

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**THIAGO MIKAIL DE OLIVEIRA**

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM**  
**ÊNFASE EM *MCSA – MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação de Sistemas Industriais

Orientador: Luiz Eduardo Borges da Silva

Dezembro de 2007  
Itajubá - MG

*Ao meu avô, pelo amigo, pelo pai e, principalmente,  
pelo grande professor de vida que ele foi.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo que tenho em minha vida.

Aos Professores Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva e Dr. Germano Lambert Torres pela sabedoria que se torna fonte de inspiração, e pelo apoio incondicional durante a realização desse trabalho.

À minha família, em especial à minha amada mãe, pelo apoio incondicional e imensurável em todos os momentos que dela precisei (e realmente não foram poucos). A sua perseverança é minha locomotiva.

Aos amigos Frederico, Jonas, Levy e Rodrigo pela enorme oportunidade de aprendizado que me foi proporcionada. Só quem tem a virtude de poder contar com tal companheirismo pode se considerar afortunado na vida.

Aos amigos com quem pude compartilhar minha infância e adolescência e que perduram até hoje: Anderson, Jorge, Marco, Raphael, Tiago e Vinícius.

Aos meus colegas da Novelis, que proporcionam a cada dia novos desafios e oportunidades, em especial ao pessoal da manutenção que muito me ensina e auxilia, tanto nas tarefas diárias quanto na realização desse trabalho.

A minha namorada Lívia pela compreensão, paciência, encorajamento, tolerância e otimismo dispensados todos os dias. Com ela descobri amor e paz.

Finalmente, a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 CONCEITUAÇÃO.....	12
2.1 Considerações sobre Manutenção .....	12
2.1.1 Manutenção Corretiva .....	14
2.1.2 Manutenção Preventiva .....	15
2.1.3 Manutenção Preditiva .....	16
2.1.4 Segmentos de Mercado e suas Filosofias de Manutenção.....	16
2.2 Motores de Corrente Contínua .....	18
2.2.1 Partes constituintes e possíveis falhas .....	18
2.2.2 Pontes Retificadoras .....	21
2.3 O Processamento do Sinal de Corrente .....	23
2.3.1 Harmônicos.....	23
2.3.2 Análise de Fourier Aplicada .....	24
3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA DE MOTORES.....	27
3.1 Análise Termográfica .....	28
3.2 MCA (Motor Circuit Analysis) – Teste Estático de Motores Elétricos .....	31
3.3 Análise de Vibrações .....	32
3.4 Técnica de MCSA .....	36
4 APLICAÇÃO DE MCSA EM MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA.....	40
4.1 Padrões e Características das Falhas .....	41
4.1.1 Falhas Elétricas.....	42
4.1.2 Falhas Mecânicas em Rolamentos.....	45
4.2 Conceitos e Ferramentas Empregadas.....	47
4.3 O Procedimento de Avaliação .....	48
4.4 Vantagens .....	51
4.5 Desvantagens .....	52
5 PROCEDIMENTO DE MEDIDA E ANÁLISE.....	53
5.1 Teste em Laboratório.....	53
5.2 Confirmação em campo.....	53
6 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO SOB TESTE.....	57
6.1 Material.....	57
6.2 Aquisição e Análise dos Dados .....	57

6.3 Transdutores de Corrente Utilizados .....	58
6.4 Motores .....	58
6.5 Acionamentos dos Motores .....	59
6.6 Montagem dos testes .....	59
7 RESULTADOS .....	61
7.1 Testes Laboratoriais.....	61
7.1.1 Considerações .....	65
7.2 Testes Em Campo.....	65
7.2.1 Considerações .....	77
8 CONCLUSÕES .....	79
8.1 Recomendações para Trabalhos Futuros .....	80
9 REFERÊNCIAS .....	82

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Partes Principais do Motor de Corrente Contínua .....	19
Figura 2.2 – Partes constituintes do Motor de Corrente Contínua .....	20
Figura 2.3 – Ponte de 6 Pulsos .....	22
Figura 2.4 – Aspecto do Resultado da Retificação .....	22
Figura 2.5 – Soma da primeira e quinta harmônicas .....	24
Figura 2.6 – Sinal x Decomposição em Frequências do Mesmo.....	25
Figura 3.1 – Análise termográfica de um Painel Elétrico .....	30
Figura 3.2 – Análise termográfica completa de um Motor.....	30
Figura 3.3 – Exemplo de medida de vibração (domínio da frequência).....	33
Figura 3.4 – Exemplo de medida de vibração em diversas coletas .....	33
Figura 3.5 - Sistema básico para análise espectral da corrente .....	37
Figura 3.6 - Fluxograma da Análise .....	38
Figura 3.7 - Integração de um sistema de diagnóstico automático.....	39
Figura 4.1 – FFT do <i>Ripple</i> de um Sinal de Corrente para Motor DC .....	41
Figura 4.2 – Forma de onda de corrente sem a falha provocada .....	43
Figura 4.3 – Forma de onda de corrente na presença da falha .....	43
Figura 4.4 – Espectro de corrente sem a falha provocada .....	44
Figura 4.5 – Espectro de corrente na presença da falha .....	44
Figura 4.6 – Partes Constituintes de Rolamentos .....	45
Figura 4.7 – Dimensões Comuns em Rolamentos.....	46
Figura 4.8 – Frequência de amostragem.....	47
Figura 5.1 – Esquema do Campo .....	54
Figura 5.2 – Cilindro de Trabalho inserido no Mancal .....	55
Figura 6.1 – Transdutor de Corrente Utilizado.....	58
Figura 6.2 – Dados de placa do Motor Utilizado em Campo.....	59
Figura 6.3 – Vista do Local utilizado no Trabalho.....	60
Figura 7.1 – Componente referente à rotação do motor CC a vazio e sem agravante no dano do rolamento .....	62
Figura 7.2 - Componente referente à rotação do motor CC carregado e sem agravante no dano do rolamento.....	62

Figura 7.3 - Componente referente à rotação do motor CC a vazio e com rolamento com avaria agravada.....	63
Figura 7.4 - Componente referente à rotação do motor CC carregado e com rolamento avariado .....	64
Figura 7.5 - Superposição dos espectros com o motor a vazio.....	64
Figura 7.6 - Superposição dos espectros com o motor carregado .....	65
Figura 7.7 – Localização dos Dados no Gráfico .....	66
Figura 7.8 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta 24/11/2006.....	67
Figura 7.9a - Conteúdo Harmônico do Sinal da Rede.....	68
Figura 7.9b - Conteúdo Harmônico da Ponte Retificadora .....	69
Figura 7.10 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta 04/12/2006.....	70
Figura 7.11 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta dia 08/12/2006.....	71
Figura 7.12 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 13/12/2006.....	71
Figura 7.13 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 27/12/2006.....	72
Figura 7.14 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 02/01/2007.....	73
Figura 7.15 – Coleta de Dados de Vibração - Coleta dia 24/11/2006.....	74
Figura 7.16 – Correlação entre Severidade Estimada x Frequência do BSF.....	76
Figura 7.17 – Curva de Carga das Coletas .....	77

## RESUMO

Este trabalho apresenta aspectos de manutenção preditiva de Motores de Corrente Contínua (MCC), com foco especial na técnica de MCSA – *Motor Current Signature Analysis*, técnica originalmente desenvolvida para aplicação em Motores de Indução Trifásicos. A motivação para o seu desenvolvimento vem do fato de se buscar cada vez mais técnicas que reduzam os custos de manutenção e aumentem a disponibilidade de equipamentos em plantas industriais. Para isso, após referenciar-se teoricamente os conceitos envolvidos nesse trabalho, foi feita uma aplicação em laboratório, com a técnica sendo utilizada na detecção de problemas em rolamentos, e em campo, na detecção de falha na carga do motor utilizado em um laminador de alumínio. Em ambos os testes buscou-se identificar no espectro de frequências do *ripple* de corrente dos motores as frequências características das falhas apresentadas, mostrando-se os mesmos coerentes com o esperado teoricamente, permitindo-se identificar as falhas antes que as mesmas gerassem paradas nos sistemas. Considera-se assim de grande valia a aplicação da técnica de MCSA, e com isso ratifica-se a importância do desenvolvimento de novas técnicas de manutenção preditiva aplicadas a sistemas com motores elétricos em geral.

**Palavras-chave:** manutenção preditiva, MCSA, Motores de Corrente Contínua.



## ABSTRACT

This work presents aspects of predictive maintenance of Direct Current Motors, with special focus on the technique of MCSA - Motor Current Signature Analysis, originally developed for the application in Three-phase Induction Motors. The motivation for its development comes from the need of reducing maintenance costs and increase equipment availability in industrial plants. After reviewing the concepts of this work, a lab experiment was performed (where the technique was used to detect bearing problems), fieldwork was done to detect load failure of a motor used in an aluminum rolling mill). In both tests, the objective was to identify, in the frequency spectrum of the current ripple the elements that identify the signature of the imperfections. All the results matched the theoretical expectation, permitting identification of incipient failures. Thus, MCSA was considered of great value and the development of new predictive maintenance technique is recommended.

**Keywords:** predictive maintenance, MCSA, Direct Current Motors.

# 1 INTRODUÇÃO

Os motores são o cerne de linhas de produção, sendo muitas delas utilizando motores de corrente contínua, tendo os mesmos enorme base instalada em processos onde o controle de velocidade é crítico. Exemplos disso são controles de bobinadeiras e desbobinadeiras, motores utilizados em processos de laminação diversos, moinhos, etc.

Geralmente há fatores econômicos relacionados aos processos onde os motores são utilizados que fazem com que quaisquer paradas para reparo e/ ou troca do motor avariado gerem prejuízos enormes, como é o caso em metalurgia, siderurgia e mineração.

Diante disso, muito foco tem-se dado às técnicas de manutenção que visam à prevenção de problemas e substituem com grande vigor a manutenção corretiva. Entretanto, isso demanda o desenvolvimento de métodos de manutenção cada vez mais avançados, que conjuguem aspectos como: possibilidade ou não de se realizar paradas na linha de produção para inspeção dos motores, custo da manutenção, acompanhamento histórico e antecipação de resultados.

As técnicas que se mostram mais eficazes nos diversos sentidos apresentados acima são as técnicas preditivas, que permitem detectar a falha ainda no início, tendo-se assim a possibilidade de intervenção antes que a falha em questão prejudique o processo produtivo ao qual o motor está ligado. O foco dessa dissertação, portanto, se concentra nesse universo, que está em amplo desenvolvimento tanto de forma acadêmica quanto em aplicações práticas.

Dentre a variedade de técnicas disponíveis, destacam-se as que combinam a detecção de falhas elétricas e mecânicas nos motores; como a análise de vibrações, análises termográficas e testes de grandezas elétricas, como MCA (Motor Circuit Analysis), teste estático de motores, e o MCSA (Motor Current Signature Analysis), teste dinâmico de motores.

Ressalta-se que essa última técnica vem ganhando cada vez mais destaque, visto que são muitas as suas vantagens, como explicitado no item 3.4 do presente trabalho, tendo sua aplicação aumentado gradativamente em indústrias de grande porte.

O objetivo específico deste trabalho é identificar possibilidades de utilização da técnica MCSA, que foi desenvolvida inicialmente para motores de indução trifásicos, em Motores de Corrente Contínua. Esta tentativa visa à utilização de algumas características bastante atrativas, como a possibilidade de se realizar manutenções preditivas quando o motor

está localizado em lugares de difícil acesso, além de possibilitar o acompanhamento *online* da condição do sistema motor-transmissão-carga, sem necessidade de parada do mesmo.

No entanto, até o presente momento, pouco se tem debatido sobre a sua aplicação em motores de corrente contínua, visto que seu desenvolvimento preliminar, e já consolidado, leva em consideração características inerentes a motores de indução.

Assim, neste estudo, apresenta-se uma adaptação da técnica aplicada a motores assíncronos para motores de corrente contínua. Para isso, primeiramente fez-se uma pesquisa bibliográfica que visa sedimentar alguns conceitos importantes de manutenção e motores elétricos de corrente contínua (apresentada no capítulo 2), e as técnicas atualmente utilizadas, apresentando-se a análise termográfica, o MCA – teste estático de motores, a análise de vibrações e por fim o MCSA – teste dinâmico dos motores, no capítulo 3.

Diante das evidências apresentadas no capítulo 3 da importância do desenvolvimento dessa última técnica, tem-se o capítulo 4, onde se apresenta o desenvolvimento da técnica de MCSA para aplicação em motores de corrente contínua, com seu procedimento de aplicação descrito no capítulo 5.

Feito o desenvolvimento teórico, procede-se com os testes para confirmar-se a viabilidade da técnica de MCSA na detecção de problemas em máquina, com os equipamentos em teste apresentados no capítulo 6, e os resultados encontrados no capítulo 7.

## 2 CONCEITUAÇÃO

### 2.1 Considerações sobre Manutenção

Atualmente muito se discute sobre gerência de manutenção preditiva. A variedade de técnicas utilizadas atualmente passa desde monitoramento da vibração até imagens em infravermelho, e o desenvolvimento dessas técnicas com a correta aplicação faz com que a manutenção preditiva tenha sido reconhecida como uma técnica eficaz de gerenciamento de manutenção.

Muitas terminologias têm surgido como ferramentas de gerência de manutenção. Estes novos termos - RCM, manutenção centrada na confiabilidade; TPM, manutenção produtiva total; e JIT, manutenção “Just-in-Time” - são apresentadas como novas técnicas de gerenciamento da manutenção e a solução definitiva para se diminuir os altos custos de manutenção.

Conforme Almeida [1], desde que a maioria das fábricas de manufatura e de processo baseia-se em equipamentos mecânicos para a maior parte de seus processos, a manutenção preditiva baseada em vibração é a técnica dominante usada para a maioria dos programas de gerência de manutenção. Entretanto, a capacidade em monitorar todas as máquinas críticas, equipamentos, e sistemas em uma planta industrial típica não pode se limitar a uma única técnica.

O autor ainda afirma que:

“(...) as técnicas de monitoramento preditivas, ou seja, baseadas em condições, incluem: análise de vibração, ultra-som, ferrografia, tribologia, monitoria de processo, inspeção visual, e outras técnicas de análise não-destrutivas. A combinação destas técnicas de monitoramento e de análise oferece os meios de monitoramento direto de todos os equipamentos e sistemas críticos em sua fábrica”. [1]

É importante também ressaltar a importância econômica da manutenção no parque industrial. Embora muitas vezes esse aspecto seja negligenciado em empresas menores, é sabido que os custos de manutenção são de extrema importância e muitas vezes determinam o sucesso de todo um empreendimento. Ainda de acordo com Almeida [1], “os custos de

manutenção podem representar entre 15% a 30% do custo dos bens produzidos”. Isso faz com que a importância econômica da gerência de manutenção seja vital para o desempenho financeiro de uma planta fabril. O autor ainda cita que nas indústrias siderúrgicas, de papel e celulose, e outras indústrias pesadas, a manutenção pode representar até 30% dos custos totais de produção.

Os dados apresentados em [1] ressaltam que recentes pesquisas da efetividade da gerência da manutenção indicam que um terço de todos os custos de manutenção é desperdiçado como resultado de manutenção desnecessária ou inadequadamente realizada, influenciando diretamente na competitividade da indústria.

