.

O cálculo do erro a ser usado no software é um pouco diferente do erro visto no capítulo 2. O novo cálculo do erro leva em conta as simplificações feitas nas equações de barras quebradas originais e apresenta as seguintes características:

### Corrente elétrica:

Seja as equações de barras quebradas definidas em (34) e (36):

$$f_{Lateral\ esq.} = f_{m2} - 60 \quad (43)$$

$$f_{Lateral\ dir.} = 180 - f_{m2} \quad (44)$$

Seja o erro da resolução de frequência:  $\Delta f_{m2} = \pm \frac{\Delta f}{2}$

Para a frequência esquerda:

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = \pm \frac{1}{2} \Delta f \quad (45)$$

Para a frequência direita:

$$f_{Lateral\ dir.} = \pm \frac{1}{2} \Delta f \quad (46)$$

### **Vibração Mecânica:**

Para a frequência esquerda:

$$\Delta f_{Lateral\ esq.} = \pm \frac{3}{4} \Delta f \quad (47)$$

Para a frequência direita:

$$f_{Lateral\ dir.} = \pm \frac{1}{4} \Delta f \quad (48)$$

Estas são as equações que definem o erro de resolução para cada frequência lateral. Devem-se adicionar nestes cálculos outros erros provenientes do sistema de aquisição, e que podem variar conforme o sistema utilizado. Estes erros são basicamente a variação da base de tempo do sistema de aquisição e a variação da frequência da rede elétrica. Neste trabalho o erro do sistema de aquisição é de 50 ppm.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de verificar o método descrito nos capítulos anteriores, foram feitas aquisições de dados de corrente e vibração de amostras de compressores bons e com barras quebradas. Estes dados foram colocados em gráficos para uma melhor visualização e comprovação do método. O controle da carga do motor é imprescindível para uma melhor análise da detecção de barras quebradas. A PSD de corrente e vibração do motor elétrico, varia conforme a carga aplicada em seu eixo [9]. Vários estudos utilizam esta característica como marcador para a avaliação de barras quebradas, ou seja, o torque torna-se uma variável a mais a ser considerada. Este trabalho não explorou esta característica, sendo assim o torque permanece constante.

No caso de compressores herméticos não existe acesso ao eixo do motor, por isso a única forma de alterar a carga neste caso é colocar uma restrição pneumática na saída de gás comprimido. A restrição pneumática foi produzida com uma pequena válvula de controle de fluxo, ajustável manualmente e um manômetro na qual era possível visualizar a pressão de trabalho. Esta restrição permitiu um controle da carga do compressor em  $20 \pm 2\%$  da carga nominal.

## 4.1 ESPECTRO DA CORRENTE ELÉTRICA

Iniciou-se o procedimento de avaliação da corrente elétrica colocando-se em gráficos a PSD na região próxima da frequência da rede, ou seja, 60 Hz. Na Figura 23 tem-se a PSD de um compressor bom. Da Figura 24 até a Figura 29, tem-se a PSD de corrente de compressores com diferentes tipos de barras quebradas. Os gráficos exibem os valores de amplitude normalizados no eixo das ordenadas (y) de 0 a -100 dB e os valores de frequência no eixo das abscissas (x) de 56 a 64 Hz.

Pode-se notar a variação das amplitudes das frequências laterais esquerda e direita com relação à frequência da rede de 60 Hz. Com estes gráficos comparam-se os diversos tipos de amostras, seus defeitos e como as amplitude das frequências laterais se comportam. Para a análise de corrente o sistema de aquisição utilizou 2000 amostras por segundo e o tempo de amostragem foi de 10 segs. A amplitude de corrente para este modelo de compressor na frequência da rede (60 Hz) ficou em 1,9 Amps.

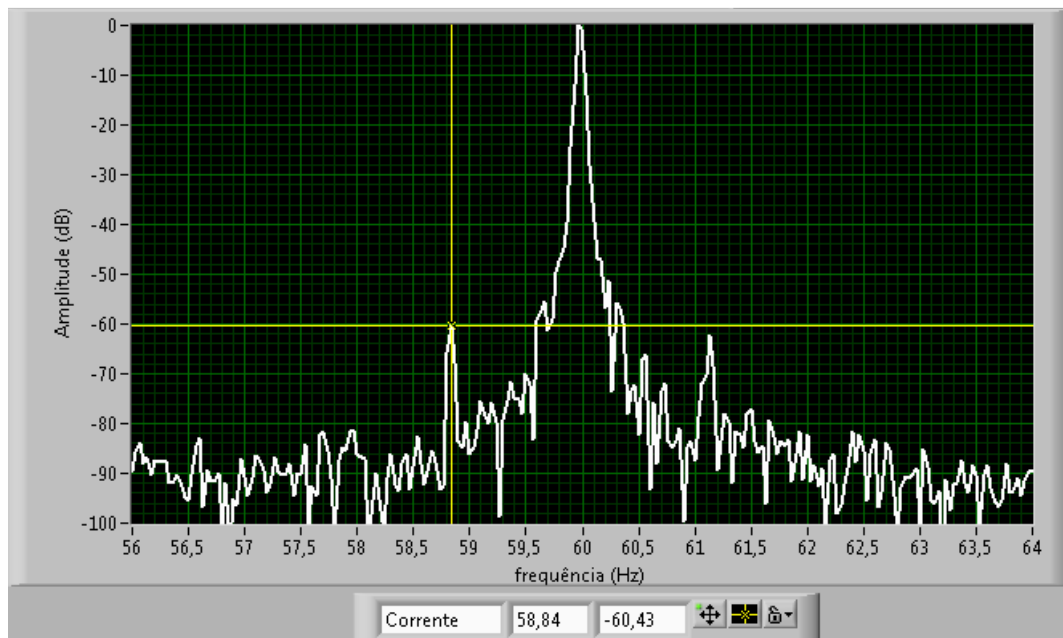


Figura 23 – PSD da Corrente de um compressor sem barras quebradas.

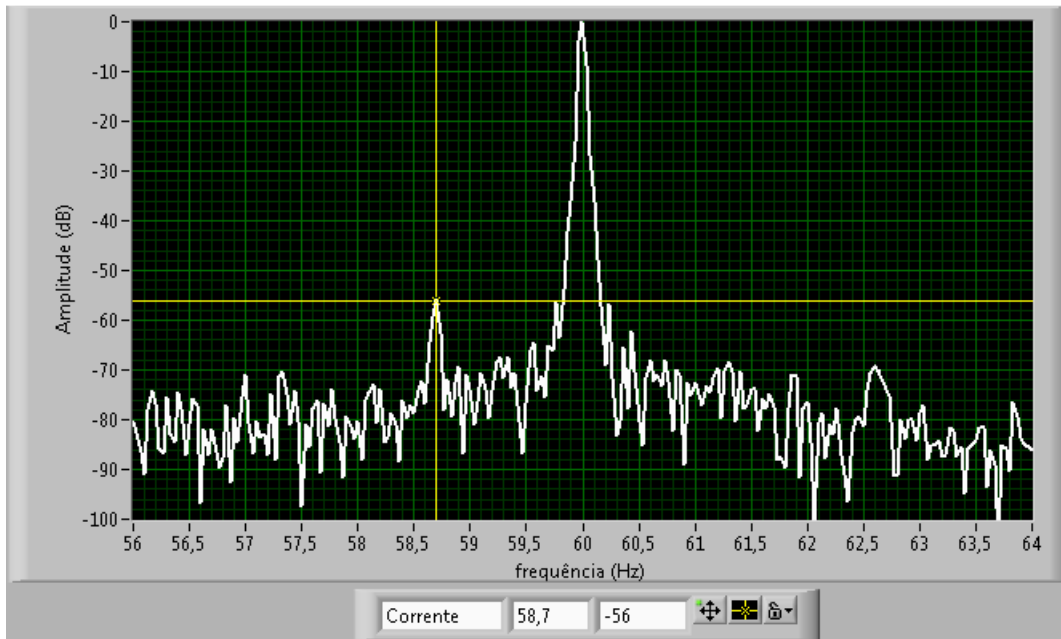


Figura 24 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas a 90°.

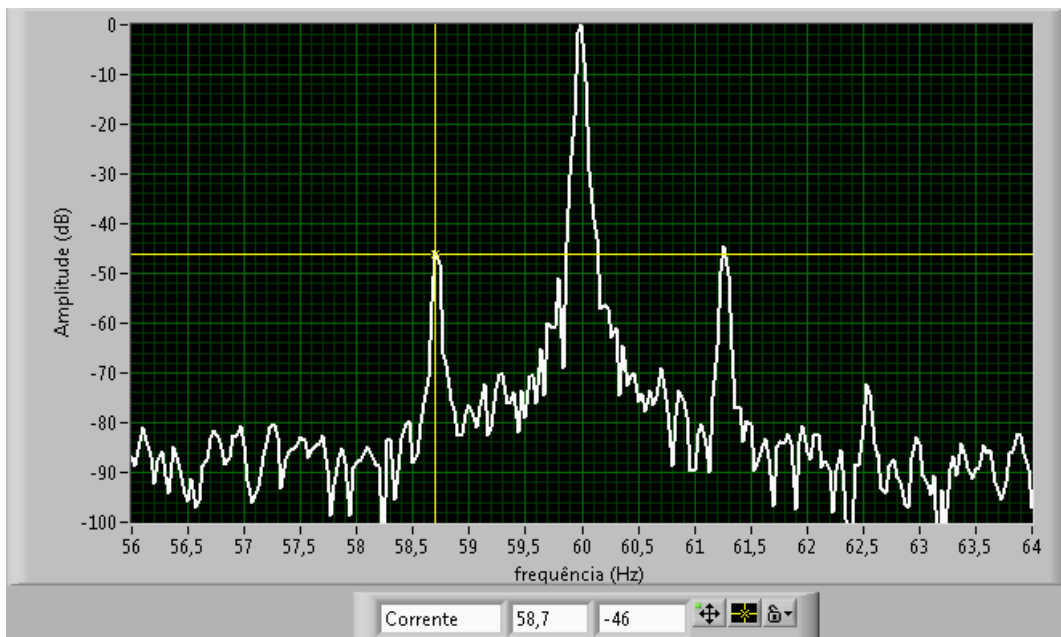


Figura 25 – PSD da Corrente de um compressor com uma barra quebrada.

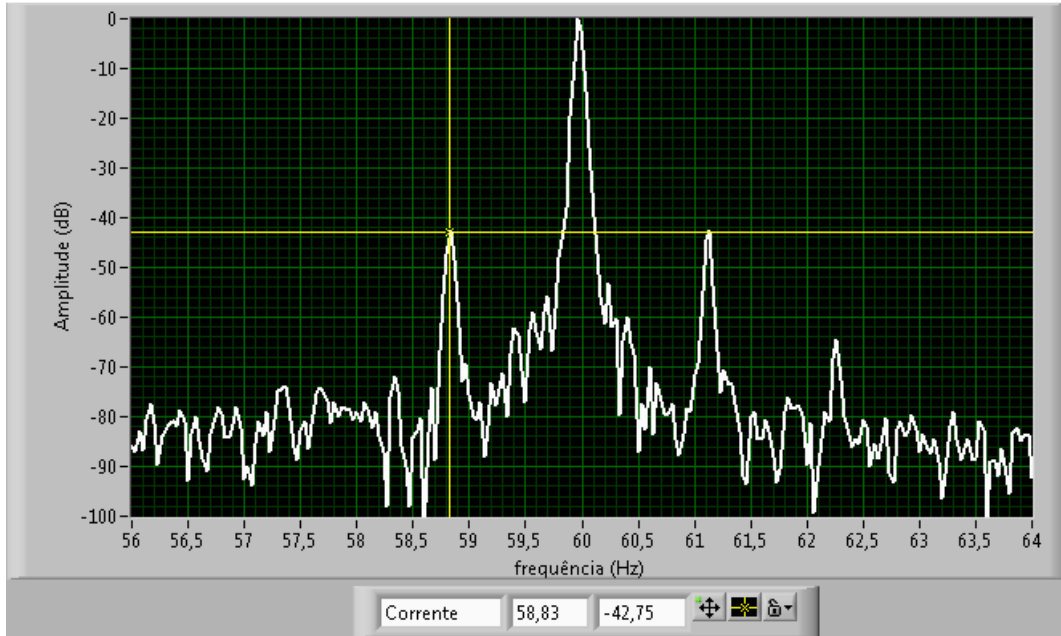


Figura 26 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas a 180°.

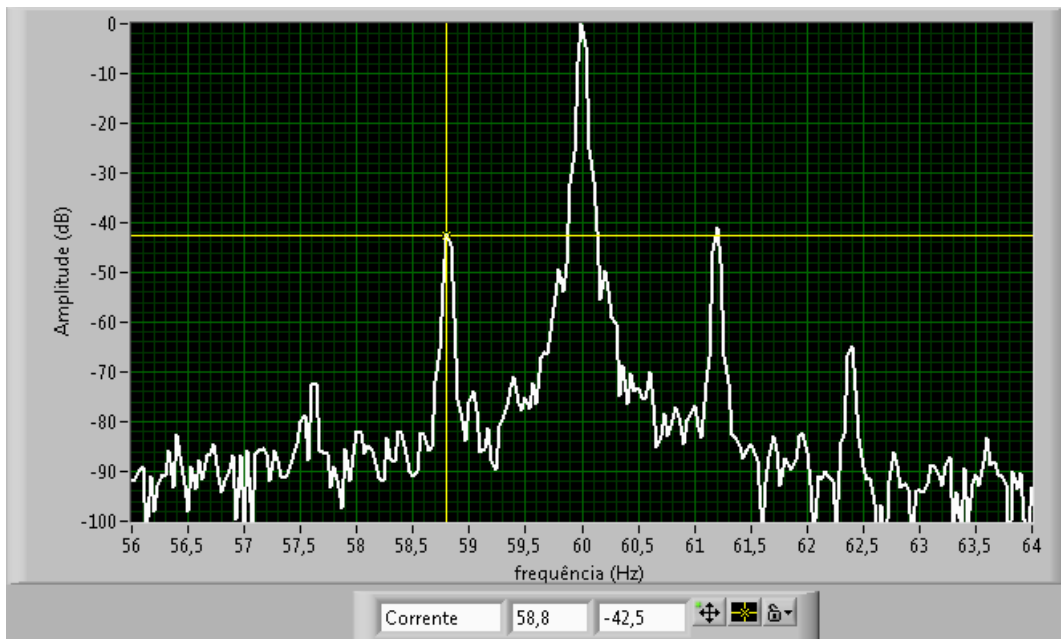


Figura 27 – PSD da Corrente de um compressor com duas barras quebradas adjacentes (13,3°).

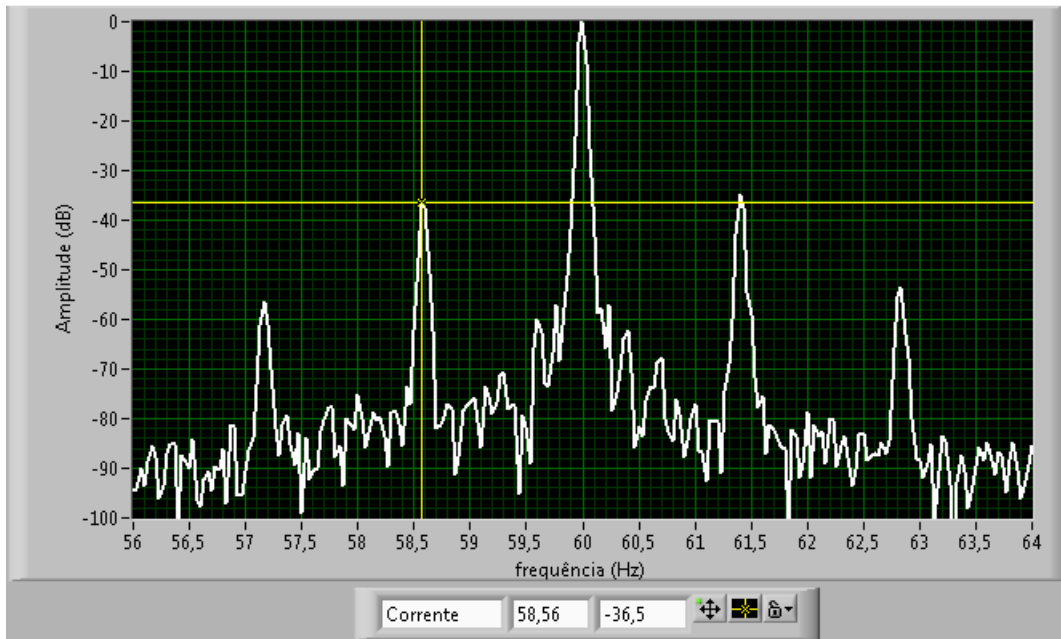


Figura 28 – PSD da Corrente de um compressor com quatro barras quebradas adjacentes.

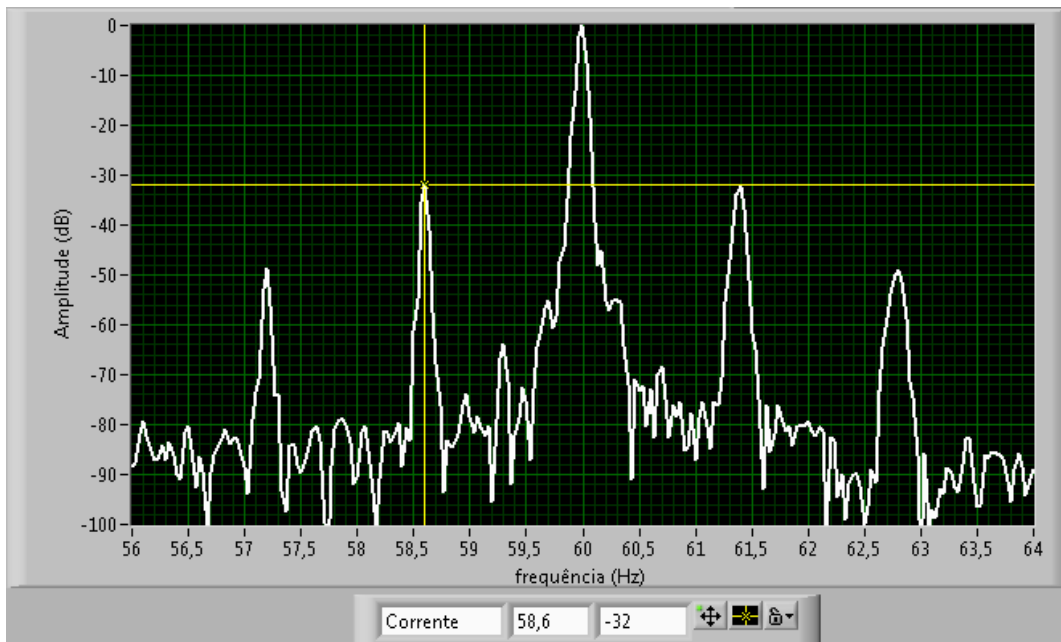


Figura 29 – PSD da Corrente de um compressor com cinco barras quebradas adjacentes.