Por isso é necessário que se trabalhe sempre com dados e fatos que quantifiquem claramente a necessidade e os métodos necessários para se realizar a manutenção, e também o caminho a ser seguido (manutenção corretiva, preventiva ou preditiva), pois os custos envolvidos no mesmo também variam. Para o caso específico de motores elétricos os custos de manutenção quando empregado técnicas preditiva são aproximadamente metade dos custos de manutenção corretiva, como será apresentado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Custo de Manutenção Médio por Filosofia Adotada

<b>Tipo de Manutenção</b>	<b>Custo US\$/hp/ano</b>
Corretiva	17 a 18
Preventiva	11 a 13
Preditiva	7 a 9

Fonte: [2]

Felizmente, muitas ferramentas vêm sendo desenvolvidas para reduzir tal custo. O pleno desenvolvimento da informática e da computação embarcada, por exemplo, permite que se monitore a condição operativa de equipamentos fabris, de maquinaria, e de sistemas, oferecendo assim meios para se gerenciar a operação da manutenção. Eles têm capacitado o pessoal técnico a reduzir ou eliminar reparos desnecessários, evitar falhas catastróficas da máquina e reduzir o impacto negativo da operação da manutenção sobre o rendimento da planta industrial.

Os próximos tópicos explicarão sucintamente os tipos de manutenção, a fim de que se possam esclarecer as diferenças entre as diversas linhas, e quais os impactos diretos diante do exposto acima.

### 2.1.1 Manutenção Corretiva

Baseia-se na atuação em um determinado equipamento para correção de falha ou quando o mesmo não apresenta o rendimento esperado. Pela simplicidade de sua filosofia e pela falta de gestão presente em muitas plantas fabris, ainda é o que mais acontece.

Uma planta industrial usando gerência por manutenção corretiva não gasta qualquer dinheiro com manutenção, até que uma máquina ou sistema falhe, tendo uma postura totalmente reativa. A reação à falha da máquina ou equipamento configurara o método mais caro de gerência de manutenção.

Poucas plantas industriais usam uma filosofia verdadeira de gerência por manutenção corretiva. Em quase todos os casos, as plantas industriais realizam tarefas preventivas básicas, como lubrificação e ajustes da máquina, mesmo em um ambiente de manutenção corretiva. Entretanto, neste tipo de gerência, as máquinas e outros equipamentos da planta industrial não são revisados e não são feitos grandes reparos até que o equipamento falhe em sua operação.

Segundo Almeida [1], o velho adágio de que as máquinas se quebrarão na pior hora possível é uma parte muito real da manutenção de plantas industriais, pois normalmente a quebra ocorrerá quando as demandas de produção forem as maiores. O pessoal de manutenção deve então reagir à falha inesperada. Neste modo de manutenção reativa, a máquina é desmontada e inspecionada para determinar os reparos específicos requeridos para retorná-la ao serviço. Se as peças de reparo não estiverem no estoque, elas devem ser encomendadas, a custos de mercado, e deve ser solicitado o envio expedito.

Mesmo quando as peças de reparo já estão no estoque da planta industrial, o tempo de mão-de-obra para reparo e o custo são muito maiores neste tipo de manutenção reativa. O pessoal de manutenção deve desmontar toda a máquina para localizar a fonte do problema ou problemas que forçaram a falha. Admitindo que eles identifiquem corretamente o problema, o tempo requerido para desmontar, reparar, e remontar a máquina seria, pelo menos, maior do que teria sido requerido por um reparo planejado.

Conforme enfatiza Levitt [3], os maiores custos associados com este tipo de gerência de manutenção são: altos custos de estoques de peças sobressalentes, altos custos de trabalho extra, elevado tempo de paralisação da máquina e baixa disponibilidade de produção.

### 2.1.2 Manutenção Preventiva

Os programas de manutenção preventiva são gerenciados pelo tempo de operação de uma determinada máquina/ equipamento. Em outras palavras, as tarefas de manutenção se baseiam em tempo gasto ou horas operacionais. A conhecida curva do tempo médio para falha indica que uma máquina nova tem uma alta probabilidade de falha, devido a problemas de instalação, durante as primeiras semanas de operação. Após este período inicial, a probabilidade de falha é relativamente baixa por um período prolongado de tempo.

Após este período normal de vida da máquina, a probabilidade de falha aumenta abruptamente com o tempo transcorrido. Na gerência de manutenção preventiva, os reparos ou recondiçionamentos da máquina são programados baseados na estatística de falhas da máquina.

A implementação da manutenção preventiva real varia bastante. Alguns programas são extremamente limitados e consistem de lubrificação e ajustes menores. Conforme Almeida [1], os programas mais abrangentes de manutenção preventiva programam reparos, lubrificação, ajustes, e recondiçionamentos de máquinas para toda a maquinaria crítica na planta industrial. O denominador comum para todos estes programas de manutenção preventiva é o planejamento da manutenção x tempo.

Todos os programas de gerência de manutenção preventiva assumem que as máquinas degradarão com um quadro de tempo típico de sua classificação em particular. O exemplo apresentando em [1] ilustra bem essa situação: uma bomba centrífuga, horizontal, de estágio simples normalmente rodará 18 meses antes que tenha que ser revisada. Usando técnicas de gerência preventiva, a bomba seria removida de serviço e revisada após 17 meses de operação.

O problema com esta abordagem é que o modo de operação e variáveis específicas da planta industrial ou do sistema afetam diretamente a vida operacional normal da maquinaria. O tempo médio entre as falhas não será o mesmo para uma bomba que esteja trabalhando com água e uma bombeando polpas abrasivas de minério. O resultado normal do uso da estatística para programar a manutenção ou é um reparo desnecessário ou uma falha catastrófica. No exemplo, a bomba pode não precisar ser recondiçionada após 17 meses. Conseqüentemente, a mão-de-obra e o material usado para fazer o reparo foram desperdiçados. O segundo cenário da manutenção preventiva é ainda mais caro. Se a bomba falhar antes dos 17 meses, força-se o conserto usando técnicas corretivas, sofrendo-se assim todos os impactos explicitados no tópico anterior.

### **2.1.3 Manutenção Preditiva**

De acordo com Almeida [1], em programas de manutenção preditiva, o modo específico de falha pode ser identificado antes da falha. Portanto, as peças corretas para reparo, ferramentas, e habilidades da mão-de-obra podem estar disponíveis para corrigir o problema da máquina antes da ocorrência de falha catastrófica.

Talvez a diferença mais importante entre manutenção corretiva ou reativa e preditiva seja a capacidade de se programar o reparo quando ele terá o menor impacto sobre a produção.

A premissa comum da manutenção preditiva é que o monitoramento regular da condição real, além o rendimento operacional e outros indicadores da condição operativa das máquinas e sistemas de processo fornecerão os dados necessários para assegurar o intervalo máximo entre os reparos. Ela também minimizaria o número e os custos de paradas não-programadas criadas por falhas da máquina.

No entanto, conforme Almeida [1] explica, essa premissa é demasiadamente simples para caracterizar o que hoje é conhecimento como manutenção preditiva. A mesma trata-se de um meio de se melhorar a produtividade, a qualidade do produto, o lucro, e a efetividade global de nossas plantas industriais de manufatura e de produção.

Um programa abrangente de manutenção preditiva utiliza uma combinação das ferramentas mais efetivas em custo para obter a condição operativa real de sistemas críticos da planta industrial e, baseado-se nestes dados reais, todas as atividades de manutenção são programadas numa certa base “conforme necessário”.

A escolha das técnicas específicas do programa de manutenção preditiva como MCSA, análise de vibrações, termografia etc., dependerá do tipo de equipamento da planta, seu impacto sobre a produção e outros parâmetros chaves da operação da planta industrial, e dos objetivos que se deseja que o programa de manutenção preditiva atinja.

### **2.1.4 Segmentos de Mercado e suas Filosofias de Manutenção**

Como explicado em 2.1.1, a aplicação de determinada filosofia depende muito de fatores associados. Assim, é interessante caracterizar-se o percentual de cada filosofia de manutenção adotada em cada segmento de indústria, pois de Seixas [2] o mesmo varia de acordo com o ramo industrial em questão, conforme pode-se ver na tabela 2.2.



Tabela 2.2 – Filosofia de Manutenção por Setor Industrial

<b>Setor</b>	<b>Manutenção Corretiva</b>	<b>Manutenção Preventiva</b>	<b>Manutenção Preditiva</b>
Alimentos e Bebidas	46,73	23,36	29,91
Automotivo e Metalúrgico	30,08	24,74	45,18
Borracha e Plástico	33,33	35,8	30,87
Cimento e Construção Civil	28	48	24
Eletroeletrônica e Telecomunicações	55,1	30,61	14,29
Energia Elétrica	10,25	47,36	42,38
Farmacêutico	49,09	41,82	9,09
Fertilizantes, agroindústria e químico	28,45	29,74	41,81
Hospitalar	27,92	34,52	37,57
Móveis e Divisórias	40,82	53,06	6,12
Máquinas e Equipamentos	46,67	20	33,33
Mineração	17,35	34,69	47,96
Papel e celulose	22,34	36,17	41,49
Predial	37,5	31,25	31,25
Petróleo	33,61	33,94	32,44
Petroquímico	32,97	35,16	31,86
Saneamento e serviços	26,04	33,14	40,83
Siderúrgico	12,58	49,42	37,39
Têxtil	29,41	58,82	11,76
Transporte	21,62	43,24	35,14
Média	28,05	35,67	36,28

Fonte: [2]

Vê-se que a manutenção corretiva tem grande utilização na indústria de alimentos, enquanto que no metalúrgico e mineração o maior percentual adotado é o de manutenção preventiva/preditiva.

Isso pode ser explicado por fatores econômicos: o custo do valor agregado de uma parada de máquina. Exemplificando: uma hora de parada de uma máquina de mineração gera muito mais perdas (em dinheiro) do que uma hora de parada de uma linha de produção de macarrão, por exemplo.

## 2.2 Motores de Corrente Contínua

Primeiramente, a fim de se revisar as fundamentações teóricas que levam ao desenvolvimento das técnicas de análise de motores, faz-se uma descrição sucinta das partes constituintes do mesmo, com foco voltado às suas possíveis falhas e características de manutenção.

### 2.2.1 Partes constituintes e possíveis falhas

Basicamente o Motor de Corrente Contínua (chamados daqui para frente de MCC) é constituído por:

a) Rotor - Parte girante da máquina, montada sobre o eixo da máquina, construído de um material ferromagnético envolto em um enrolamento chamado de enrolamento de armadura, o qual suporta alta corrente, e o anel comutador. As partes constituintes da mesma são:

Rotor com Enrolamento - Centrado no interior da carcaça, é constituído por um pacote de chapas de aço silício laminadas, com ranhuras axiais na periferia para acomodar o enrolamento da armadura. Este enrolamento está em contato elétrico com as lâminas do comutador. Quando esses enrolamentos apresentam curto-circuito ou são interrompidos o motor tende a falhar a sua partida ou sobreaquecer (a descrição dos efeitos de falhas encontra-se na tabela 2.3).

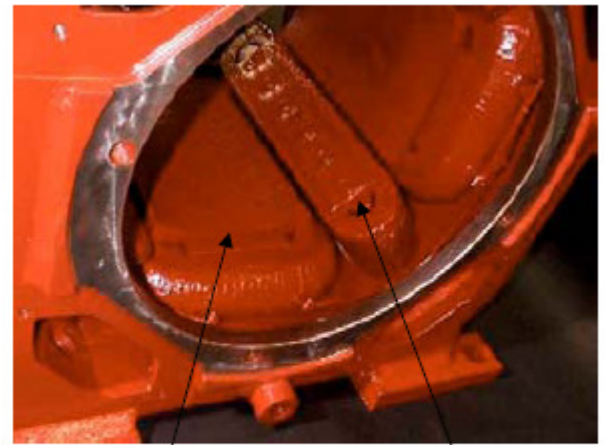
Comutador - É o conversor mecânico que transfere a energia ao enrolamento do rotor. O comutador é constituído de lâminas de cobre isoladas uma das outras por meio de lâminas de mica. Falhas no mesmo, como a sua ovalização, presença de sujeira e montagem mecânica errônea levam ao faiscamento (também chamado de centelhamento) das escovas.

Eixo - É o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

b) Estator - Parte estática da máquina, montada em volta do rotor, de forma que o mesmo possa girar internamente. O mesmo também é constituído de material ferromagnético envolto em um enrolamento de baixa potência chamado de enrolamento de campo, que tem a função apenas de produzir um campo magnético fixo, para interagir com o campo da armadura.



a) Rotor



pólo

interpolo

b) Estator

Figura 2.1 – Partes Principais do Motor de Corrente Contínua [4]

O estator, por sua vez, é formado por:

Carcaça - É a estrutura suporte do conjunto. Tem também a finalidade de conduzir o fluxo magnético.

Pólos de excitação - Têm a finalidade de gerar o fluxo magnético. São constituídos de condutores enrolados sobre núcleos de chapas de aço laminadas, cujas extremidades possuem um formato que se ajusta a armadura e são chamadas de sapatas polares. Caso o seu circuito esteja interrompido o motor poderá não realizar a sua partida, rodar acelerado e/ ou oscilar na presença de carga. Um curto-circuito provocará um sobreaquecimento no motor.

Pólos de comutação (interpolo) - São colocados na região interpolar e são percorridos pela corrente de armadura. Sua finalidade é compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação, evitando o deslocamento da linha neutra em carga, reduzindo a possibilidade de faiscamento.

Enrolamento de Compensação - É um enrolamento distribuído na periferia da sapata polar e percorrido pela corrente de armadura. Sua finalidade é também compensar a reação da armadura, mas agora em toda periferia do rotor, e não somente na região transversal. Evita o aparecimento de faíscas provocadas por uma diferença de potencial entre as espiras devido à distribuição não uniforme da indução no entreferro.

Conjunto Porta-Escovas e Escovas - O porta-escovas permite alojar as escovas e está montado de tal modo que possa ser girado para o ajuste da zona neutra. As escovas são

compostas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira, pressionadas por uma mola, proporcionando a ligação elétrica entre a armadura e o exterior. Caso não se encontrem na zona-neutra pode-se ter dificuldade para partir o motor, dificuldade para o mesmo “aceitar” carga.