Uma forma de melhor visualização é a utilização de gráficos de barras, onde é possível comparar visualmente as diferenças entre as amplitudes das bandas laterais.

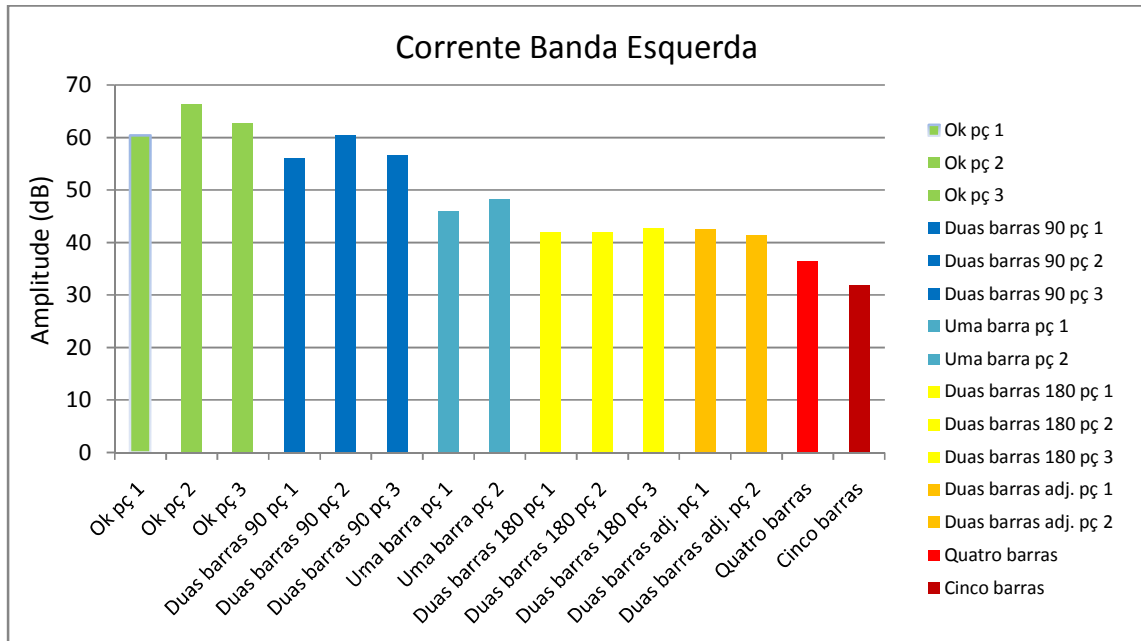


Figura 30 – Gráfico da amplitude PSD de corrente da banda esquerda.

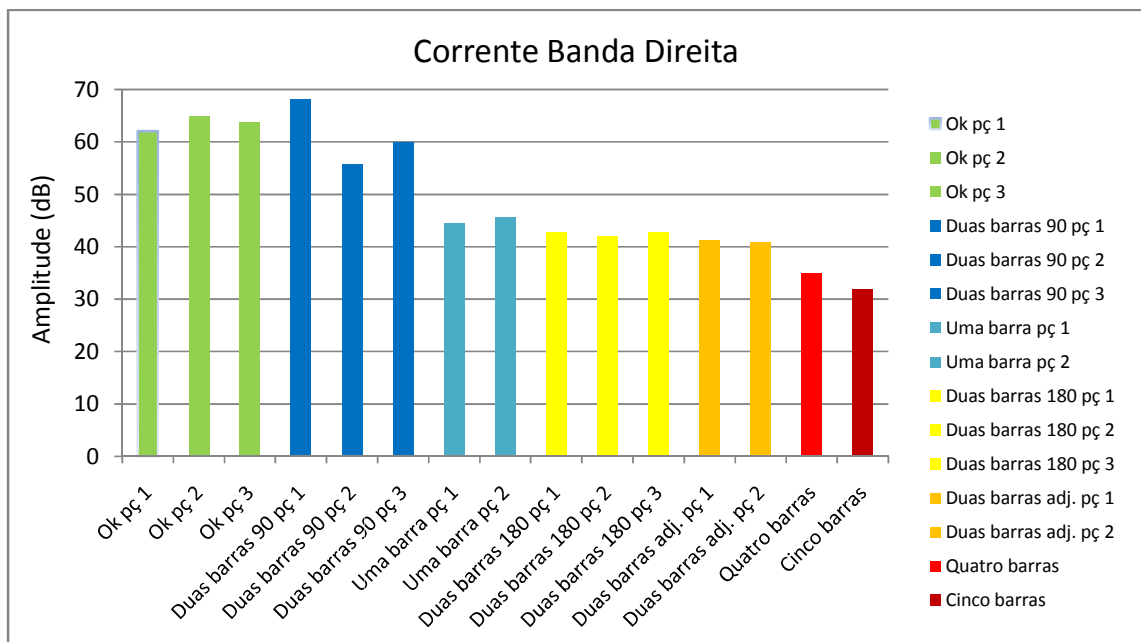


Figura 31 – Gráfico da amplitude PSD de corrente da banda direita.

Na Figura 30 e na Figura 31 pode-se avaliar o comportamento da corrente elétrica nos compressores bons e com barras quebradas. A Figura 30 refere-se às amplitudes da esquerda (em relação a frequência da rede) e a Figura 31 refere-se às amplitudes da direita. Das três amostras de compressores bons, a que tem menor diferença em relação à fundamental é a amostra 2 (peça 2) com valores nas frequências laterais esquerda e direita de -66,3 dB e -65,0 dB respectivamente. Os valores numéricos medidos das amplitudes estão no apêndice.

Analisando a PSD de corrente existe uma diferença de 12,16 dB na banda esquerda (-60,43 dB na peça 1 OK e -48,27 dB na peça 2 com uma barra quebrada). É uma diferença razoável e pode ser facilmente detectável. No caso da banda esquerda de corrente, a diferença é maior ainda, sendo de 16,23 dB entre os piores casos. O problema reside no caso de motores com duas barras a 90°, onde a amplitude dos sinais analisados é praticamente igual ao dos compressores bons. Para as amostras com duas barras quebradas (com exceção as de 90°) a diferença mínima ficou em 17,68 dB para a banda esquerda e 19,17 dB para a banda direita com relação a uma amostra sem barras quebradas. As amostras com duas barras quebradas a 90° apresentam comportamento muito semelhante a compressores bons. Na peça 1 na banda direita e peça 2 na banda esquerda das amostras com duas barras a 90°, as amplitudes são superiores a de compressores bons. Motores com uma barra quebrada ou mais são perfeitamente detectáveis através da PSD de corrente, seja pela banda direita ou esquerda, a exceção fica para o caso de barras a 90° comentado anteriormente. Desta forma, a posição das barras quebradas influencia diretamente na detecção das mesmas. Barras quebradas em determinadas posições produzem amplitudes de frequências laterais fracas o suficiente para não distingui-las de compressores sem barras quebradas [17].

## 4.2 ESPECTRO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA

Os compressores usados nesta etapa são os mesmos empregados para gerar a PSD de corrente elétrica. Os resultados podem ser vistos da Figura 32 até a Figura 38. Os gráficos exibem os valores de amplitude normalizados no eixo das ordenadas (y) de 0 a -80 dB e os valores de frequência no eixo das abscissas (x) de 56 a 64 Hz. Pode-se notar a variação das amplitudes das frequências laterais esquerda e direita com relação à frequência de rotação mecânica  $f_m$ . A frequência de rotação do motor é o maior pico visto no gráfico, ligeiramente abaixo de 60 Hz, com amplitude na ordem de 0,4 g. A maior amplitude de vibração das amostras testadas está na região de 2000 Hz, com aproximadamente 2 g de aceleração axial (não mostrado no gráfico). Para este caso foi usado o sistema de aquisição utilizou 25 k amostras por segundo e o tempo de amostragem foi de 10 segs.

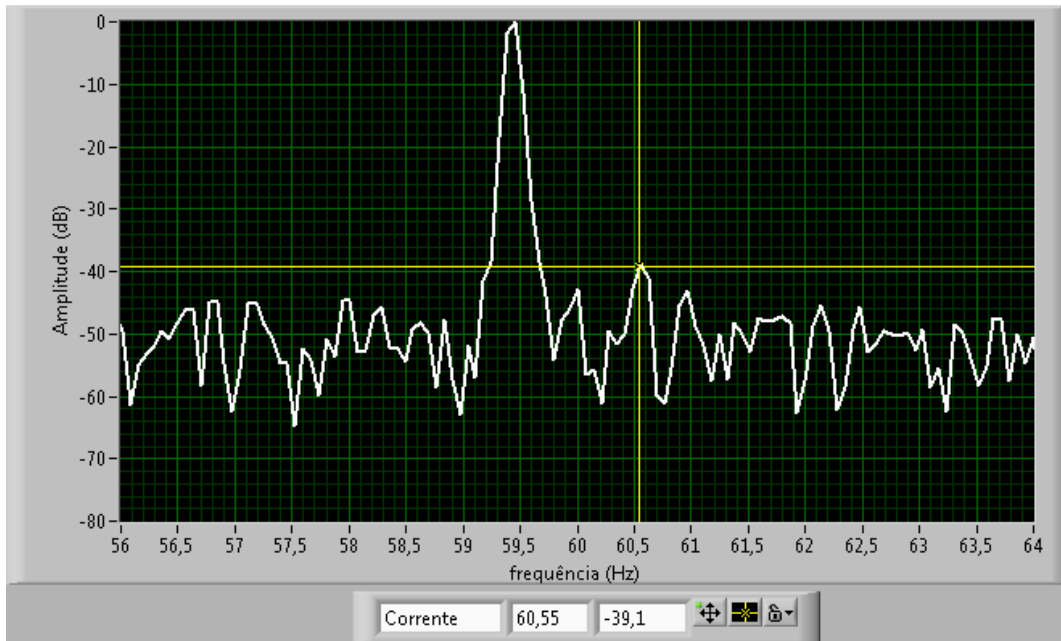


Figura 32 – PSD da Vibração de um compressor sem barras quebradas.



Figura 33 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas a 90°



Figura 34 - PSD da Vibração de um compressor com uma barra quebrada



Figura 35 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas a 180°.



Figura 36 – PSD da Vibração de um compressor com duas barras quebradas adjacentes (13,3°).



Figura 37 – PSD da Vibração de um compressor com quatro barras quebradas adjacentes.

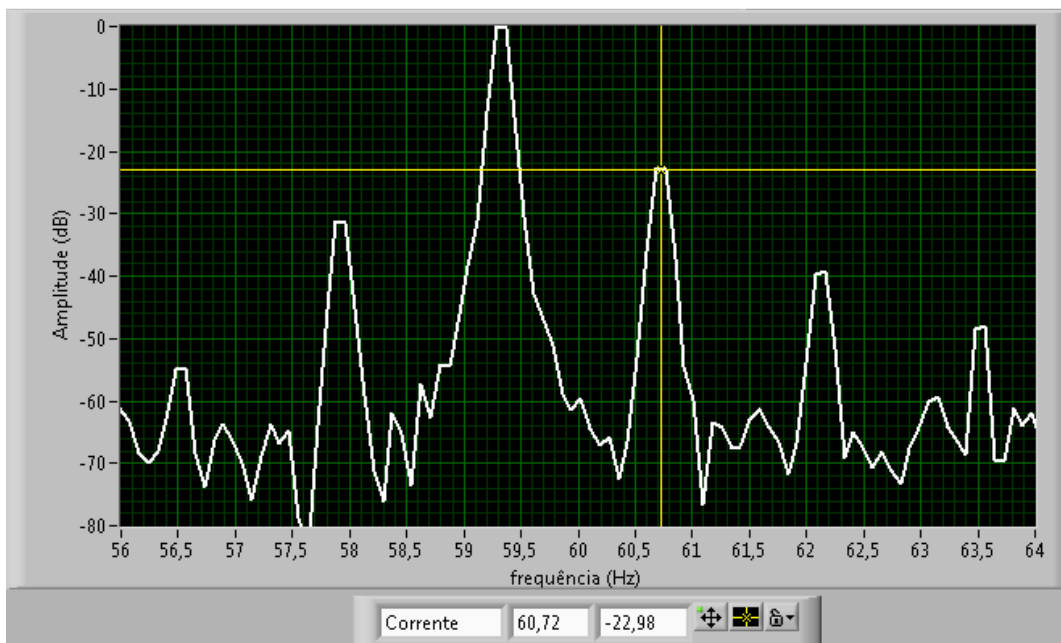


Figura 38 – PSD da Vibração de um compressor com cinco barras quebradas adjacentes.

Na Figura 32 tem-se a PSD de vibração de um compressor bom. A Figura 33 é uma amostra com duas barras quebradas a 90° e praticamente não se pode diferenciá-lo da amostra do compressor bom. O mesmo ocorre na Figura 34, que é um compressor com uma barra quebrada. Os dados destes testes podem ser visualizados na Figura 39 e na Figura 40. Pode-se estabelecer um limite para a definição de uma amostra boa ou uma amostra ruim usando vibrações mecânicas, este limite seria por volta de 45 dB. Este valor foi escolhido por englobar todas as amostras boas testadas, mas também incluiria amostras com defeitos, como as com uma barra quebrada e duas barras quebradas a 90°. Desta forma a detecção de barras quebradas usando vibração mecânica só é possível para compressores com duas barras quebradas ou mais, com exceção de barras quebradas a 90°.

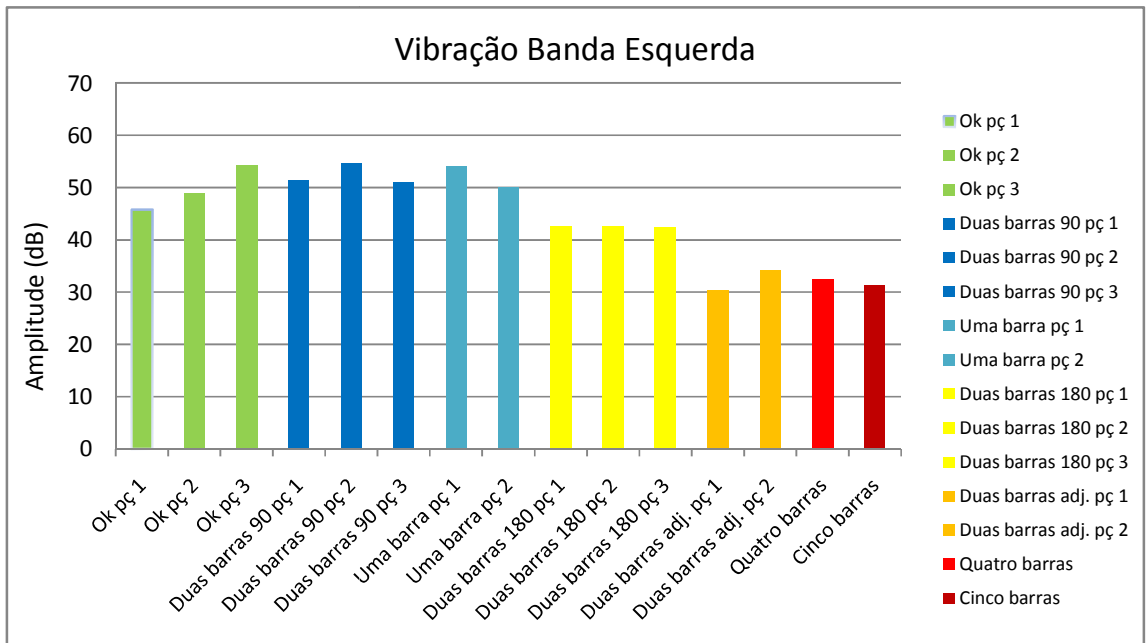


Figura 39 – Gráfico de amplitude PSD da vibração da banda esquerda.

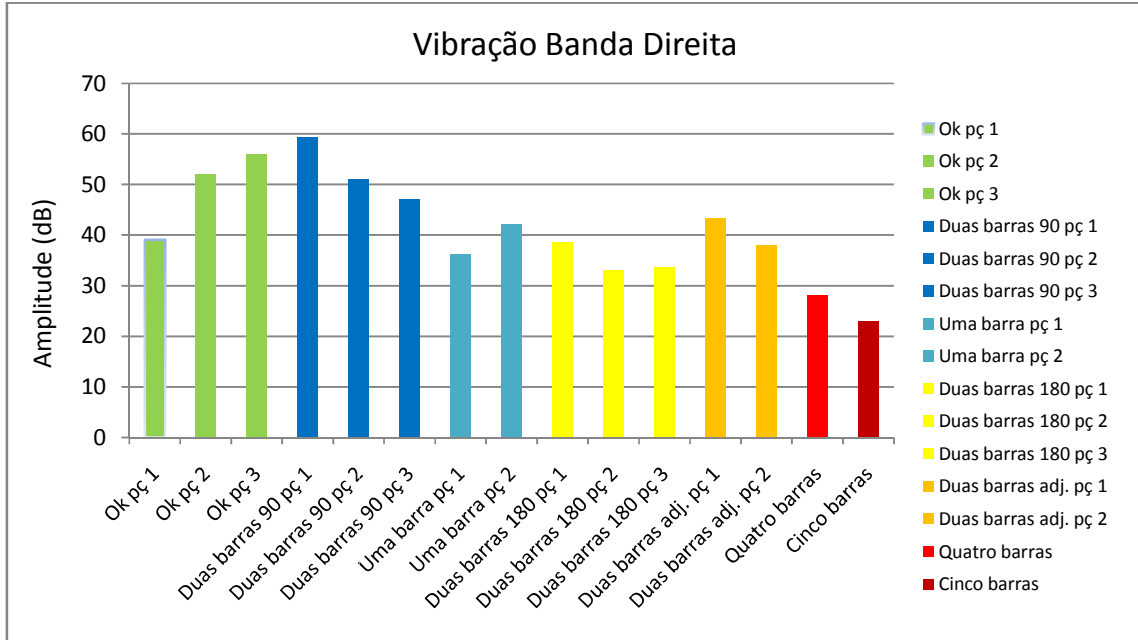


Figura 40 – Gráfico de amplitude PSD da Vibração da banda direita.