A figura 2.2 mostra o desenho de um motor de corrente contínua completo:

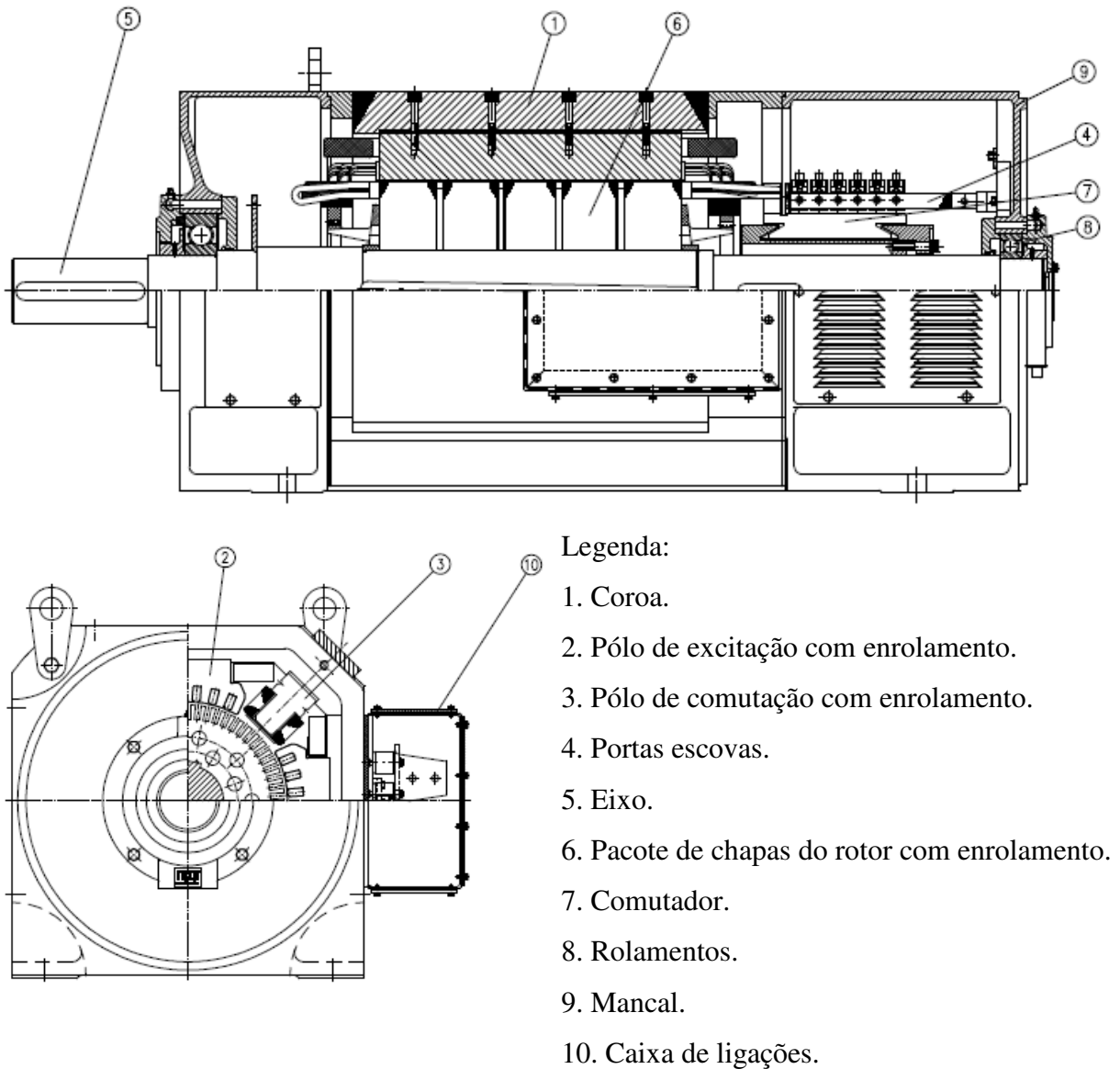


Figura 2.2 – Partes constituintes do Motor de Corrente Contínua [33]

A tabela 2.3 apresenta as avarias mais comuns relativas aos motores de corrente contínua, de acordo com a parte constituinte do mesmo.

Tabela 2.3 – Principais defeitos de motores de corrente contínua

<b>Parte Constituinte</b>	<b>Falha apresentada</b>	<b>Efeito</b>
Armadura	Circuito interrompido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não parte em vazio</li> </ul>
	Em curto-circuito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parte com solavancos</li> <li>• Não desenvolve torque/ velocidade na presença de carga</li> <li>• Sobreaquecimento</li> </ul>
Campo	Circuito interrompido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não parte</li> <li>• Roda acelerado e oscila quando está sob carga</li> </ul>
	Em curto-circuito	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobreaquecimento</li> </ul>
Comutador	Ovalização Sujeira Presença de estrias Isolação insuficiente Mau-contato entre o terminal e o porta-escovas Escovas desgastadas Posicionamento mecânico inadequado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presença de faiscamento</li> </ul>
Porta-Escovas	Deslocamento da zona neutra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não parte em vazio</li> <li>• Não desenvolve torque/ velocidade na presença de carga</li> <li>• Aceleração fora do especificado</li> </ul>

Fonte: Adaptado de ALMEIDA [42]

Vê-se pela tabela 2.3 que as principais falhas em máquinas de corrente contínua geram efeitos bastante semelhantes, dificultando a identificação de onde realizar a manutenção corretiva, justificando-se também por esse fato o desenvolvimento de técnicas preditivas que possibilitem acompanhar e aprofundar-se na análise de falhas de motores.

### 2.2.2 Pontes Retificadoras

A função desses circuitos é a conversão de tensão e corrente de formas senoidais

alternadas para energia de forma contínua, como é necessário para a alimentação do MCC, foco desse estudo. Nessa aplicação faz-se a retificação sobre sinais trifásicos a fim de convertê-los em um sinal de tensão e corrente contínuas. Para isso geralmente utiliza-se uma ponte de 6 pulsos, apresentada na figura 2.3.

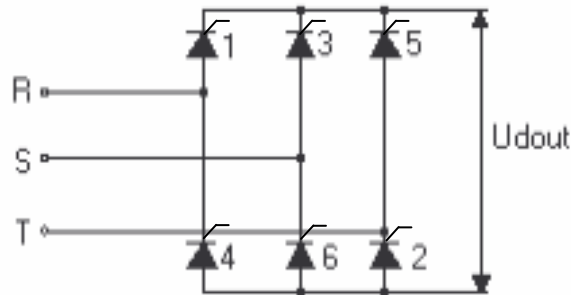


Figura 2.3 – Ponte de 6 Pulsos [5]

Na figura 2.3 a tensão  $U_{dout}$  é a tensão resultante da retificação, aplicada aos terminais do MCC. No entanto, tem-se que a tensão  $U_{dout}$  não é perfeitamente DC, em decorrência das características da própria retificação do sinal senoidal, ficando remanescente no mesmo uma componente AC, chamada de *ripple*.

A figura 2.4 demonstra o resultado da retificação da onda, onde o sinal na parte superior do gráfico é o resultado da retificação dada pela ponte:

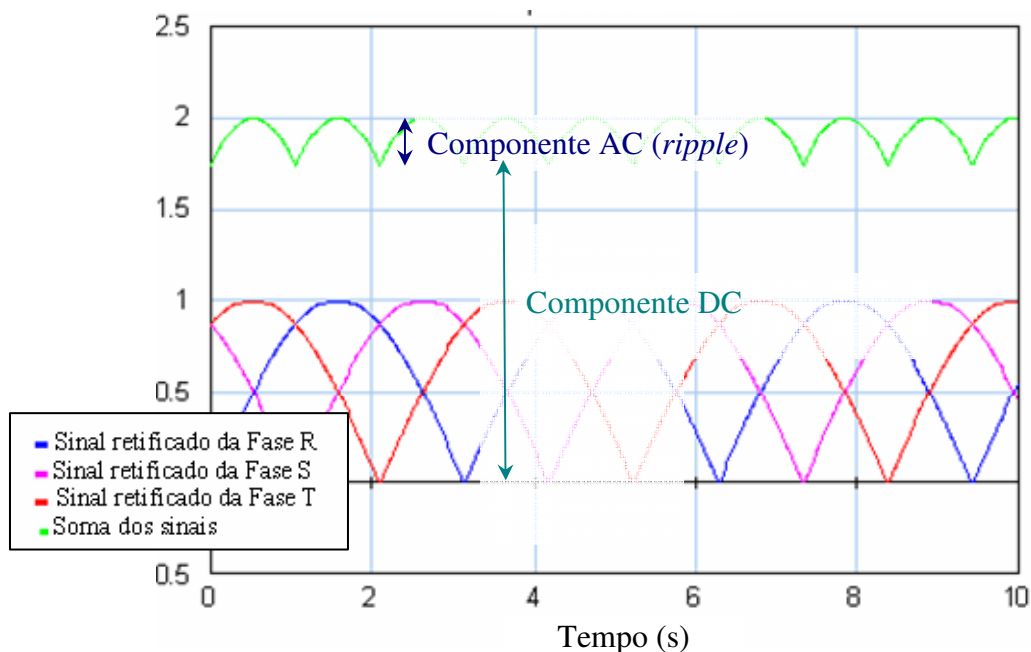


Figura 2.4 – Aspecto do Resultado da Retificação [5]

Sobre esse sinal é que incidirá a análise de Fourier, apresentada no tópico a seguir, para que assim se possa obter as componentes que caracterizarão, futuramente, a assinatura de falhas utilizada em MCSA.

## **2.3 O Processamento do Sinal de Corrente**

Como será visto no capítulo 3, o processamento dos sinais em MCSA basicamente objetiva identificar no seu espectro de frequências quais as fontes dessas frequências e assim caracterizar a presença ou não de uma determinada falha. Assim, é interessante que se tenha em mente que existem outros fatores que incidem sobre o espectro de frequência da corrente coletada do motor, sendo um dos fatores a geração de harmônicas quando da retificação da corrente trifásica senoidal para a forma de corrente contínua.

### **2.3.1 Harmônicos**

Conforme Martin [25], componentes harmônicas são elementos da série de Fourier os quais podem ser usados para formar quaisquer formas de onda periódicas. De acordo com [8], correntes e tensões harmônicas são criadas por cargas não-lineares conectadas a sistemas de distribuição de energia. A distorção harmônica é uma forma de poluição elétrica, que pode vir a causar problemas caso a soma dessas harmônicas aumentar além de valores consideráveis.

O princípio de como as componentes harmônicas estão presentes em determinados sinais pode ser verificado na figura 2.5, onde apenas um determinado quinto harmônico em adição à fundamental:

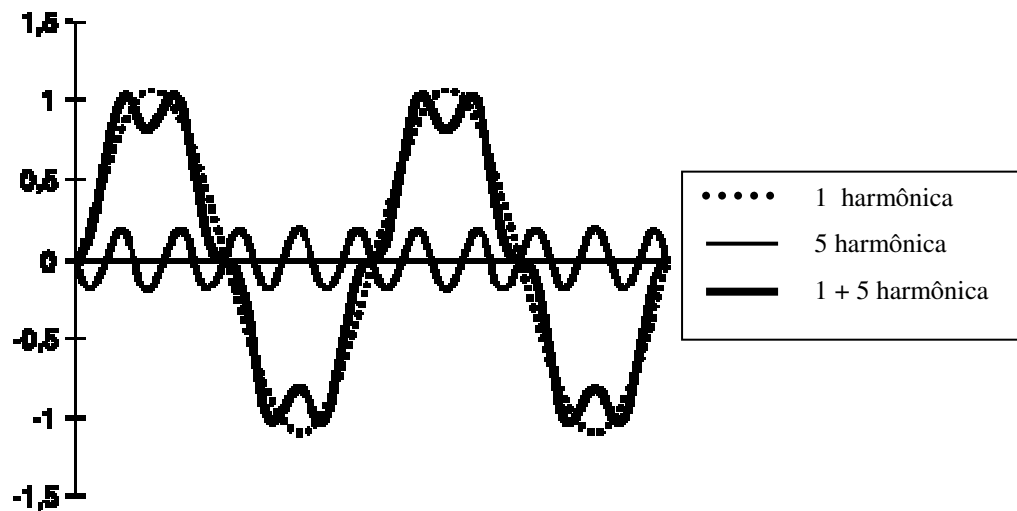


Figura 2.5 – Soma da primeira e quinta harmônicas

No caso desse estudo, será visto adiante que a assinatura de falhas utilizada no MCSA é constituída pela análise das harmônicas presentes no sinal de corrente do motor. Entretanto, o conceito de harmônica é particularmente importante quando se analisa as componentes decorrentes da alimentação e da retificação dos sinais para o motor de corrente contínua.

### 2.3.2 Análise de Fourier Aplicada

Visto o conceito de harmônicos, apresenta-se nesse tópico sucintamente a análise de Fourier, ferramenta essa que permite separar os harmônicos para posterior estudo.

A análise Fourier realiza a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio frequência, possibilitando-se assim a análise de vibrações e principalmente na aplicação prática com MCSA - *Motor Current Signature Analysis*.

Para isso, é interessante que se saiba que um sinal de corrente retificada apresenta diversas harmônicas em suas componentes. O resultado direto disso é que a análise de Fourier do sinal de corrente proveniente de pontes retificadoras apresentará diversas componentes “espalhadas” em seu espectro de frequência.

A transformada de Fourier permite decompor esse sinal em diversos sinais de acordo com suas frequências, como demonstrado didaticamente na figura 2.6.



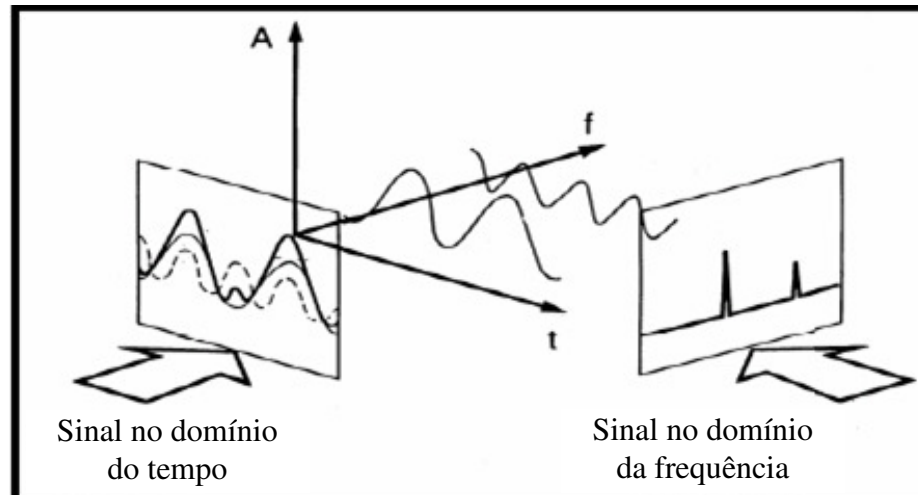


Figura 2.6 – Sinal x Decomposição em Frequências do Mesmo

Fonte: [7]

Pela figura 2.6 pode-se ver a decomposição de um sinal originalmente no domínio do tempo para o domínio da frequência, tendo representado nesse domínio a magnitude das componentes no eixo y (representado por “A” no gráfico), e a frequência no eixo x. Essa ferramenta é particularmente útil quando aplicada à corrente do motor na técnica de manutenção preditiva MCSA, e também na análise de vibrações.

Assim, é interessante que se apresentem alguns conceitos relacionados à análise de Fourier aplicada às técnicas de processamento de sinais para manutenção preditiva, apresentados pelos trabalhos de Pickens [17] e Bonaldi [18]:

- **Componente Fundamental:** É a frequência fundamental do elemento a ser estudado. Em análise de vibrações é a velocidade de rotação, representada por 1X. Em MCSA geralmente é dada pela frequência da rede (60 Hz);
- **Harmônicas e múltiplos:** As harmônicas correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental. Em análise de sinais advindos de corrente alternada, geralmente a primeira harmônica é dada por 60 Hz, a segunda harmônica por 120 Hz e assim por diante. Os símbolos 1X e 2X, comumente utilizados em análise de vibrações, representam respectivamente 1X a frequência de rotação e 2X a frequência de rotação do sistema;
- **Variações de frequência ao longo do tempo:** Para que se obtenha uma decomposição de frequências que não se altere ao longo da coleta do sinal a ser decomposto, a técnica de FFT recomenda que o sinal a ser transformado seja

estacionário. Esse fato tem diversas implicações práticas na aplicação das técnicas descritas nos próximos capítulos, em especial na necessidade de se fazer a coleta de dados para futura análise com a máquina estando com a mínima variação de carga possível no motor a ser estudado.

### 3 MANUTENÇÃO PREVENTIVA E PREDITIVA DE MOTORES

O capítulo anterior evidencia a importância de se aplicar as técnicas de manutenção preventivas e preditivas nas máquinas elétricas, visando-se assim diminuir os custos de manutenção e impactos no sistema produtivo.

Diante disso, conforme explica Humphrey [9], as empresas estão utilizando atualmente uma conjunção das técnicas como termografia por infravermelho, ultrassom, vibração, MCA, MCSA, etc., em programas avançados de manutenção de motores.

No entanto, diante da complexidade das técnicas, as empresas necessitariam ter diversos especialistas contratados para que as técnicas fossem corretamente aplicadas. Assim, o mesmo autor sugere e descreve casos de sucesso de terceirização para empresas especializadas em manutenção preditiva, as quais têm obtido cada vez mais resultados, gerando menos paradas nas linhas de produção e principalmente menos custos envolvidos para o próprio cliente.