Observou-se que, a PSD de vibração é menos sensível que a PSD de corrente elétrica para detecção de barras quebradas. Este comportamento já foi descrito na teoria [9]. Em alguns casos a amostra boa apresentou amplitude menor que de uma amostra com barras quebradas. A única vantagem da análise de vibração em relação à análise com corrente é a facilidade de realizar as aquisições do sinal, pois não existe modificações ou preparação da amostra. Simplesmente coloca-se o acelerômetro no produto e realiza-se a aquisição, sem alterações elétricas no produto. O uso da corrente elétrica permite uma melhor caracterização do defeito, pois as amplitudes laterais são maiores em relação ao ruído de fundo do que no caso de vibrações mecânicas. De qualquer forma o método proposto neste trabalho visa unir os dois métodos e não usá-los separadamente. Um dos principais motivos para a menor sensibilidade da detecção das barras quebradas usando vibrações mecânicas é provavelmente a própria constituição física do produto testado. Justamente por ser um componente lacrado e sem acesso ao rotor e estator. Este tipo de produto possui um sistema de isolamento do seu interior com o exterior (carcaça) através de molas e, portanto existe a dificuldade da transmissão da vibração. Apesar deste inconveniente, obtém-se o valor do escorregamento com facilidade.

### 4.3 AVALIAÇÃO DA TAXA DE AQUISIÇÃO E RUÍDO DE FUNDO.

Neste trabalho foi feito um estudo adicional sobre a taxa de aquisição e a relação sinal-ruído presente nos sinais adquiridos. O sistema de aquisição de dados (vibração) utilizou uma taxa de aquisição original de 25 k amostras por segundo durante 10 segundos, gerando 250 k pontos a serem processados. O estudo feito pretende fazer um melhor aproveitamento desta taxa de aquisição e talvez simplificar o sistema de aquisição ou ainda melhorar o sinal obtido. Segundo Nyquist com a taxa de aquisição de 25 k amostras por segundo é possível adquirir um sinal de até 12,5 kHz. O sinal de interesse está na região de 55 a 120 Hz, bem abaixo da frequência máxima possível de 12,5 kHz. Assim foram feitos dois tratamentos matemáticos distintos no sinal original a fim de avaliar o resultado.



Figura 41 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada.

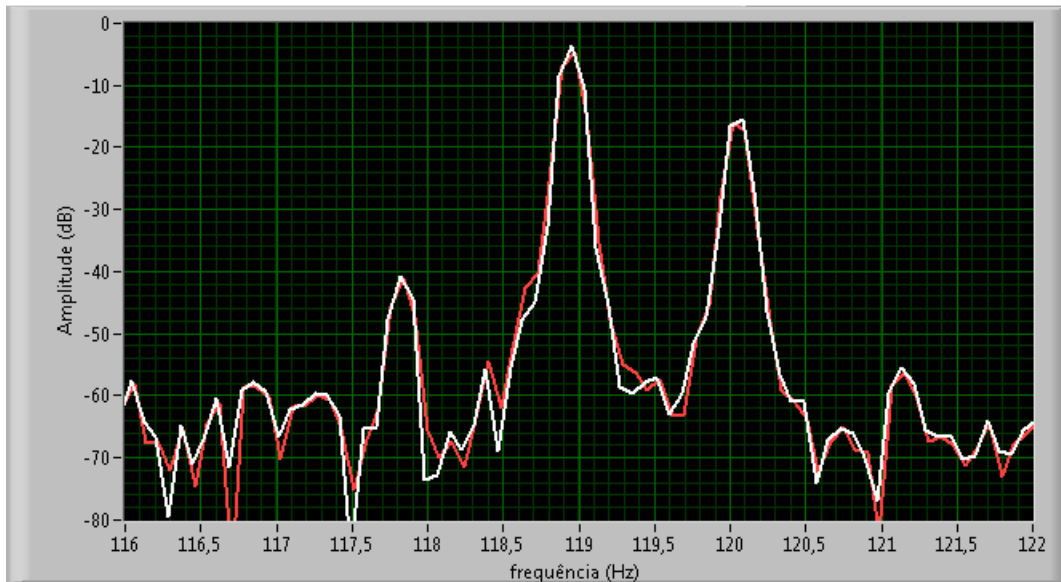


Figura 42 – PSD do sinal original e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada (região de 116 a 122 Hz).

O primeiro tratamento feito no sinal foi fazer médias em amostras consecutivas do sinal (no domínio do tempo). Como o sinal original atinge uma frequência de 12,5 kHz e se trabalha com no máximo 120 Hz para medição das bandas, foi feita uma redução da taxa de amostragem em 50 vezes. Isto deixou o sinal resultante com uma frequência final de 250 Hz, o suficiente para a análise do sinal. A idéia deste tratamento é diminuir a frequência máxima, mas manter a resolução do sinal original. A Figura 41 e a Figura 42 mostram a resultante das 50 médias consecutivas feitas no sinal original em um compressor com uma barra quebrada. Os picos dos sinais se preservaram e houve alguma alteração no ruído de fundo, mas nada significativo que atrapalhe a análise. Na Figura 43 tem-se a mesma análise feita com um compressor com quatro barras quebradas. Neste caso os sinais (picos de interesse) estão preservados e não houve uma grande variação no ruído de fundo. No segundo tratamento do sinal original foi usando uma decimação com 50 pontos, a fim de comparar com os resultados anteriores. O sinal obtido com esta decimação é praticamente idêntico ao sinal do primeiro tratamento realizado (médias consecutivas de 50 pontos). O resultado desta operação pode ser visto na Figura 44, onde a linha branca é o sinal original e a linha vermelha é o sinal decimando.



Figura 43 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da média de 50 amostras consecutivas (linha vermelha) em um compressor com quatro barras quebradas.



Figura 44 – PSD do sinal original (linha branca) e PSD da decimação de 50 amostras (linha vermelha) em um compressor com uma barra quebrada.

Estes resultados mostram que é possível reduzir a taxa de amostragem dos sinais usados até valores próximos as frequências analisadas. No caso específico a redução de 50 vezes da taxa de aquisição não alterou significativamente o sinal na faixa de 55 a 120 Hz o que permitiria a utilização de um sistema de aquisição mais simples. A decimação (Figura 44) e as médias das amostras consecutivas (Figura 41, Figura 42 e Figura 43) apresentaram resultados praticamente idênticos entre si, com pouca diferença com relação ao sinal original.

## 5 APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS NA DETECÇÃO DE BARRAS QUEBRADAS

A motivação do uso de redes neurais neste trabalho está concentrada na análise das barras quebradas de difícil detecção, mais especificamente no caso de barras quebradas a 90°. A tentativa de achar um padrão através deste método se baseia nos valores de corrente e vibração como entrada da rede neural. As redes neurais são uma das formas mais utilizadas de análise de barras quebradas em motores [5] [10] [18]. Outros métodos também são utilizados, como por exemplo, a análise discriminante linear que busca uma combinação linear de características para separar dois ou mais grupos ou classe de objetos [3] [18]. A utilização de redes neurais é uma das formas de se obter um padrão de aprendizado, quando não existe um algoritmo ou equação específico para tal fim. As redes neurais se baseiam na forma como o cérebro humano funciona, imitando-o na forma de processar informações. O cérebro é um sistema altamente complexo capaz de analisar informações de forma paralela e não-linear. O modelo de neurônios artificiais foi primeiramente desenvolvido por Warren McCulloch e Walter Pitts em 1943. Este modelo simula o funcionamento de um neurônio como um circuito binário simples, com várias entradas e uma saída apenas.

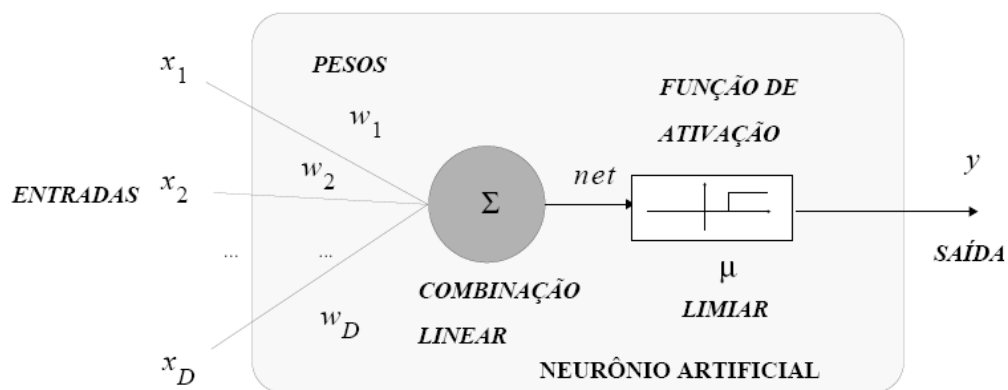


Figura 45 - Modelo de um neurônio artificial proposto por McCulloch-Pitts [19].

Para o caso representado na Figura 45 pode-se ver que as entradas correspondem a um vetor  $X = [x_1; x_2; \dots; x_D]$  com dimensão  $D$ . Assim para cada entrada  $x_i$ , existe um peso correspondente  $w_i$  que simula a concentração de neurotransmissores da conexão sináptica como em um cérebro natural. Um limiar chamado  $\mu$  é adicionado a estrutura do neurônio e ela é usada para representar uma polarização, ou seja, abaixo deste valor a saída é zero. A somatória dos pesos  $w_i$  é submetida a uma função de ativação, geralmente não-linear, obtendo-se assim a função  $y = f(\sum_{j=1}^D w_j x_j - \mu)$ . Algumas funções de ativações estão representadas Figura 46.