No mesmo artigo, o autor descreve um caso bastante elucidativo de como a conjunção de diversas técnicas é aplicável no ambiente fabril: em uma linha de produção com 5 motores idênticos, um estava mais quente que os demais, sendo isso determinado a partir da análise de termografia. A partir dessa constatação preliminar, aproveitou-se uma parada programada da máquina para se realizar o MCA, chegando-se à conclusão de que não havia nada de errado com a parte elétrica do motor. Com a máquina em questão de volta à operação, partiu-se para a análise de vibração, que determinou que o motor estava apresentando falha em um rolamento.

A tabela 3.1 resume as técnicas e aplicações das mesmas.

<b>Técnica</b>	<b>Princípio básico</b>	<b>Aplicações</b>
Termografia	Mede-se a temperatura da máquina em questão, chegando-se a conclusões básicas sobre sua condição em comparação com outras máquinas semelhantes ou através de histórico da própria.	Em máquinas acessíveis para o raio de visão e/ou onde é possível de se instalar sensores para monitoramento contínuo de temperatura. Essa técnica serve basicamente como diagnóstico preliminar, para que então se proceda com o aprofundamento de análise utilizando-se outras técnicas.

MCA (Motor Circuit Analysis)	Através de aplicação de uma alta tensão, mede-se as grandezas referentes à parte elétrica do motor (resposta em frequência de corrente, resistência de isolamento, etc.)	Também considerada como técnica preventiva, a mesma é utilizada na avaliação da condição elétrica de máquinas, sendo necessária a parada da mesma para se realizar tal avaliação.
Análise de vibrações	Acompanhamento das vibrações de uma determinada máquina, a fim de se obter os graus de severidade e comportamento ao longo de um tempo dos diversos constituintes da mesma. As vibrações podem ser acompanhadas no domínio do tempo, da frequência ou em ambos, quando a análise assim o exigir.	Na detecção de problemas relacionados a componentes mecânicos de maquinários. Com grande aplicação no parque industrial, a mesma é consolidada no acompanhamento de rolamentos.
ESA (Electrical Signature Analysis)	Acompanhamento de assinaturas de tensão e corrente da máquina, considerando que quaisquer distúrbios provenientes tanto do sistema de alimentação quando da própria máquina serão refletidos.	Na detecção de avarias mecânicas e elétricas, no conjunto inteiro de acionamento, com a máquina a ser analisada rodando com carga constante.
MCSA (Motor Current Signature Analysis)	Parte da técnica de ESA, onde se realiza o acompanhamento da assinatura de corrente da máquina, considerando que quaisquer distúrbios (mecânicos e/ou elétricos) influenciarão o fluxo magnético interno e assim refletirão na corrente da mesma.	Na detecção de avarias mecânicas e elétricas, com a máquina a ser analisada rodando com carga constante.

Tabela 3.1 – Descrição sumária das técnicas de manutenção preditiva

O que se segue neste capítulo é a descrição das técnicas, com foco especial na técnica de MCSA, técnica essa bastante eficaz e em pleno desenvolvimento no momento.

### 3.1 Análise Termográfica

Esta técnica é utilizada para detectar problemas em contatos elétricos de chaves, painéis, barramentos e outros componentes utilizando-se uma câmera própria onde são

fotografados os pontos onde foram detectadas anormalidades nas instalações elétricas.

A aplicação da mesma na avaliação de motores de corrente contínua é importante nos painéis elétricos de comando e proteção, detectando possíveis avarias elétricas. Além disso, a termografia permite que, em casos onde o motor é de fácil acesso, o mesmo seja avaliado para detecção de pontos quentes, fornecendo o diagnóstico preliminar do sistema, para então se partir para possíveis paradas para inspeção e/ou utilização de outras técnicas.

A aplicação da análise termográfica é bastante clara em seus resultados, mas em contrapartida a mesma exige que o analista seja experiente e tenha acompanhamento com histórico do sistema a ser analisado.

De acordo com Townsend [11], o analista de termografia caracteriza como pontos de atenção na avaliação de componentes elétricos:

- Qualquer componente com aquecimento superior à 25°C em relação ao ambiente, exceto resistência de aquecimento, alguns núcleos de bobina, lâmpadas acesas e alguns resistores.
- Qualquer equipamento elétrico que, embora não atinja o aquecimento de 25°C em relação ao ambiente, está com temperatura superior à outro equipamento idêntico, nas mesmas condições de carga e trabalho.
- Equipamentos que, embora não possam ser visualizados diretamente pelo termovisor, despertam suspeitas devido ao aquecimento progressivo nos condutores a eles conectados, através de altas emissões de infravermelho por frestas, ou reflexos em paredes laterais. Este caso é comum em garras de disjuntores inacessíveis visualmente. Nesta fase são anotadas temperaturas dos componentes, nas imagens os tons claros correspondem às regiões de maior temperatura e tons escuros correspondem às regiões de menor temperatura.

A figura 3.1 demonstra a aplicação da análise termográfica em um painel, detectando pontos quentes, indicando possível falha em uma das fases de um barramento. Já a figura 3.2 demonstra as condições termográficas de todo um conjunto, mostrando inclusive pontos quentes nas bobinas e no rolamento de um motor.

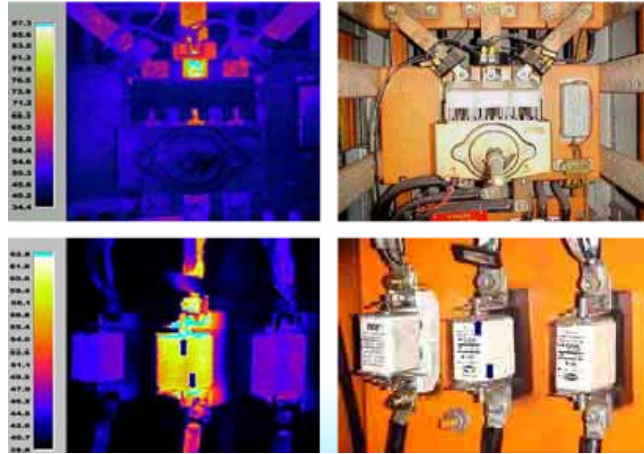


Figura 3.1 – Análise termográfica de um Painel Elétrico [10]

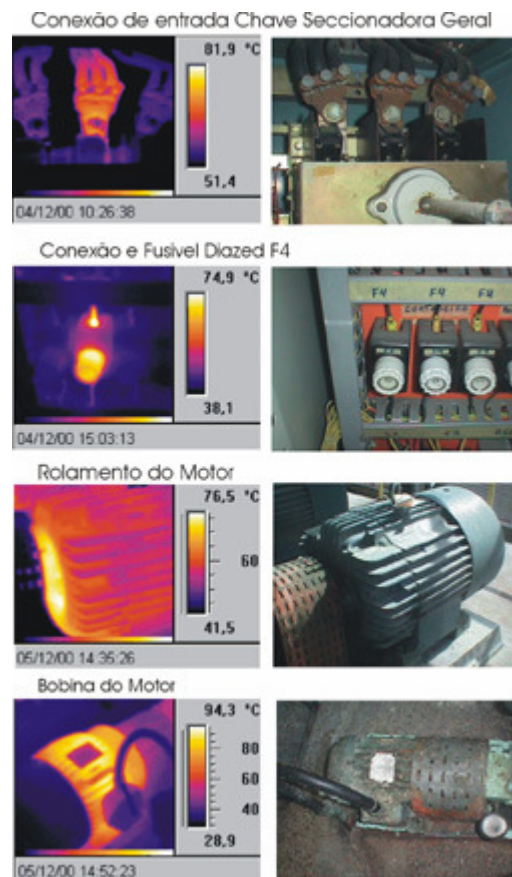


Figura 3.2 – Análise termográfica completa de um Motor [10]

Para aplicações diretamente em motores, uma forma de se utilizar informações térmicas para se fazer a manutenção preditiva é o acompanhamento através de transdutores de temperatura instalados em sua carcaça, dos pontos que são relevantes para o mesmo.

Geralmente acompanha-se a tendência da temperatura de mancais, da armadura, e do estator do mesmo.

### **3.2 MCA (Motor Circuit Analysis) – Teste Estático de Motores Elétricos**

É uma técnica que utiliza as informações de resistência, impedância, indutância, ângulo de fase, resposta em frequência de corrente e isolamento para a terra, tomados com o motor desligado para a detecção de avarias no motor. Configura-se como uma técnica offline e estática, sendo por vezes classificada como técnica preventiva e não preditiva.

De acordo com Penrose [12], a mesma utiliza a avaliação da tendência das grandezas medidas; ou seja, é feita periodicamente, e registrados os seus valores, para em seguida fazer a avaliação das condições atuais e quando é necessária uma possível intervenção.

Conforme explica Penrose [12] [13], faz-se a leitura do campo, caso o mesmo seja um motor compound ou shunt, e posteriormente duas leituras da armadura, para que se elimine ou pelo menos minimize o efeito a contaminação no motor, como por exemplo por carbono, que pode causar capacitâncias instáveis entre espiras ou entre condutores e terra, gerando como resultado impedâncias não repetitivas.

Na tendência, a resistência deve ser normalizada para valores condizentes com a temperatura ambiente e não deve mudar mais do que 3%. Mudanças na impedância e na indutância, as quais não necessitam de correção na temperatura, também não devem mudar mais do que 3% entre leituras.

As leituras de ângulo de fase e de resposta em frequência da corrente não necessitam de correção em relação à temperatura, não sofrendo mudanças de mais do que um ou dois dígitos entre testes consecutivos. Caso isso esteja ocorrendo, é sinal do que há uma falha de isolamento, conforme é explicado em [12].

Essa técnica é bastante difundida e consolidada no mercado, sendo atualmente a principal ferramenta de avaliação da parte elétrica dos motores existentes no parque industrial. A mesma exige que se faça acompanhamento de histórico, não sendo possível a tomada de decisões baseada somente em poucas leituras.

Outra desvantagem apresentada é que a mesma não permite a avaliação do motor com o mesmo estando ligado e em operação. Necessita-se, portanto, programar a realização da mesma em manutenções onde toda a máquina onde o motor se encontra está desligada, sendo por isso chamada de teste estático da máquina em questão.

### 3.3 Análise de Vibrações

A análise de vibrações é uma das formas mais conhecidas de manutenção preditiva, sendo bem difundida. Ela baseia-se no acompanhamento de valores de vibrações para se prosseguir com o diagnóstico do sistema, considerando que quaisquer distúrbios mecânicos refletirão na vibração da máquina a ser avaliada, na frequência em que o elemento rotativo associado esteja.

De acordo com Bonaldi [28], vibração pode ser definida como a oscilação de um corpo em torno de uma posição de referência. Trata-se frequentemente de um processo destrutivo, ocasionando falhas nos elementos das máquinas por fadiga. Além disso, a vibração é a resposta às forças dinâmicas que atuam na máquina, que por sua vez, vibra em várias frequências que se propagam por toda a máquina. Estas frequências podem ser identificadas e, na maioria das vezes, relacionadas a um tipo de falha, constituindo assim a assinatura da mesma.

Conforme explica Almeida [14], aplicações típicas são em desbalanceamento de componentes como polias, rotores, etc; desalinhamento; desgastes de rolamentos; folgas em mancais e falta de rigidez de bases e estruturas, ajudando a encontrar a origem e a criticidade da vibração de equipamentos rotativos.

Os conceitos de fundamental e harmônica são os mesmos apresentados em 2.3.1, embora o foco agora seja em espectros de aceleração, velocidade e deslocamento dados utilizados na análise de vibrações.

Justamente pelo fato da análise de vibrações ser uma técnica bastante conhecida, a mesma se encontra bastante documentada, encontrando-se referências que apresentam bastante desenvolvimento em suas aplicações, como é descrito em Scheffer e Girdhar [15] e Pickens [17].

Os artigos em questão explicitam que frequentemente a análise no domínio do tempo não é suficiente para quaisquer análises, por isso utiliza-se acompanhamento na frequência tanto na forma de assinaturas de falhas em uma só coleta (técnica conhecida como *troubleshooting*), quanto na forma de tendência histórica, a fim de se acompanhar a degradação da máquina.

A figura 3.3 traz um exemplo de *troubleshooting*, enquanto que a figura 3.4 é resultado de diversas coletas, podendo-se realizar o diagnóstico através do acompanhamento histórico da assinatura de vibração da componente suspeita de falha.



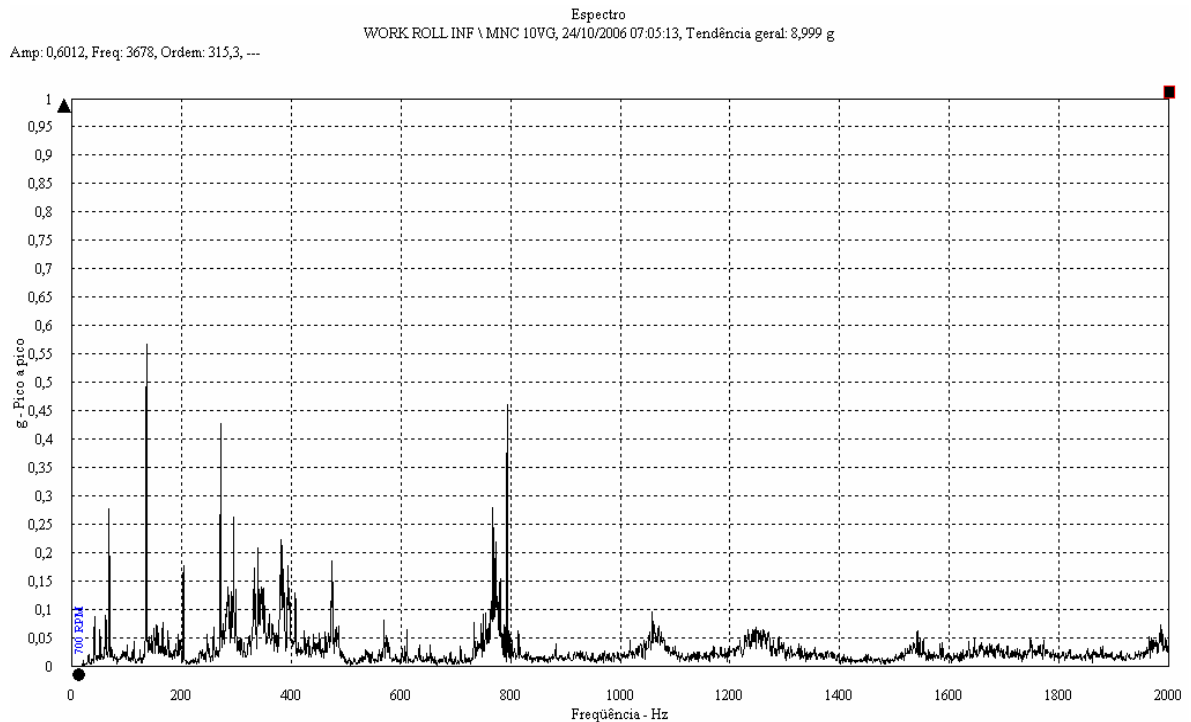


Figura 3.3 – Exemplo de medida de vibração (domínio da frequência)

Fonte: Coleta em Campo – Novelis do Brasil - Pindamonhangaba

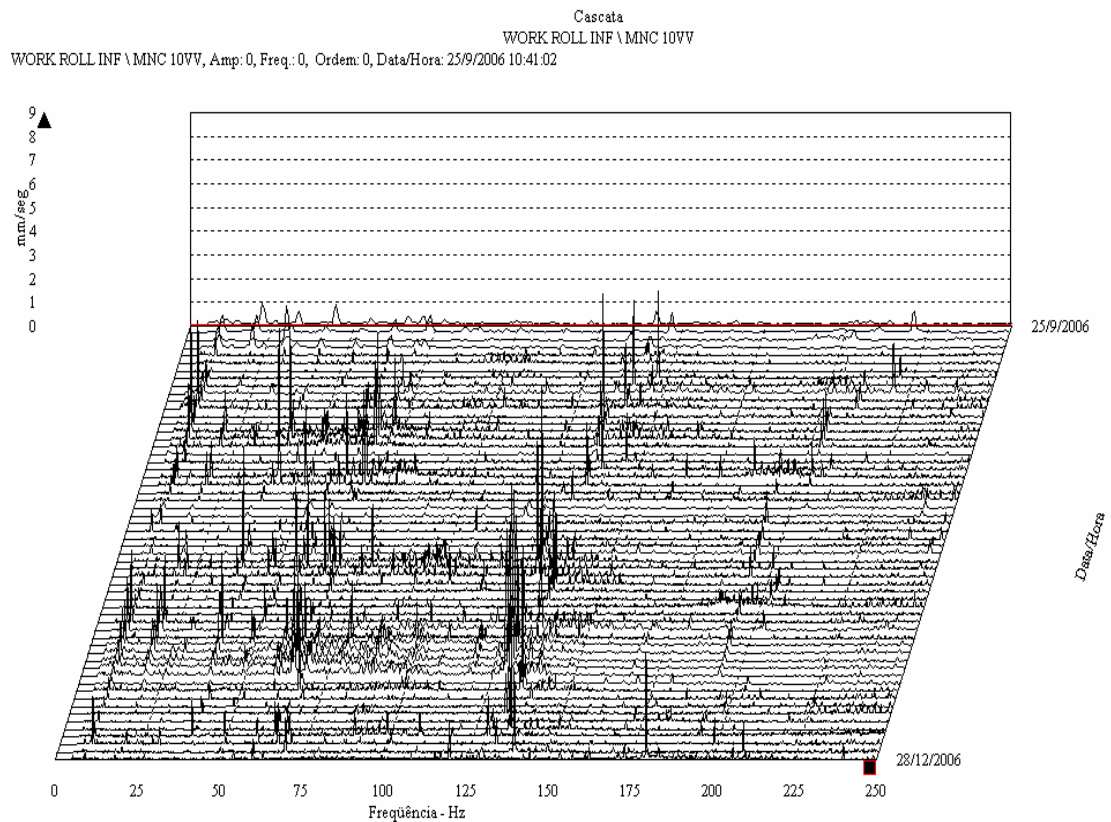


Figura 3.4 – Exemplo de medida de vibração em diversas coletas

Fonte: Coleta em Campo – Novelis do Brasil, Pindamonhangaba

O analista de vibrações faz a sua análise histórica através de diversas coletas, focando a assinatura de uma determinada falha. Através de valores pré-determinados de alarme desenvolvidos através de experiência na planta chega-se a conclusões que façam intervir ou não na máquina em questão.

Por vezes, para as chamadas frequências conhecidas (conforme pode ser conferido em [18], ou na tabela 3.1 a seguir), o mesmo se utiliza de dados da coleta e de cálculos matemáticos para se determinar as frequências de interesse que formarão a sua base histórica de tendência dos valores. Alguns de componentes mecânicos fornecem também as chamadas cartas de severidade, que auxiliam o especialista a determinar o grau de severidade da falha em estudo.

<b><i>Frequência</i></b>	<b><i>Causa Provável</i></b>	<b><i>Outras Causas Possíveis</i></b>
Rotação (1X)	Desbalanceamento	Desalinhamento, rotor empenado, ressonância, sistema de transmissão excêntrico, forças recíprocas, problemas elétricos.
Segunda harmônica (2X)	Perdas mecânicas	Desalinhamento (em especial no sentido axial), forças recíprocas, ressonância, rolamento frouxo ou partido
Terceira harmônica (3X)	Desalinhamento	Problemas elétricos, air gap, parte da máquina
4X	Problemas de acoplamento	Rolamento frouxo, ressonância
5X	Parte da máquina	Rotação de pás na bomba.
6X	Parte da máquina	Passagem de pá, rotor escorregando no eixo.
De 38% a 48% da 1X	Óleo	Lubrificação
Frequência da Linha – 60 Hz	Problemas elétricos	Barras quebradas, rotor excêntricos, air gap desigual, fases desbalanceadas, quebra da isolamento
120 Hz	Problema no Rotor	Ressonância no rotor, torque pulsante
Frequências harmônicas maiores	Engrenagens	Cavitação em bombas
Frequências maiores não harmônicas	Rolamentos ruins	Lubrificação, pista interna ou externa de rolamentos

Tabela 3.1 – Guia para Análise de Vibrações [17]

Atualmente, os softwares existentes no mercado que auxiliam nesta análise trazem diagnósticos bastante precisos, utilizando-se para isso de bancos de dados com informações sobre as frequências relacionadas à rotação do sistema em questão e frequências fundamentais

referentes a diversas partes do mesmo (dando-se bastante foco aqui na análise de vibrações de rolamentos).

Para o analista, é importante que se tenha experiência e conhecimento suficientes para analisar e caracterizar o problema e o momento ideal para se realizar a intervenção, já que nem todas as componentes têm cartas de severidade bem definidas.

Dentre as vantagens apresentadas pela técnica de análise de vibrações, destacam-se:

- Acompanhamento *online* do sistema: Para esta técnica ser utilizada, é necessário que a máquina esteja rodando em condições normais para que a coleta de dados seja feita. Isso faz com que a mesma seja bastante vantajosa em linhas de produção com poucas paradas para acompanhamento e inspeção dos equipamentos.
- Disseminação de informações sobre a mesma: Como a análise de vibrações é uma técnica bastante conhecida e difundida, encontram-se no mercado diversas empresas prestadoras de serviço com este “know-how”, sendo essa componente-chave para a estrutura da manutenção planejada. Além disso, para a formação de especialistas, há diversos livros, artigos e mesmo cursos disponíveis.
- Eficácia: A mesma é bastante eficaz na detecção de falhas incipientes em avarias mecânicas, bastando para isso utilizar sensores adequados para o equipamento a ser avaliado, e tendo-se bastante olhar crítico no mesmo.

No entanto, a mesma também tem desvantagens:

- Não-aplicabilidade em falhas elétricas: Como a técnica é baseada no acompanhamento de falhas relacionadas à componentes mecânicos, a mesma dificilmente consegue detectar uma possível avaria em um constituinte elétrico da máquina. Em motores de corrente contínua, por exemplo, a mesma não pode ser utilizada para acompanhamento das condições de isolamento.
- Dificuldade em locais de difícil acesso: A aplicação da técnica baseia-se no acompanhamento *online* com sensores (acelerômetros, na maioria dos casos), instalados diretamente na máquina. Isso faz com que seja impossível a sua utilização em motores que estão em locais de difícil acesso, sendo sua aplicação bastante restrita em plantas onde não é possível ter acesso diretamente a motores e bombas submersas.
- Diagnóstico na presença de inversores: De acordo com Bonaldi [28], a análise espectral do sinal de vibração fica bastante prejudicada quando da presença de

inversores de frequência.

- Dificuldade de se realizar em cargas variáveis: Com cargas variáveis, o espectro de frequência pode apresentar variações ao longo do tempo (advindo isso da não-aplicabilidade da técnica de transformada de Fourier em sinais não estacionários). Por isso, a sua utilização seria bastante prejudicada em cargas com variações bruscas.
- Necessidade de análise de vários sinais: na maioria das vezes o analista de vibração trabalha com sinais de vários acelerômetros instalados na máquina para se chegar ao diagnóstico do problema. Estes acelerômetros podem chegar ao total de nove ou mais, nas posições horizontal, vertical e axial em dois ou três pontos do sistema.

### 3.4 Técnica de MCSA

Até agora, apresentou-se, sem objetivar nenhuma profundidade no assunto, as técnicas que são disseminadas e com vasta bibliografia e referências disponíveis, visto que existem artigos sobre análise de vibrações para manutenção preditiva desde os anos 70 e as técnicas de Motor Circuit Analysis (MCA) e termográficos tiveram importante desenvolvimento nos anos 90, impulsionados pelo advento da informática.

No entanto, as técnicas que se baseiam cada vez mais em processamento digital de sinais e *soft-computing*<sup>1</sup> ainda têm muito para serem desenvolvidas e exploradas, sendo esse o caso do MCSA (Motor Current Signature Analysis), que irá ser debatido e utilizado na avaliação prática desse trabalho.

MCSA é a técnica usada para analisar e acompanhar a tendência de sistemas energizados dinâmicos, sendo por isso também chamado de teste dinâmico, em contrapartida ao MCA que é um teste estático.

A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliará a equipe de manutenção preditiva da planta industrial na identificação de diversos problemas relacionados a componentes eletromecânicos do motor, de sua forma de transmissão e até de sua carga. Assim, a mesma é definida em [18] como:

---

<sup>1</sup> *Soft-computing* : Conjunto de técnicas de ciência de computação, em especial de inteligência artificial. Exemplos: lógica fuzzy, swarm intelligence, algoritmos genéticos e redes neurais. Essas técnicas estão sendo cada vez mais aplicadas na análise dados, inclusive sobre coletas de vibrações e correntes, por exemplo, para se desenvolver o acompanhamento inteligente de sistemas.

“MCSA uma técnica não-invasiva de diagnóstico de problemas em motores de indução trifásicos. Ela consiste da utilização da análise espectral do sinal de corrente de uma das fases do estator. Quando uma falha está em desenvolvimento, o espectro de frequência da corrente se torna diferente do espectro do motor quando em boas condições de operação. Tais falhas modulam o air-gap e produzem frequências harmônicas na auto-indutância e indutâncias mútuas da máquina. Uma vez que o fluxo oscila somente na frequência de alimentação, estas indutâncias harmônicas resultam em bandas laterais da frequência de linha.” ([18]).

Penrose [19] explica que esta técnica usa o motor como um transdutor, permitindo que o usuário avalie a condição elétrica e mecânica a partir do painel de alimentação, consistindo basicamente na monitoração da corrente de alimentação do motor. Um sistema simples e suficiente para a implementação da técnica é apresentado na figura 3.5.

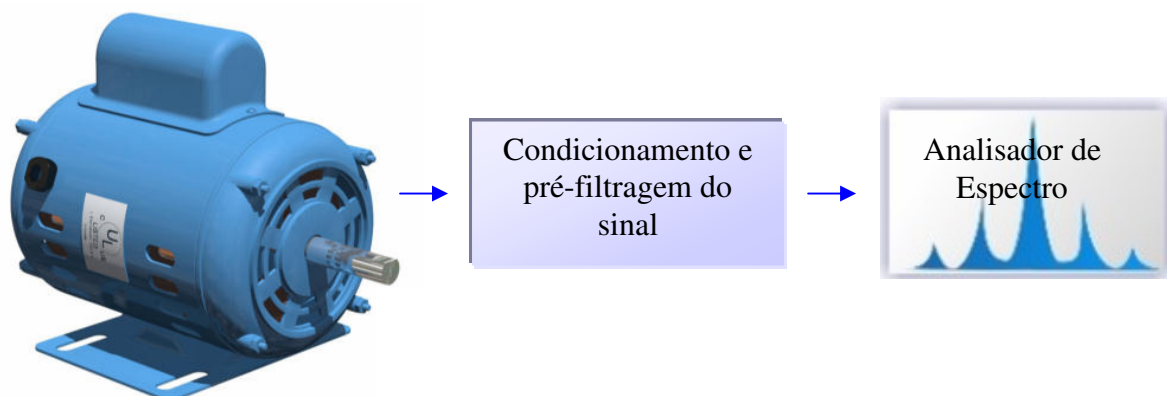


Figura 3.5 - Sistema básico para análise espectral da corrente

Fonte: Adaptado de [18]

Como mostra a figura 3.5 o sinal de corrente do motor é analisado para produzir o espectro de corrente, normalmente referenciado como *Assinatura da Corrente do Motor*. De acordo com Penrose [19], o objetivo é obter tal assinatura para se identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente do motor. Isso permite que padrões na assinatura da corrente sejam identificados para diferenciar motores “saudáveis” de motores em falha e ainda detectar em que parte da máquina a falha deve ocorrer.

As frequências características das falhas, que permitem diferenciar um motor

“saudável” de um com uma avaria em desenvolvimento, são conhecidas e muitas estão bem documentadas em diversos trabalhos e em especial nos trabalhos desenvolvidos em [18], [19], [27] e [28]. De posse das frequências a serem investigadas na análise, procede-se com a mesma, conforme o fluxograma apresentado na figura 3.6.

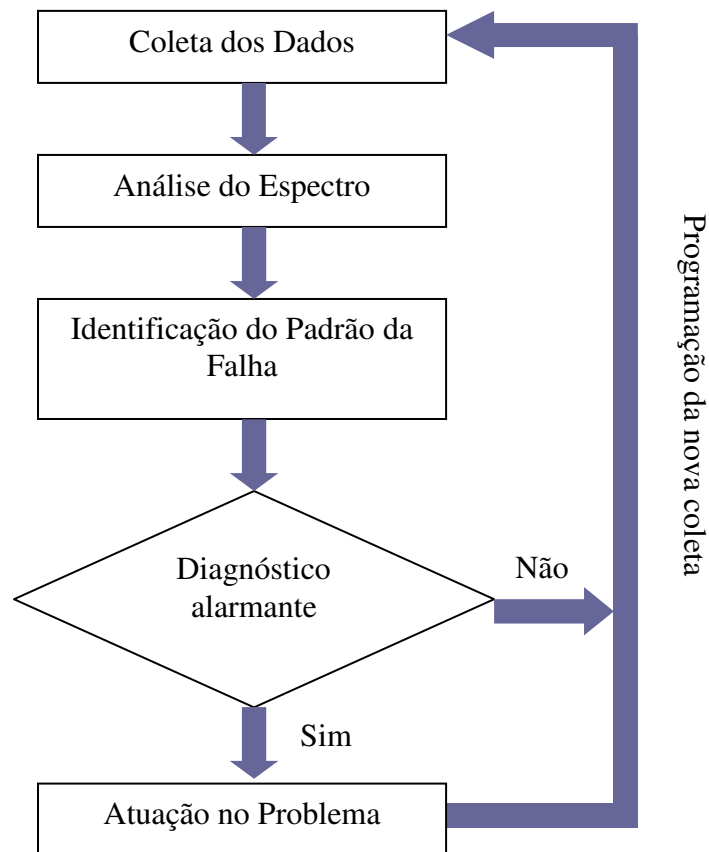


Figura 3.6 - Fluxograma da Análise

Fonte: Adaptado de [18]

Entretanto, é importante ressaltar que o diagnóstico é algo que envolve decisões por vezes de parar o processo produtivo para realizar a atuação (manutenção corretiva). Conforme é explicado em [18], esse processo decisório exige experiência do analista que faz um histórico do comportamento do conjunto (motor, sistema de transmissão e carga). Por esta razão, um sistema de diagnóstico automático que alie o histórico do motor ao conhecimento do especialista encontra um nicho de mercado bastante promissor. Desta forma, o sistema de análise e diagnóstico automático já não é tão simples como o modelo apresentado na figura 3.5, e pode ser representado da seguinte forma:

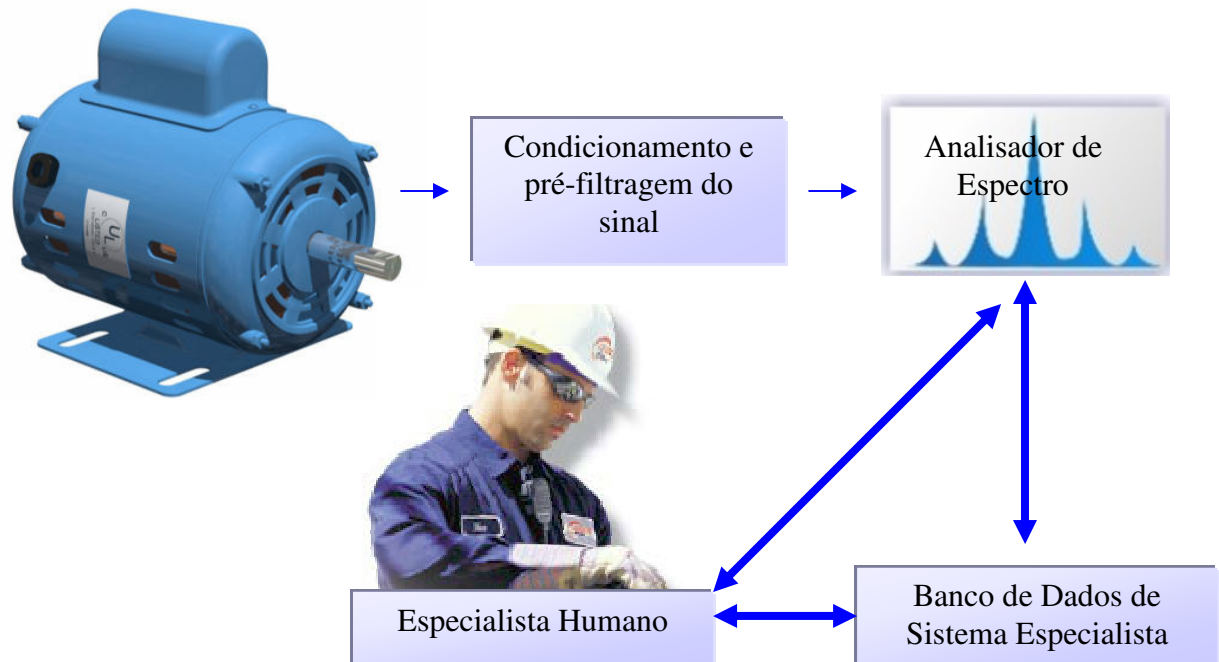


Figura 3.7 - Integração de um sistema de diagnóstico automático

Fonte: Adaptado de [18]

Uma vez feita a coleta do sinal, de acordo com Bonaldi [18], o mesmo passa por um condicionamento e pré-filtragem, para que então possa ser analisado em sua forma espectral por um especialista humano e também alimentar o Banco de Dados que será utilizado por um possível sistema especialista, que fará o diagnóstico automático, “aprendendo” com o especialista humano.

O próximo passo na realização desse trabalho é buscar embasamento que permita utilizar a técnica de MCSA em motores de corrente contínua.

## 4 APLICAÇÃO DE MCSA EM MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA

De acordo com Penrose [21] o que se avalia com a análise da assinatura de corrente em equipamentos de corrente contínua não é o sinal completo, mas sim o *ripple* resultante da retificação AC, constituindo dessa forma uma análise AC sobre um sinal DC. A fundamentação que justifica isso é, conforme explicitado em [22]:

“A conversão de corrente alternada para corrente contínua resulta em um valor constante com corrente alternada em seu topo, formando o fator de forma. No mesmo, deve existir dois sinais primários: harmônicos de baixo nível, dados pela frequência de linha (60 Hz), e a frequência dos SCR, geralmente em número de 6 em um sistema trifásico, multiplicados pela frequência de linha, resultando geralmente em 360 Hz.” (traduzido de [22]).

O *ripple* da onda, então, é a componente remanescente do sinal AC, apresentando-se com todas as componentes em frequência do sinal original, inclusive as de interesse para caracterização de falhas em motores de corrente contínua, sendo, dessa forma, justificado o seu uso para se visualizar a assinatura de corrente nesses motores.

A figura 4.1, obtida a partir dos dados coletados em campo, explicita o que foi levantado por [22]: a utilização do *ripple* para se colher a assinatura de corrente do motor e que sustenta a sua utilização para caracterização de falhas através da técnica de MCSA. A figura 4.1 demonstra a presença das componentes de 60 Hz (da linha) e de 360 Hz (do retificador), além de outras componentes no espectro de frequências que poderão caracterizar as assinaturas de falhas dos motores, como será visto adiante.



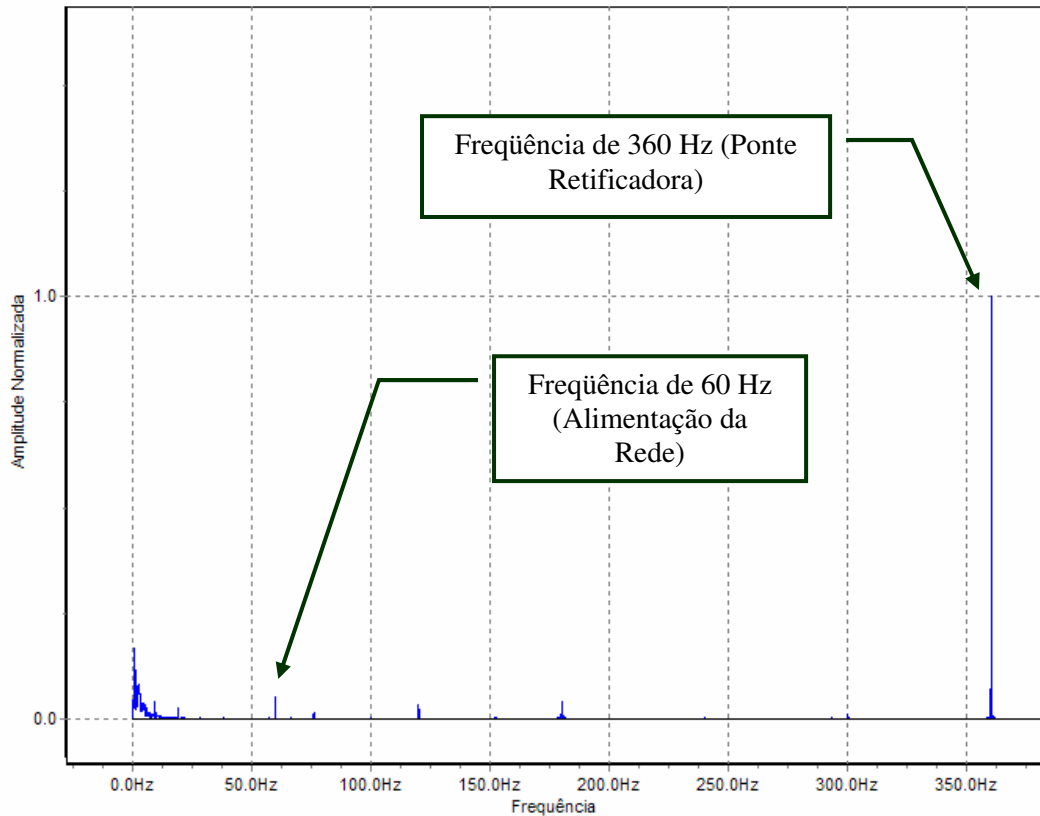


Figura 4.1 – FFT do *Ripple* de um Sinal de Corrente para Motor DC

Fonte: Coleta em Campo – Novelis do Brasil - Pindamonhagaba

Embora se tenha a presença das harmônicas do sistema de alimentação, vê-se que o sinal apresentado é bastante semelhante ao normalmente utilizado em motores de indução trifásicos para a análise de MCSA.

#### 4.1 Padrões e Características das Falhas

De forma análoga à análise de vibrações, grande parte dos esforços hoje desenvolvidos em MCSA é na determinação de padrões de falhas que auxiliem os especialistas na análise de determinados equipamentos.

Esses padrões auxiliam na interpretação de assinaturas, tanto no caso da utilização para acompanhamento de tendência de históricos onde pode se acompanhar o degradamento de um determinado sistema, como também em *troubleshooting*, onde o mesmo tem que tomar decisões baseadas somente na avaliação de uma só coleta do equipamento (devendo-se para isso avaliar o mesmo equipamento por outras técnicas que não MCSA).

O trabalho de Bonaldi [28] apresenta uma contribuição significativa aos trabalhos

anteriores, uma vez que adiciona padrões inéditos de falhas relacionadas à carga acoplada, além de reunir, comprovar e organizar todos os outros padrões já existentes.

Com o intuito de se organizar a apresentação dos padrões de falha, o mesmo trabalho propôs a divisão das falhas em três grupos principais: falhas no motor, falhas no sistema de transmissão e na carga acoplada.

Dessa forma, utilizando-se o motor como transdutor, pode-se monitorar o conjunto completo, motor mais carga acoplada. Viu-se que a aplicação da técnica de MCSA é bastante ampla, sendo a mesma, por exemplo, suficiente para realizar a manutenção preditiva em sistemas baseados em motores assíncronos, pois pode detectar tanto falhas mecânicas como também elétricas relacionadas ao mesmo.

Entretanto, ao se analisar os padrões de falhas existentes em máquinas de indução, vê-se que os mesmos não podem ser transportados para MCC, pois utilizam o escorregamento como fator básico de análise (conforme pode ser visto em [28]).

Como em máquinas de corrente contínua o desenvolvimento das falhas não influencia o espectro modulando-se a fundamental, e sim refletindo na forma de múltiplos da rotação, tem-se que os padrões de MCC possuem a mesma base dos padrões da análise de vibrações, como enfatizado por [22].

O próximo passo é buscar na bibliografia padrões que justificassem seu uso tanto para a detecção de falhas elétricas quanto para falhas mecânicas em MCC.

#### **4.1.1 Falhas Elétricas**

Os trabalhos de Penrose [22] e McKinnon [23] apresentam resultados bastante interessantes de MCSA aplicados a MCC, investigando os efeitos na assinatura de corrente de diversas falhas consideradas bastante comuns, tais como curto-circuito entre espiras tanto do circuito de campo quanto da armadura, posicionamento do porta-escovas, escovas desgastadas, etc.

Em [23], a primeira falha apresentada é o curto-circuito entre espiras ou entre barras do comutador, geralmente em decorrência do acúmulo de carbono proveniente das escovas. O autor explica que para simular o pior caso, provocou um curto-circuito entre barras na armadura do motor, para então coletar o sinal com o motor rodando, chegando aos sinais apresentados a seguir nas figuras 4.2 e 4.3 (dados no domínio do tempo).

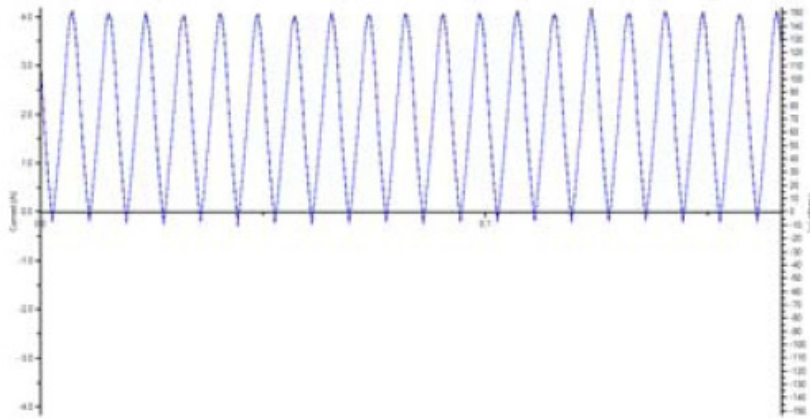


Figura 4.2 – Forma de onda de corrente sem a falha provocada [23]

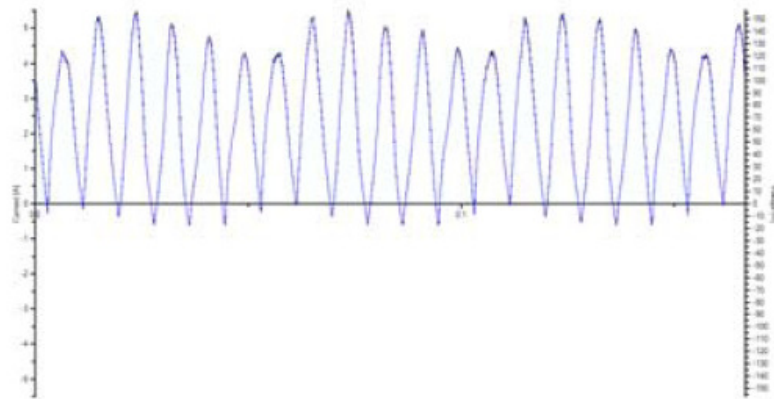


Figura 4.3 – Forma de onda de corrente na presença da falha [23]

Vê-se pelos gráficos das figuras 4.2 e 4.3 que a forma de onda do sinal sem falha é diferente do sinal com falha, pois no primeiro caso os picos estão alinhados, enquanto que no segundo não estão. O critério adotado por McKinnon [23] é basicamente estabelecer a diferenciação visual entre os sinais, utilizando critérios como número de picos, amplitude e localização dos mesmos no gráfico de domínio da frequência, tal como dado pelo gráfico da figura 4.4 e 4.5, da falha apresentada anteriormente.

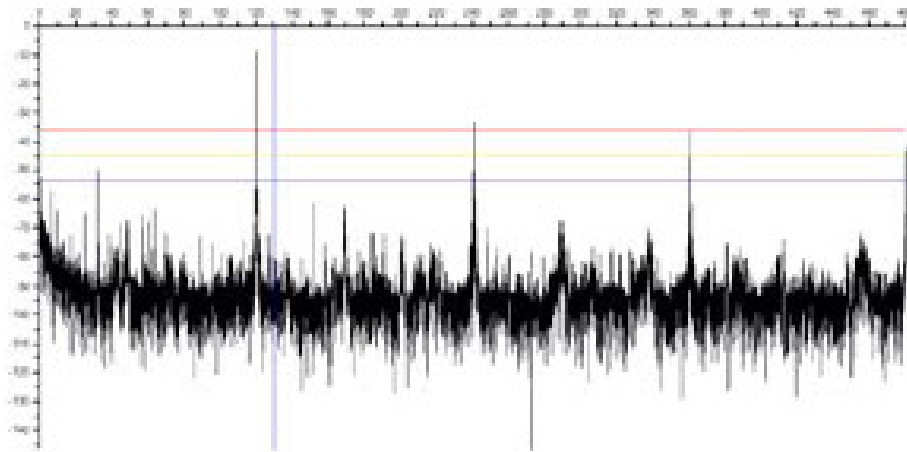


Figura 4.4 – Espectro de corrente sem a falha provocada

Fonte: [23]

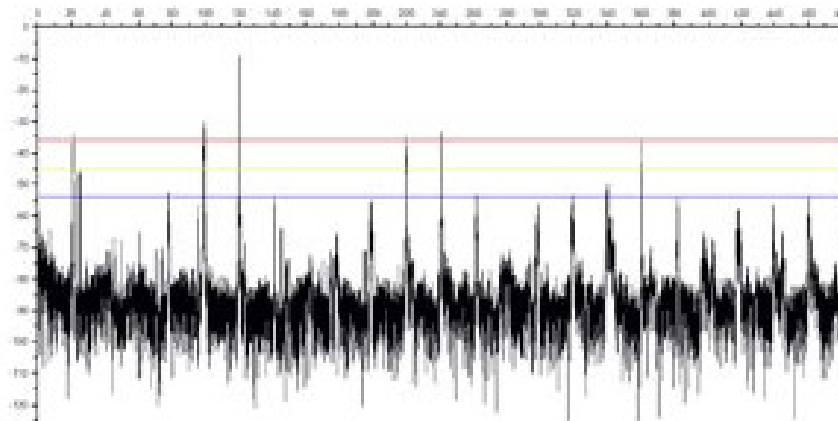


Figura 4.5 – Espectro de corrente na presença da falha

Fonte: [23]

As figuras 4.4 e 4.5 demonstram como a técnica de MCSA pode ser utilizada para a caracterização de falhas comuns em máquinas de corrente contínua. De acordo com [23], a falha apresentada aparece como uma modulação de aproximadamente 17 Hz no espectro analisado. No entanto, o autor não se aprofunda em investigar o porquê dessa faixa de frequência, não apresentando - se um padrão da falha em questão.