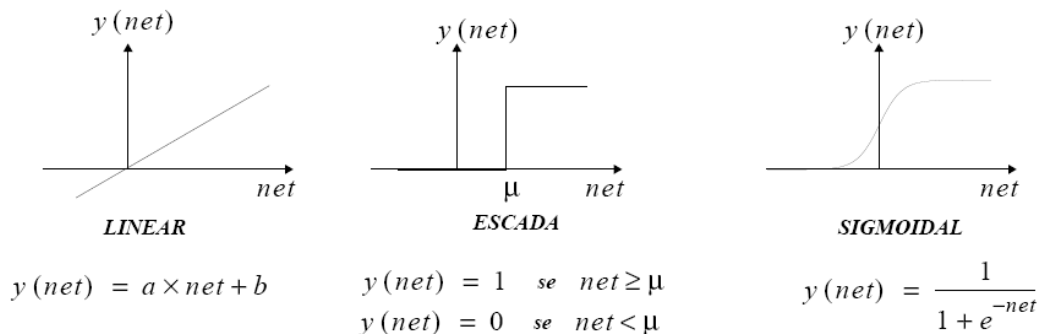


Figura 46 - Funções de ativação[20]

Cada neurônio é um elemento processador que executa uma função simples. Uma rede neural é uma associação de neurônios individuais interligados, capaz de resolver problemas complexos [21].

A estrutura destas redes neurais artificiais é semelhante às redes neurais naturais, pois existem neurônios que recebem sinais do meio exterior (neurônios de entrada), neurônios que podem interagir de alguma forma com o mundo exterior (neurônios de saída) e neurônios que estão situados em uma camada interna e não interagem com o mundo exterior, chamados de neurônios ocultos. Uma rede neural bastante comum é a rede tipo Feedforward ou rede direta. Esta rede é bastante popular e existem diversos métodos de aprendizagem ou treinamento disponíveis.

Na Figura 47 tem-se a representação de uma rede do tipo Feedforward com três entradas, duas camadas intermediárias e duas saídas [22].

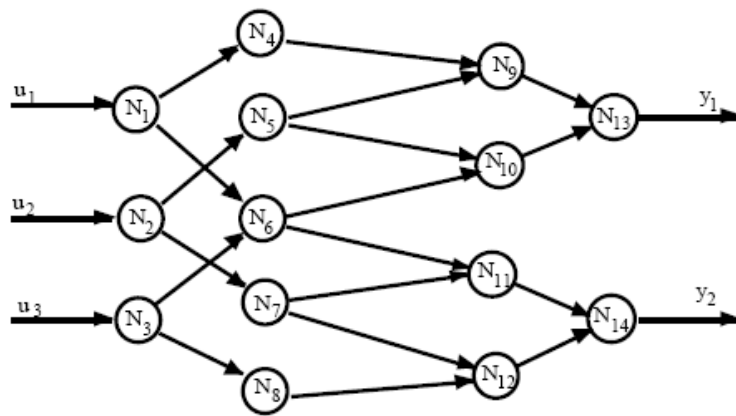


Figura 47 – Exemplo de uma rede neural tipo *Feedforward*.

## 5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para este estudo, foram utilizados os mesmos dados dos capítulos anteriores. Os dados que a rede neural analisou são os valores das amplitudes das frequências  $f_m - 2sf$  e  $f_m + 2sf$  no caso de vibração mecânica e  $f_l + 2sf$  e  $f_l - 2sf$  para o caso de corrente elétrica. Estes valores foram adquiridos através do método e software citados no capítulo 3.

Para a função de análise por redes neurais, foi utilizado um software chamado QuikNET que é bastante simples e permite uma análise rápida e coerente dos dados que estão sendo testados. Na Figura 48 tem-se a aparência da tela principal do software QuikNET.

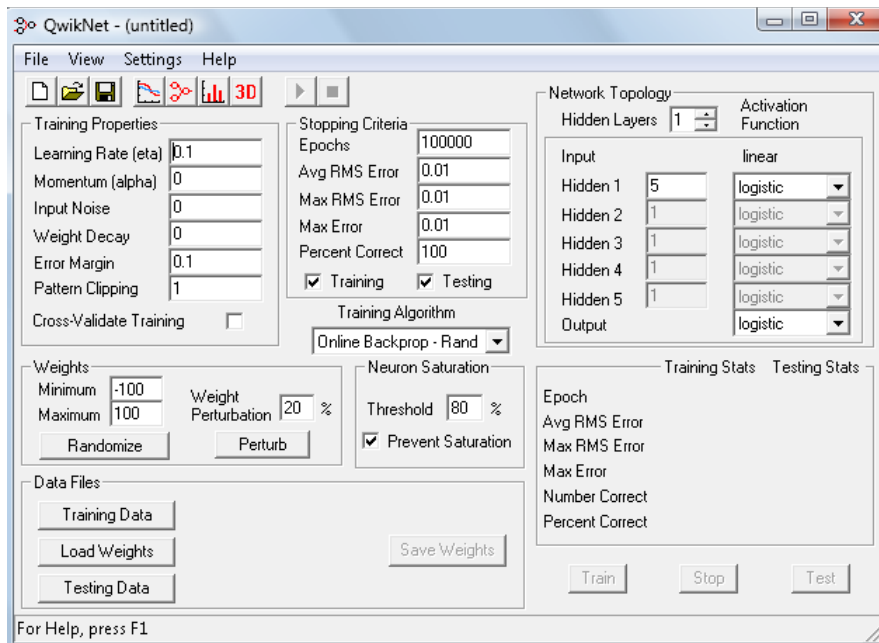


Figura 48 – QuikNET - Software usado na análise por redes neurais.

Para sua utilização alguns parâmetros precisam ser ajustados no software, bem como alimentá-lo com os dados a serem analisados. Neste trabalho o algoritmo escolhido para o treinamento das redes neurais é o *Online Backpropagation* [4].

O critério de parada foi definido como sendo o erro máximo entre a saída obtida da rede neural e a saída desejada para cada amostra. Este erro deve ser menor ou igual a 2%, tanto para o conjunto de treinamento quanto para o conjunto de teste. Caso estes erros não fiquem abaixo deste valor em até 100.000 interações a amostra é considerada não convergente. Já com relação ao número de camadas escondidas (*Hidden Layers*), um estudo foi realizado para achar a melhor combinação de neurônios nesta camada. O software foi alimentado com uma tabela padrão com os valores de entrada e saída das amplitudes de corrente e vibração. Para melhor analisar o comportamento das redes neurais, foi criada uma metodologia da forma como os dados de entrada serão colocados. Isto é, foram criados 3 casos distintos:

**Caso 1** – Rede neural com quatro entradas e uma saída. As entradas são as amplitudes laterais esquerda e direita de corrente e vibração;

**Caso 2** – Rede neural com duas entradas e uma saída. As entradas são as amplitudes laterais esquerda e direita de corrente somente;

**Caso 3** – Rede neural com duas entradas e uma saída. As entradas são as amplitudes laterais esquerda e direita de vibração somente;

Para cada caso dos citados acima, foram utilizadas as quinze amostras de compressores. Foram feitos quinze conjuntos de treinamentos diferentes, sendo que para cada treinamento uma amostra era usada para teste e as restantes eram usadas para treinamento da rede. Este método é chamado de “leave-one-out” e é bastante utilizado como método de avaliação do desempenho de uma rede neural com poucas amostras [23]. Na Figura 49 pode-se ver uma representação da rede neural criada para o caso, sendo que esta rede apresenta quatro entradas e uma saída.

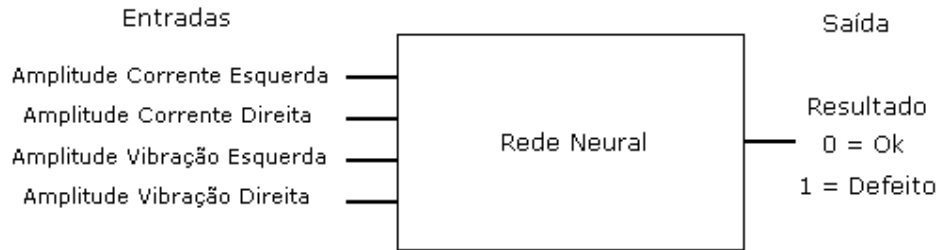


Figura 49 – Representação das entradas e saídas da rede neural para o caso 1.

O sistema proposto é do tipo  $4 \times N \times 1$ , ou seja com quatro entradas e uma saída. O valor de N varia, podendo ser inclusive  $N \times M$  e  $N \times M \times Q$ , podendo assim ter uma, duas ou três camadas intermediárias.

Das várias simulações feitas na Tabela 3, chegou-se às seguintes conclusões:

- As amostras 3, 4 e 5 não convergiram, ou seja, acusaram falso bom ou falso defeito. Os números que aparecem nas tabelas são as interações necessárias para atingir o erro de 2% previsto. Falso bom é quando uma amostra de teste considerada “ruim” é detectada como “bom” e falso defeito ocorre quando a rede neural acusa “bom” para uma amostra “ruim”.