Assim, o próximo passo é a análise de falhas mecânicas, que serão comprovadas laboratorialmente posteriormente nesse trabalho.

#### 4.1.2 Falhas Mecânicas em Rolamentos

Em relação às falhas mecânicas, procura-se embasar este estudo para as falhas a serem estudadas nos testes laboratoriais, no caso de análise de rolamentos, o que abrange, conforme citado por [18], 40% das falhas de máquinas. Os demais padrões de falhas podem ser encontrados em trabalhos como [14, 15, 16 e 17].

O primeiro passo é apresentar as partes básicas constituintes do mesmo, na figura 4.6:

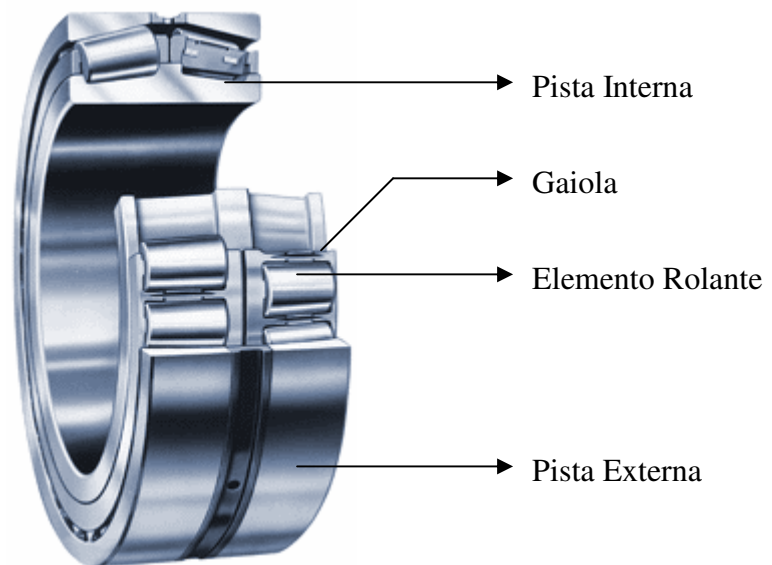


Figura 4.6 – Partes Constituintes de Rolamentos

Um rolamento pode entrar em falha por diversos fatores, como por exemplo sobrecarga, carga axial, montagem mal executada, etc. No entanto, essa falha pode se desenvolver em partes específicas do mesmo, que, conforme explicado por Bonaldi [28] e também por Scheffer [15], desenvolvem frequências específicas na análise de vibrações e também na corrente. Tem-se então a terminologia dos elementos da figura 4.6, dados por:

- Frequência de rotação do motor ( $F_r$ )
- Frequência da pista externa do rolamento (BPFO)
- Frequência da pista interna do rolamento (BPMI)
- Frequência do elemento rolante (BSF)
- Frequência da Gaiola (FTF)

Na análise de assinatura da corrente a frequência de rotação ( $F_r$ ) pode aparecer em

evidência quando há uma falha no rolamento, pois a falha em questão pode gerar a variação de torque na rotação da máquina em análise.

As frequências diretamente associadas aos rolamentos apresentadas acima foram também fundamentadas no trabalho de Bonaldi [28], sendo os conceitos necessários à sua avaliação apresentados na figura 4.7, e os padrões de falhas apresentados na figura 4.8:

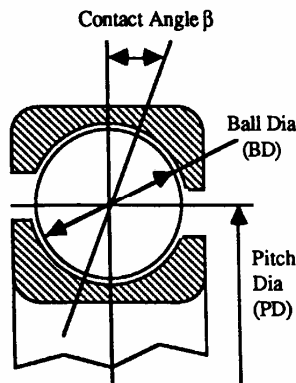


Figura 4.7 – Dimensões Comuns em Rolamentos

Fonte: [18]

Da figura 4.7 temos:

$\beta$  = ângulo de contato do elemento rolante com a gaiola;

BD = Diâmetro do elemento rolante

PD = Diâmetro primitivo do rolamento

Assim, Bonaldi [28] traz também as fórmulas que fornecem as frequências características do rolamento, que caracterizam os padrões de falha:

$$f_{BFPO} = \frac{n}{2} f_1 \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

$$f_{BFFI} = \frac{n}{2} f_1 \left( 1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

$$f_{BSF} = \frac{PD}{BD} f_1 \left( 1 - \left( \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right)$$

$$f_{BFPO} = \frac{f_1}{2} \left( 1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

Tendo-se em vista que  $f_l$  é a frequência de rotação do sistema, pode-se ver através das fórmulas acima que as frequências associadas aos rolamentos são múltiplos diretamente da fundamental e dependentes das dimensões dos rolamentos. As frequências, além da frequência de rotação, devem ser encontradas, portanto com o auxílio de catálogos e softwares específicos dos fabricantes de rolamentos.

## 4.2 Conceitos e Ferramentas Empregadas

A técnica se baseia na aquisição da corrente através de um transdutor no condicionamento dos sinais coletados e na posterior avaliação no domínio de frequências do sinal, para isso utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Dentre as questões mais importantes relacionadas à aquisição e processamentos dos sinais destacam-se:

**Faixa de Frequência:** De acordo com [18], a resposta em frequência normalmente necessária em MCSA é de 5kHz para que se possa ter a resolução espectral necessária para se realizar a análise da assinatura de corrente em MIT, sendo necessário utilizar transdutores com faixa de passagem de no mínimo 10 kHz. A mesma condição foi utilizada em MCC, embora nesse estudo não se abranja problemas relacionados à excentricidade de rotores dos mesmos.

**Teorema de Nyquist:** esse teorema afirma que para representar um sinal qualquer amostrado a ser reconstruído sem perdas de suas frequências constituintes devem ser retiradas amostras com o dobro da frequência máxima deste sinal. Na prática usa-se 10 vezes a frequência máxima para garantir boa precisão.

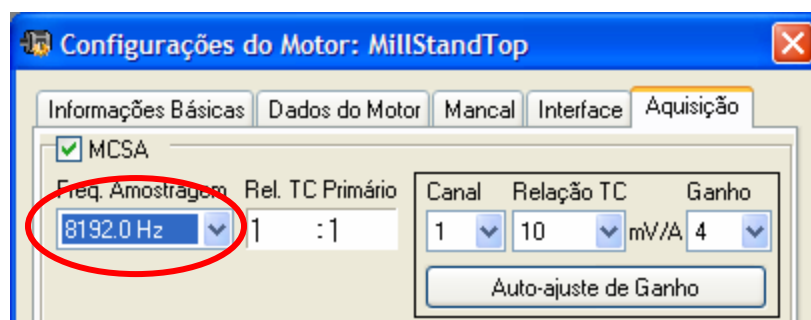


Figura 4.8 – Frequência de amostragem

No caso desse trabalho, como será explicitado no Capítulo 4, utilizou-se a frequência de amostragem de 8192 Hz, fazendo com que todo o espectro até 820 Hz seja bastante confiável, baseado na regra prática apresentada anteriormente.

**Resolução:** Dada pela distância entre duas raias espectrais, ou por:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}$$

Onde: -  $\Delta f$  é a resolução espectral

-  $f_s$  é a frequência de amostragem utilizada

-  $N$  é o número de amostras

A resolução empregada em MCSA deve ser bastante alta para viabilizar a separação das componentes de interesse, principalmente na ocorrência de um escorregamento muito baixo, quando utilizado em motores de indução, ou de *ripples* muito baixos quando empregada em motores DC.

**O uso da escala em dB:** Conforme Bonaldi [28], ao contrário da análise de vibração, MCSA muitas vezes utiliza a escala em dB para a análise da severidade da falha, pois a mesma facilita a caracterização da assinatura da falha a ser localizada, visto que a amplitude da componente fundamental da rede é muito maior que as amplitudes das componentes de falha, ficando inviável a comparação dessas frequências numa escala linear.

### 4.3 O Procedimento de Avaliação

Conforme é explicado por Bonaldi e Oliveira [24], assim como ocorre na análise de vibrações, a análise da corrente deve ser feita dentro do contexto de manutenção preditiva, ou seja, levantamento de históricos e acompanhamento de tendências.

Desta forma, deve-se seguir um plano de monitoramento rotineiro com condições pré-estabelecidas de coleta, levando-se em consideração a condição de operação da máquina monitorada, seus dados construtivos e as informações do processo no qual a mesma está inserida. Procedendo-se dessa forma, basta acompanhar os sinais coletados e buscar por variações em suas características, pois quando as falhas se desenvolvem, o padrão do sinal é alterado e se torna possível, na maioria das vezes, identificar o que se alterou no sinal e que tipo de problema tem o conjunto rotativo monitorado.

Se o conjunto monitorado não apresenta falha, e isso inclui a alimentação na análise



elétrica, o padrão não muda. De acordo com Bonaldi e Oliveira [24], caso as falhas se desenvolvam, o padrão se altera e a análise espectral aponta a localização do problema. Como a base do sucesso do diagnóstico reside na formação de um bom histórico de sinais, a severidade será definida em função de quão rápido o padrão está variando.

Tendo o histórico formado e bem organizado, o analista levará apenas alguns minutos para emitir o laudo, reforçando o potencial de diagnóstico da técnica. A ferramenta fundamental que facilita enormemente o trabalho do analista é a curva de tendência, pois a mesma apresenta a evolução do problema no tempo e se torna a base de um trabalho de manutenção preditiva bem feito.

A abordagem da análise da condição segundo o contexto da manutenção preditiva é a forma recomendável de se proceder e de se obter os melhores resultados. Bonaldi e Oliveira [24] explicitam que são comuns os casos em que a própria empresa solicita coletas e análises pontuais. Nesses casos, uma coleta é efetuada e tenta-se inferir qual o problema da máquina. Esse processo é conhecido como *troubleshooting* e para ser executado corretamente deve envolver a aquisição maciça de informação e dados. Normalmente várias técnicas devem ser empregadas conjuntamente (análise elétrica, vibração em vários pontos, termografia etc), o que torna esse processo bastante custoso e demorado, normalmente um dia ou mais para se medir apenas uma máquina. Além desses fatores de tempo de execução e custo, o resultado da análise depende muito da experiência do consultor ou do analista. Embora, um analista experiente possa identificar alguns tipos de falha com este tipo de abordagem, sem o histórico da máquina fica muito difícil decidir o que fazer com toda a informação coletada. Por exemplo, a máquina pode estar operando por vários anos na condição levantada pelo *troubleshooting*. Como não se tem o histórico da máquina, pode-se efetuar uma parada desnecessária e desperdiçar recursos financeiros sem necessidade.

A fim de padronizar e facilitar a aplicação da técnica de MCSA, o trabalho de Bonaldi e Oliveira [24] estabelece um critério que servirá como base para a escolha do procedimento. O mesmo classifica os motores em:

- **Tipo I:** Motores com pequenas variações de carga. São motores acoplados às cargas que na maioria dos casos sofrem pequenas flutuações durante o processo de aquisição de sinais. São exemplos desse tipo de carga: bombas, compressores a parafuso, ventiladores, etc..
- **Tipo II:** Motores com grandes variações de carga. São motores acoplados às cargas que sofrem grandes desvios durante a aquisição de sinais. Neste caso a

técnica pode não ser aplicável ou alguns cuidados especiais devem ser tomados. São exemplos desse tipo de carga: bobinadeiras, correias transportadoras, moinhos e pontes.

- **Tipo III:** São considerados os casos especiais, ou de motores que se enquadram no tipo I, mas apresentam sinais extremamente ruidosos ou características peculiares que prejudicam a análise.

A análise e aplicação da técnica são apresentadas em [24] para cada caso:

- **Tipo I:** para esta configuração a estratégia de monitoramento é bastante simples e pode ser denominada de estratégia padrão de monitoramento. Ou seja, cabe ao usuário:
  1. Levantar corretamente todas as características construtivas do motor, sistema de transmissão e carga acopladas.
  2. Definir o intervalo de medições do motor com o intuito de se levantar o histórico do mesmo. É através desse histórico que o analista estará apto a identificar os desvios que vierem a acontecer no conjunto.
  3. De posse do cadastro correto do conjunto rotativo e de um histórico que permita comparações entre sinais atuais e sinais anteriores, o usuário deve ficar atento para o estabelecimento dos níveis de alarme e acompanhar a tendência da falha.
  4. Pontos fora da curva devem ser desconsiderados e recomenda-se que se faça ao menos 03 (três) aquisições seguidas de cada motor para reduzir o impacto de aleatoriedades presentes no sinal.
- **Tipo II:** em motores do Tipo II é importante, primeiramente, analisar se é possível estabelecer um ponto de operação no qual pode-se adquirir o sinal do motor sem grandes flutuações de carga. Estabelecido este ponto de operação o procedimento de análise se reduz ao descrito na configuração de Tipo I. Se mesmo com flutuação de carga, verificar-se a viabilidade de se acompanhar o desenvolvimento de falhas em motores do Tipo II, cabe a equipe de preditiva a definição dos parâmetros a serem observados no momento da análise, deixando bem claro quais os cuidados necessários na análise e quais os critérios que foram adotados.

- **Tipo III:** em motores do tipo III, recomenda-se em um primeiro momento estudar qual é a origem do ruído, aleatoriedades ou peculiaridades presentes no sinal e que podem vir a prejudicar a análise. Essas dificuldades podem ter sua origem na rede de alimentação, ausência de carga, projeto do motor, condição de operação, etc. Identificada a origem do problema, recomenda-se verificar se é possível identificar padrões de falhas e a evolução das mesmas. Sendo possível inserir novos critérios de análise se necessário. Se não for possível a identificação de padrões de falha, considerar o conjunto inapropriado para monitoramento com a técnica em questão.

Apresenta-se a ressalva ainda (em [24]) de que o mais importante em uma análise preditiva é o levantamento das características da máquina monitorada, o estabelecimento da condição de coleta e a criação de um *baseline* para futuras comparações. Só depois dessas tarefas concluídas é que se deve preocupar-se com a coleta e análise dos dados.

#### 4.4 Vantagens

A técnica de MCSA apresenta diversas vantagens sobre as outras, a saber:

- **Custo de instalação dos equipamentos:** O equipamento necessário para se realizar a análise de assinatura de corrente de motores é, comparado com os outros, bastante baixo, pois se baseia principalmente em 1 (um) transdutor de corrente por motor, em contrapartida com os diversos acelerômetros que são necessários para se realizar o acompanhamento de vibrações. Além do custo do transdutor, há ainda o software especialista, o condicionador e o transmissor de sinais, que podem ser reaproveitados para a rota de manutenção inteira.
- **Acessibilidade:** Sendo o painel elétrico do equipamento em questão acessível, faz-se a instalação do transdutor de corrente para que seja possível a captura. Isso elimina a impossibilidade de se realizar a manutenção preditiva em motores com dificuldade de acesso, como acontece com a técnica de análise de vibrações, e também não é necessário ter um campo de visão do mesmo, como acontece com a análise termográfica.
- **Abrangência do diagnóstico:** Como explicitado no tópico 3.4.1, essa técnica permite acompanhar os diversos problemas associados às máquinas elétricas. Isso faz com que seu emprego seja possível tanto para acompanhamento de partes mecânicas (em conjunção com a análise de vibrações), quanto das partes elétricas

do motor (em conjunção com a MCA).