- Das amostras que houve acerto, não houve diferença significativa entre as configurações de camadas escondidas. A melhor configuração conseguida é a  $4 \times 5 \times 5 \times 1$ , isto é, com duas camadas de neurônios escondidas com 5 neurônios cada;

		Configuração Entrada x Camada Escondida x Saída.				
Núm.	Amostra	4x5x5x1	4x3x3x1	4x3x1	4x5x1	4x8x1
1	Ok pç 1	2600	3200	10000	15800	22400
2	Ok pç 2	2200	3000	9500	9000	9000
3	Ok pç 3	Acusou Falso Defeito.				
4	Duas barras 90 pç 1	Acusou Falso Bom.				
5	Duas barras 90 pç 2	Acusou Falso Bom.				
6	Duas barras 90 pç 3	2600	3000	9800	9000	8600
7	Uma barra pç 1	2700	3000	9500	9000	8600
8	Uma barra pç 2	2700	2600	9200	8800	8600
9	Duas barras 180 pç 1	2700	2700	9700	9000	8600
10	Duas barras 180 pç 2	2600	2700	9700	8800	8600
11	Duas barras 180 pç 3	2700	2700	9500	8800	8600
12	Duas barras adjs. pç 1	2400	2700	9500	8800	8600
13	Duas barras adjs. pç 2	2400	2700	9800	8800	8600
14	Quatro barras	2500	2700	9800	8700	8600
15	Cinco barras	2500	2700	9700	8700	8600

Tabela 3 – Caso 1 – número de interações para atingir um erro de 2%.

Uma nova configuração de neurônios foi testada, desta vez com três camadas escondidas. A Tabela 4 mostra o resultado obtido, mas somente é exibido as cinco primeiras amostras, que são as mais críticas. As demais amostras tiveram comportamento parecido com os resultados da Tabela 3. A aplicação de três camadas escondidas na rede neural não melhorou seu desempenho com relação à detecção de falsos defeitos e falsos bons. Estas amostras não atingiram o limite de erro estabelecido de 2% em 100.000 interações, ficando na faixa de 90 a 95% de erro. Os testes foram repetidos para os casos 2 e 3 e pode ser vistos na Tabela 5 e na Tabela 6.

Configuração Entrada x Camada Escondida x Saída.						
Amostra	4x5x5x5x1	4x5x8x5x1	4x5x3x5x1	4x3x5x3x1	4x3x3x3x1	4x8x8x8x1
Ok pç 1	1700	1800	1700	1800	1900	1400
Ok pç 2	1800	1700	1700	1700	1700	1400
Ok pç 3	Falso Defeito					
Duas barras 90 pç 1	Falso Bom					
Duas barras 90 pç 2	Falso Bom					

Tabela 4 – Resultados para o caso 1 com três camadas.

no	Amostra	Melhor configuração	Interações
1	Ok pç 1	Falso Defeito.	
2	Ok pç 2	2x5x3x5x1	2200
3	Ok pç 3	2x5x3x5x1	2000
4	Duas barras 90 pç 1	Falso Bom.	
5	Duas barras 90 pç 2	Falso Bom.	
6	Duas barras 90 pç 3	2x5x3x5x1	2000
7	Uma barra pç 1	2x5x3x5x1	2000
8	Uma barra pç 2	2x5x3x5x1	2000
9	Duas barras 180 pç 1	2x5x3x5x1	2000
10	Duas barras 180 pç 2	2x5x3x5x1	1900
11	Duas barras 180 pç 3	2x5x3x5x1	2000
12	Duas barras adjs. pç 1	2x5x3x5x1	2000
13	Duas barras adjs. pç 2	2x5x3x5x1	2100
14	Quatro barras	2x5x3x5x1	2000
15	Cinco barras	2x5x3x5x1	2000

Tabela 5 – Número de interações para o caso 2.

no	Amostra	Melhor configuração	Interações
1	Ok pç 1	Falso Defeito.	
2	Ok pç 2	Falso Defeito.	
3	Ok pç 3	Falso Defeito.	
4	Duas barras 90 pç 1	Falso Bom.	
5	Duas barras 90 pç 2	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	4500
6	Duas barras 90 pç 3	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	6400
7	Uma barra pç 1	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	5300
8	Uma barra pç 2	Falso Bom.	
9	Duas barras 180 pç 1	Falso Bom.	
10	Duas barras 180 pç 2	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	4200
11	Duas barras 180 pç 3	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	4200
12	Duas barras adjs. pç 1	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	3800
13	Duas barras adjs. pç 2	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	3800
14	Quatro barras	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	3700
15	Cinco barras	2x5x3x5x1 e 2x8x8x8x1	3800

Tabela 6 – Número de interações para o caso 3.

Novamente algumas amostras de teste que não estão corretas. É o caso das amostras 1, 4 e 5 para o caso 2 e das amostras 1, 2, 3, 4, 8 e 9 para caso 3. Isso provavelmente ocorreu devido a não separação dos subconjuntos “bom” e “defeito” pela rede neural. O caso 3 é o mais crítico, onde seis amostras não estavam corretas. Isto ocorreu porque os erros das amostras de teste ficaram muito acima dos 2% estipulados. Tendo em vista estes resultados, foi criado um quarto caso para comparações com os outros três anteriores. Este novo caso utilizou os dados de corrente elétrica e vibração como no caso 1, mas foram desprezadas as amostras com barras quebradas a 90°. Este teste está representado na Tabela 7 e apresenta convergência de 100% das amostras.

no	Amostra	Melhor configuração	Interações
1	Ok pç 1	2x5x5x5x1	2700
2	Ok pç 2	2x5x5x1	2200
3	Ok pç 3	2x5x5x5x1	2000
4	Uma barra pç 1	2x5x5x5x1	1900
5	Uma barra pç 2	2x5x5x5x1	2200
6	Duas barras 180 pç 1	2x8x8x8x1	1000
7	Duas barras 180 pç 2	2x5x5x5x1	1000
8	Duas barras 180 pç 3	2x5x5x5x1	1000
9	Duas barras adjs. pç 1	2x5x5x5x1	1000
10	Duas barras adjs. pç 2	2x5x5x5x1	1100
11	Quatro barras	2x5x5x5x1	1000
12	Cinco barras	2x5x5x5x1	900

Tabela 7 – Número de interações para o caso 4.

Na Tabela 8 pode-se ver o resultado final das quatro avaliações criadas. O melhor caso é o quarto, onde 100% das amostras foram acertadas. O pior caso é o terceiro com apenas 60% de acerto, verificando que o uso de vibração mecânica para detecção de barras quebradas é menos sensível que o uso da corrente elétrica.

Sistema	Descrição	Acerto (%)
Caso 1	Dados Vibração e Corrente	80
Caso 2	Dados Corrente	80
Caso 3	Dados Vibração	60
Caso 4	Dados Vibração e Corrente, sem barras quebradas a 90°.	100

Tabela 8 – Avaliação de erros para cada caso.

Os casos criados 1, 2 e 3 permitiram fazer uma análise do desempenho das redes neurais na detecção de barras quebradas. Da mesma forma que a análise usando amplitudes, não houve êxito na detecção de barras quebradas a 90° usando redes neurais. A idéia era encontrar um padrão específico de reconhecimento com a utilização de diferentes tipos de configurações de redes neurais. As amostras com barras quebradas a 90° apresentam um comportamento muito semelhante a amostras boas, não podendo assim ser diferenciadas.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudados métodos de análise de defeitos de barras quebradas em motores elétricos, mais especificamente o caso de compressores herméticos. Este tipo de produto apresenta a característica de não haver acesso ao seu eixo de rotação, portanto, não é possível medir diretamente o valor da rotação mecânica e escorregamento. Estes dados são essenciais para o correto diagnóstico dos defeitos de barras quebradas, tendo em vista que o escorregamento pode variar com a carga e com o próprio defeito que se está procurando.

A proposta deste trabalho foi unir dois métodos existentes de detecção de barras quebradas em um único método, aproveitando o melhor de cada um deles. A utilização da corrente elétrica é importante devido à excelente relação sinal-ruído. Já o método de vibração mecânica, apesar de menos sensível que o método de corrente, possui a capacidade extrair a informação de rotação mecânica do motor. A união destes métodos descrita neste trabalho possibilitou a criação de uma ferramenta útil na detecção de barras quebradas em motores lacrados e em compressores herméticos.

Geralmente quanto mais barras quebradas existem em um rotor, mais fácil é sua detecção. Este fato se deve a uma maior alteração no campo resultante no rotor e no estator. Neste trabalho foi possível detectar amostras a partir de uma barra quebrada, com exceção do caso de duas barras quebradas em ângulo de 90°. Neste caso específico, a detecção foi incorreta, causando um falso aprovado, ou seja, o comportamento deste caso foi muito semelhante a uma amostra sem defeito. Resta saber se nestes casos existe alguma influência no rendimento do motor, já que praticamente não há registro de harmônicas na PSD de corrente.

Foram utilizadas redes neurais como método alternativo para a detecção das barras quebradas de mais difícil detecção, principalmente o caso de barras a 90°. Os dados obtidos não apresentaram um resultado satisfatório usando informações de corrente e vibração na alimentação da rede neural.

Como sugestão para a continuação deste trabalho sugere-se mais pesquisas com amostras de motores e compressores com barras quebradas em vários ângulos. Este tipo de pesquisa será importante na determinação de um padrão relacionado a este defeito. Existe a possibilidade de haver outros ângulos críticos como o de  $90^\circ$  e também a possibilidade de haver casos críticos com mais de duas barras quebradas, que em determinados ângulos teriam efeitos similares ao caso de  $90^\circ$ . Outra sugestão para futuros trabalhos é com relação ao uso de acelerômetros de três eixos na aquisição de dados de vibrações. Isto possibilitaria um mapeamento mais completo das vibrações que ocorrem no motor elétrico e talvez, possibilitando uma melhora da sensibilidade na detecção de defeitos relacionados a barras quebradas.

## REFERÊNCIAS

- [1]. **CHIN, Y. C. and CHANG, G. W.** An integrated On-Line System for Experimental Data Analysis to Electric Machines Laboratory. *8th International Power Eng. Conference - IPEC*. 2007.
- [2]. **KURZYN, M. S.** Expert Systems and Neural Networks: A Comparison. *Deakin University, Clayton, Australia*. 1993.
- [3]. **AYHAN, B.; CHOW, M.; SONG, M.** Multiple Discriminant Analysis and Neural-Network-Base Monolith and Partition Fault-Detection Schemes for Broken Rotor Bar in Induction Motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 4, 2006.
- [4]. **BACCARINI, L. M. R.** Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução. *Tese de Doutorado*. PPGEE-UFMG, 2005.
- [5]. **BRITO, J. N.** Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos. *Tese de Doutorado - UNICAMP*. 2006.
- [6]. **COSTA, F. F.; ALMEIDA, L. A. L.; NAIDU, S. R.; BRAGA, E. R.** Improving the Signal Data Acquisition in Condition Monitoring of Electrical Machines. AUG 2004, Vol. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53 - 4.
- [7]. **DOBRODEYEV, P. N.; VOLOKHOV, S. A.; KILDISHEV, A. V.; NYENHUIS, J. A.** Method for Detection of Broken Bars in Induction Motors. sep 2000, Vol. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35 - 5.
- [8]. **KLIMAN, G. B.; KOEGL, R. A.** Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors. *Transactions on Energy Conversion*. 4, 1988, Vol. *IEEE*.
- [9]. **LI, W. and MECHEFSKE, C. K.** Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods. *Journal of vibration and Control*. 12, 2006.
- [10]. **SADOUGHI, A.; EBRAHIMI, M.; MOALEM, M.; SADRI, S.** Intelligent Diagnosis of Broken Bars in Induction Motors Based on New Features in Vibration Spectrum. *IEEE*. 2007.
- [11]. **DIAS, C. G.** Proposta de um novo método para detecção de barras rompidas em motores de indução com rotor de gaiola. *Tese de Doutorado, USP*. 2006.

- [12]. **EPRI**. Improved Motors for Utility Applications and Improved Motors for Utility Applications. *Industry Assessment Study*. 1982, Vol. 1.
- [13]. **PELTOLA, M.** Slip of AC Induction Motors and How To Minimize It. *Tech Paper - ABB Drives*.
- [14]. **SCHOEN, R. and HABETLER, T. G.** Effects of Time Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machines. *Trans. Ind. Appl. IEEE*, 1995, Vol. 31.
- [15]. **SADOUGHI, A., EBRAHIMI, M. and REZAEI, E.** A New Approach for Induction Motor Broken Bar Diagnosis by Using Vibration Spectrum. *SICE-ICASE International Joint Conference*. 2006.
- [16]. **THOMSON, W. T. and FENGER, M.** Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. aug 2001, Vol. IEEE Industry Magazine.
- [17]. **MENACER, A.; MOREAU, S.; BENAKCHA, A.; SAID, M. S. N.** Effect of the Position and the Number of Broken Bars on Asynchronous Motor Stator Current Spectrum. *EPE-PEMC*. 2006.
- [18]. **RAFIMANZELAT, M. R., ARAABI, B. N. and KHOSROSHAHLI, E.** Induction Machine Broken Bar Detection Using Neural Networks Based Classification. *Proceedings of the 2004 IEEE. Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2004.
- [19]. **KARRER, D.; CAMEIRA, R.; VASQUES, A.; BENZECRY, M.** Redes Neurais Artificiais: Conceitos e Aplicacoes. *Profundão – IX Encontro de Engenharia de Produção da UFRJ*. 2005.
- [20]. **RAUBER, T. W.** ERI'98 – Encontro Regional de Informática. 1998.
- [21]. **BRAGA, A. P., CARVALHO, A. C. P. L. F. and LUDEMIR, T. B.** Redes Neurais Artificiais. Rio de Janeiro, 2000, Vol. 1, LTC.
- [22]. **BARRETO, J. M.** Introdução às Redes Neurais Artificiais. *Laboratório de Conexão e Ciências Cognitivas - Departamento de Informática e de Estatística*. UFSC, 2002.
- [23]. **MONARD, M. C. and BARANAUKAS, J. A.** Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações. Manole, 2003.

## APÊNDICE - DADOS ADQUIRIDOS NAS AMOSTRAS DE COMPRESSORES

Este apêndice apresenta os dados adquiridos através de testes das amostras utilizadas neste trabalho. As Tabelas A1 e A2 referem-se aos dados coletados das amplitudes da PSD de corrente elétrica, do lado esquerdo e do lado direito à frequência da rede (60 Hz). As Tabelas A3 e A4 referem-se aos dados de vibração mecânica.

<b>Amostra</b>	<b>Amplitude (dB)</b>	<b>Frequência calculada ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Frequência medida ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Erro frequência</b>
Ok peça 1	-60,43	58,84	58,83	-0,01
Ok peça 2	-66,3	58,96	58,87	-0,09
Ok peça 3	-62,75	58,85	58,83	-0,02
Duas barras 90 peça 1	-56	58,76	58,7	-0,06
Duas barras 90 peça 2	-60,5	58,76	58,8	0,04
Duas barras 90 peça 3	-56,75	58,93	58,8	-0,13
Uma barra peça 1	-46	58,73	58,7	-0,03
Uma barra peça 2	-48,27	58,95	58,86	-0,09
Duas barras 180 peça 1	-42	58,92	58,87	-0,05
Duas barras 180 peça 2	-42	58,95	58,87	-0,08
Duas barras 180 peça 3	-42,75	58,85	58,83	-0,02
Duas em seqüência peça 1	-42,5	58,75	58,8	0,05
Duas em seqüência peça 2	-41,45	58,67	58,73	0,06
Quatro barras	-36,5	58,58	58,56	-0,02
Cinco barras	-32	58,65	58,6	-0,05

Tabela A1 – Corrente Elétrica Lado Esquerdo.

<b>Amostra</b>	<b>Amplitude (dB)</b>	<b>Frequência calculada ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Frequência medida ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Erro frequência</b>
Ok peça 1	-62,12	61,15	61,13	-0,02
Ok peça 2	-65	61,03	61,07	0,04
Ok peça 3	-63,75	61,14	61,16	0,02
Duas barras 90 peça 1	-68,25	61,23	61,3	0,07
Duas barras 90 peça 2	-55,75	61,23	61,16	-0,07
Duas barras 90 peça 3	-60	61,06	61,1	0,04
Uma barra peça 1	-44,5	61,27	61,27	0
Uma barra peça 2	-45,8	61,05	61,1	0,05
Duas barras 180 peça 1	-42,95	61,07	61,17	0,1
Duas barras 180 peça 2	-42	61,04	61,13	0,09
Duas barras 180 peça 3	-42,75	61,14	61,13	-0,01
Duas em seqüência peça 1	-41,25	61,25	61,2	-0,05
Duas em seqüência peça 2	-40,8	61,32	61,26	-0,06
Quatro barras	-35	61,41	61,4	-0,01
Cinco barras	-32	61,35	61,4	0,05

Tabela A2 - Corrente Elétrica Lado Direito.

<b>Amostra</b>	<b>Amplitude (dB)</b>	<b>Frequência calculada ± 0,075 (Hz)</b>	<b>Frequência medida ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Erro frequência</b>
Ok peça 1	-45,8	58,26	58,28	0,02
Ok peça 2	-48,8	58,45	58,57	0,12
Ok peça 3	-54,18	58,28	58,17	-0,11
Duas barras 90 peça 1	-51,4	58,15	58,17	0,02
Duas barras 90 peça 2	-54,54	58,14	58,22	0,08
Duas barras 90 peça 3	-51	58,4	58,4	0
Uma barra peça 1	-54	58,1	58,1	0
Uma barra peça 2	-50	58,42	58,35	-0,07
Duas barras 180 peça 1	-42,63	58,39	58,35	-0,04
Duas barras 180 peça 2	-42,5	58,42	58,38	-0,04
Duas barras 180 peça 3	-42,35	58,28	58,31	0,03
Duas em seqüência peça 1	-30,38	58,11	58,1	-0,01
Duas em seqüência peça 2	-34,1	58	58,02	0,02
Quatro barras	-32,38	57,87	57,82	-0,05
Cinco barras	-31,3	57,97	57,92	-0,05

Tabela A3 - Vibração Lado Esquerdo.

<b>Amostra</b>	<b>Amplitude (dB)</b>	<b>Frequência calculada ± 0,025 (Hz)</b>	<b>Frequência medida ± 0,05 (Hz)</b>	<b>Erro frequência</b>
Ok peça 1	-39,1	60,57	60,55	-0,02
Ok peça 2	-52,15	60,51	60,56	0,05
Ok peça 3	-56	60,57	60,57	0
Duas barras 90 peça 1	-59,3	60,61	60,6	-0,01
Duas barras 90 peça 2	-51	60,61	60,69	0,08
Duas barras 90 peça 3	-47	60,53	60,53	0
Uma barra peça 1	-36,13	60,63	60,6	-0,03
Uma barra peça 2	-42,1	60,52	60,59	0,07
Duas barras 180 peça 1	-38,65	60,53	60,59	0,06
Duas barras 180 peça 2	-33,03	60,52	60,59	0,07
Duas barras 180 peça 3	-33,75	60,57	60,62	0,05
Duas em seqüência peça 1	-43,27	60,63	60,64	0,01
Duas em seqüência peça 2	-38	60,66	60,65	-0,01
Quatro barras	-28,12	60,7	60,75	0,05
Cinco barras	-22,98	60,67	60,72	0,05

Tabela A4 - Vibração Lado Direito.