- Rapidez de diagnóstico: Como provado no capítulo 4, muitas vezes o analista necessita tomar a decisão sem ter histórico do sistema. Embora essa técnica possa também se basear no acompanhamento de tendências, por vezes ela é utilizada como ponto de partida para tomada de decisões sobre sistemas totalmente desconhecidos.

#### 4.5 Desvantagens

Embora a técnica de MCSA seja considerada bastante completa e por vezes até suficiente para a realização da manutenção preditiva, a mesma apresenta algumas desvantagens:

- Pouca referência e disponibilidade de informações: Ainda não há livros e artigos que descrevam em completo a técnica. Além disso, para a formação prática de especialistas, é necessário que os mesmos participem de cursos não-regulares disponibilizados pelas empresas que já começam a adotar essa técnica.
- Dificuldade de se realizar em cargas variáveis: Com cargas variáveis, o espectro de frequência pode apresentar variações ao longo do tempo, advindo isso da não-aplicabilidade da técnica de transformada de Fourier em sinais não estacionários. Por isso, a sua utilização seria bastante prejudicada em cargas com variações bruscas.
- Necessidade de embasamento teórico por parte do analista: Como a mesma se baseia em conceitos não perceptíveis ao olho humano, como a alteração de fluxo magnético e conseqüente alteração da corrente de alimentação, é determinante para o sucesso da técnica que o especialista tenha esses conceitos bastante sedimentados.

Embora se tenha apresentado as desvantagens acima, considera-se que a técnica de MCSA possa ser bastante atrativa no objetivo de reduzir os custos de manutenção de uma forma geral, e por isso objetivou-se nesse trabalho a condução dos experimentos com o mesmo.

## 5 PROCEDIMENTO DE MEDIDA E ANÁLISE

Este capítulo apresenta a avaliação da viabilidade da aplicação da técnica de MCSA na identificação de falhas mecânicas em MCC, em especial de rolamentos, presente tanto no próprio motor no caso das confirmações em laboratório, quanto na carga quando da confirmação em campo.

Para o desenvolvimento da análise planejaram-se confirmações práticas visando evidenciar a aplicabilidade da técnica de MCSA em MCC, divididas em dois momentos: em laboratório e em campo. Em ambos casos segue-se o procedimento de análise que foi apresentado na figura 3.6.

### 5.1 Teste em Laboratório

Para o teste em laboratório foi utilizado um motor de pequeno porte (Potência Nominal = 8 cv) para a confirmação da aplicabilidade da técnica. Os passos seguidos foram:

a) Primeiramente procurou-se investigar se era possível fazer a detecção da frequência de rotação do motor DC no espectro da corrente de *ripple* do mesmo. Para isso primeiramente mede-se a rotação do motor com um tacômetro para então procurar a frequência relativa à essa rotação no espectro do motor.

b) O segundo passo foi então agravar a avaria já existente no rolamento, registrando-se a resposta da componente espectral da rotação a essa avaria. Pode-se, conforme é explicado em 4.1.2, associar à frequência de rotação uma possível falha em rolamentos, justificando-se isso pelo fato da variação de torque devido à falha ser refletida na corrente de armadura do motor em questão.

c) O próximo passo foi verificar a resposta dessas componentes à presença de carga no motor em questão. Para isso, repetiu-se os testes anteriores, colocando-se carga no motor avaliado.

### 5.2 Confirmação em campo

O objetivo deste item é buscar a confirmação da aplicabilidade do método em ambientes industriais, onde o problema não se encontra diretamente ligado ao motor, mas sim

à sua carga.

Para isso, conforme foi visto em 3.4, utiliza-se da característica do motor considerado como transdutor de sua carga, refletindo em seu fluxo magnético, e por conseqüência em sua corrente de armadura, as freqüências que formam a assinatura de sua carga.

O motor utilizado em análise de campo é um dos dois motores principais de um laminador de alumínio. Acoplado ao mesmo está a caixa redutora do tipo pinhão (funcionando como caixa de passagem, com fator de redução de 1:1), e à mesma está acoplado o cilindro de trabalho do laminador (também chamado de *work roll*), que é apoiado em um mancal. A figura 5.1 explicita o experimento:

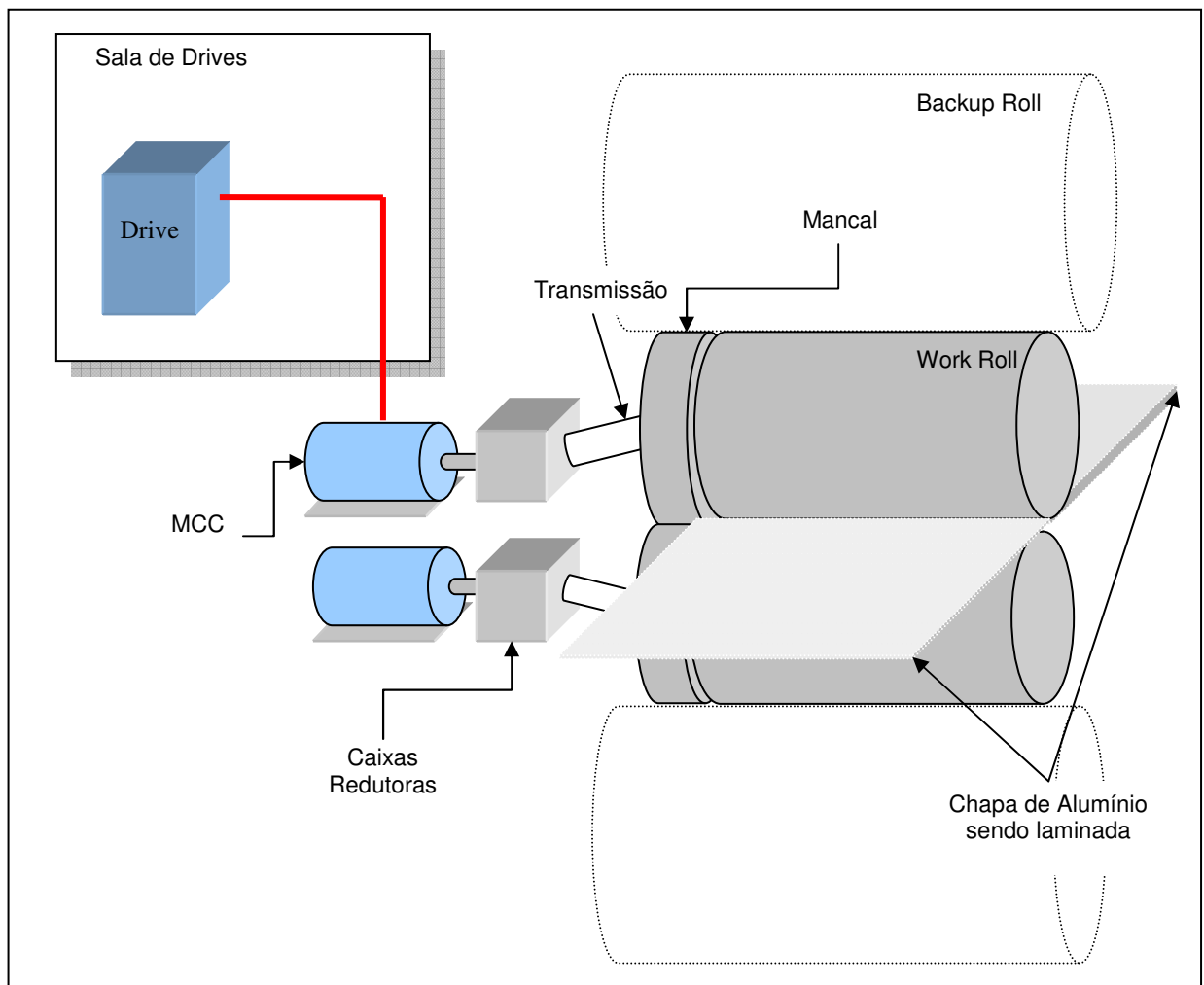


Figura 5.1 – Esquema do Campo

A figura 5.2 demonstra a montagem do cilindro de trabalho (*work roll*) no próprio mancal, com os rolamentos que apresentam desgaste ao longo do tempo.

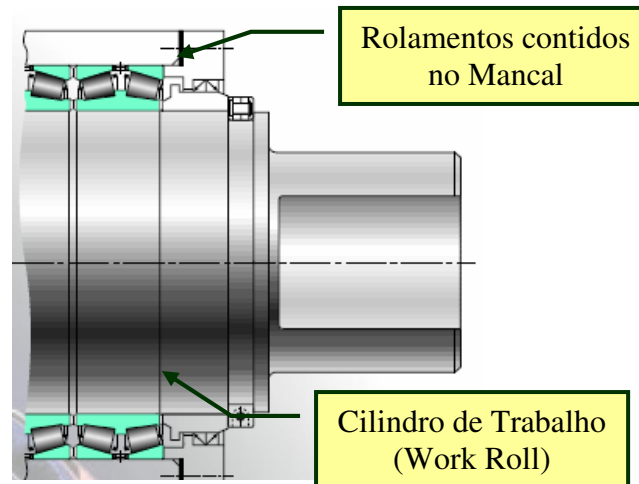


Figura 5.2 – Cilindro de Trabalho inserido no Mancal

Sabe-se que o rolamento desse mancal apresenta desgaste diretamente relacionado ao seu tempo e condição de uso no seu elemento rolante, no qual está aplicada uma carga axial que faz com que o mesmo se deteriore mais rapidamente sob carga. Os testes em campo são realizados com o laminador operando normalmente, fazendo-se a tentativa de se predizer a condição desse rolamento.

Conforme pode ser verificado no item 4.1.2 as falhas de rolamentos apresentam assinatura no espectro dependentes da geometria do mesmo, e múltiplos da frequência de rotação dependentes do elemento que gira com esse rolamento.

Os dados da tabela 5.1 apresentam as frequências naturais do rolamento utilizado no mancal a ser monitorado, encontrados utilizando-se dados fornecidos pelo próprio fabricante:

Tabela 5.1 – Dados para Análise

<i>Dados</i>	<i>Fórmula</i>
Frequência de rotação do motor ( $F_r$ )	$F_r$
Frequência da pista externa do rolamento (BPFO)	$18,78 \times F_r$
Frequência da pista interna do rolamento (BPFI)	$21,21 \times F_r$
Frequência do elemento rolante (BSF)	$8,04 \times F_r$
Frequência da Gaiola (FTF)	$0,4697 \times F_r$

Fonte: Catálogo Timken

Esse teste visa, portanto, primeiramente buscar a frequência característica da

velocidade de rotação, e a partir daí procurar pelas frequências que indicam componentes do rolamento da carga do motor.

O próximo passo é partir para o acompanhamento histórico dos valores encontrados da frequência de falha do rolamento em questão, buscando-se determinar padrões que auxiliem o pessoal da área na determinação do melhor momento para se realizar a troca dos mancais em questão.

A fim de se fazer a validação dos resultados encontrados em campo, fez-se coletas de dados de vibrações ao mesmo tempo das coletas de corrente, utilizando-se um acelerômetro montado sobre a caixa redutora da máquina e também a inspeção visual dos mancais e seus rolamentos na sua desmontagem.



## **6 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO SOB TESTE**

### **6.1 Material**

Para as experiências e análises realizadas nesse estudo foram necessários:

1 - Motor de corrente contínua: É o objeto da análise, necessário para a avaliação da aplicabilidade da técnica.

2 - Acesso ao painel elétrico de acionamento do motor: Como a técnica de MCSA não requer a avaliação direta do próprio motor, o único requisito necessário é a instalação do equipamento de coleta de dados no seu painel elétrico.

3 - Transdutores de corrente: De acordo com o explicitado em 4.2, o transdutor de corrente deve ser adequado às necessidades de fundo de escala e de banda de passagem.

No caso deste trabalho o principal requisito é dado pelos testes em campo, onde as frequências a serem identificadas são da ordem de 180 Hz (como será explanado adiante), Exige-se assim o transdutor com banda de passagem 10 vezes maior, para que se possa prosseguir com a amostragem seguindo-se a regra prática do teorema de Nyquist. Sendo assim a banda de passagem do mesmo deve ser superior a 1800 Hz.

O fundo de escala deve ser adequado a cada experimento, sendo os sinais coletados em laboratório da ordem de 1 A, e em campo da ordem de 50 A.

4 - Equipamento de coleta de dados: Tem a finalidade de armazenar valores de corrente coletada para que posteriormente se descarregasse os dados em um microcomputador onde se procederá com a análise.

Observação:

Os equipamentos especificados devem atender às características tanto da prática laboratorial quanto da confirmação em campo, optando-se, principalmente, pela robustez e praticidade na sua utilização. Os mesmos são descritos a seguir.

### **6.2 Aquisição e Análise dos Dados**

A coleta e análise dos dados apresentados nessa pesquisa foram realizadas com resolução espectral 0,0625 de Hz, e taxa de amostragem para coleta de sinais de 8192 Hz, permitindo a coleta de sinais de até 4096 Hz, considerando o Teorema de Nyquist, e até 800 Hz como regra prática para utilização (conforme é explicado em 4.2).

Esclarece-se que na prática as falhas monitoradas não atingem tais valores no espectro de frequências, como é evidenciado por Bonaldi [28].

### 6.3 Transdutores de Corrente Utilizados

Embora possa-se fazer a coleta de dados de corrente com sensores Hall, a mesma foi feita optando-se por um transdutor de corrente baseado no efeito Rogowski, pois o mesmo apresenta características bastante atrativas, tais como largura de banda bastante grande (50 KHz) e alta linearidade, visto que o mesmo é isento de materiais magnéticos. O transdutor utilizado é apresentado na figura 6.1:



Figura 6.1 – Transdutor de Corrente Utilizado

Fonte: Manual do Equipamento

Para que os sinais fossem capturados com a melhor resolução possível, utilizou-se o melhor fundo de escala em cada caso, considerando-se apenas o valor de corrente do *ripple* (parte AC) do sinal.

### 6.4 Motores

Em laboratório, o motor utilizado foi de corrente contínua, de 8 CV, alimentação de 455 V, 15,3 A de corrente nominal, com excitação de ímã permanente.

No caso da comprovação em campo, o motor utilizado para as medições tinha como

dados de placa: tensão nominal de alimentação de 750 V, e corrente nominal de 1591 A, Potência Nominal de 1520 cv. A figura 6.2 explicita os dados desse motor:

Figura 6.2 – Dados de placa do Motor Utilizado em Campo

## 6.5 Acionamentos dos Motores

Os motores utilizaram em todos os testes pontes retificadoras de 6 pulsos. No caso laboratorial, o motor foi avaliado *in loco*, visto que seu *drive* era de pequeno porte, não necessitando de acondicionamento especial.

No caso do teste em campo, no local existe uma sala especial para os *drives* referentes ao motor, sendo possível realizar todos os experimentos coletando dados no painel.

## 6.6 Montagem dos testes

Em ambos os testes, a montagem e análise dos dados seguem o padrão determinado na figura 3.5, onde se faz a coleta da corrente do motor. Esse sinal por sua vez passa por um condicionador de sinal e filtro, e por fim é analisado em sua forma espectral, no domínio de frequências.

As variações apresentadas nas montagens são somente em relação ao ponto de coleta

da corrente, visto que na análise laboratorial pode-se colher os dados de corrente diretamente no acoplamento do cabo no motor, e na confirmação de campo faz-se as mesmas no barramento de ligação do motor, na sala chamada de sala de *drives*, ou CCM – Centro de Comando dos Motores, da planta fabril utilizada nos testes.

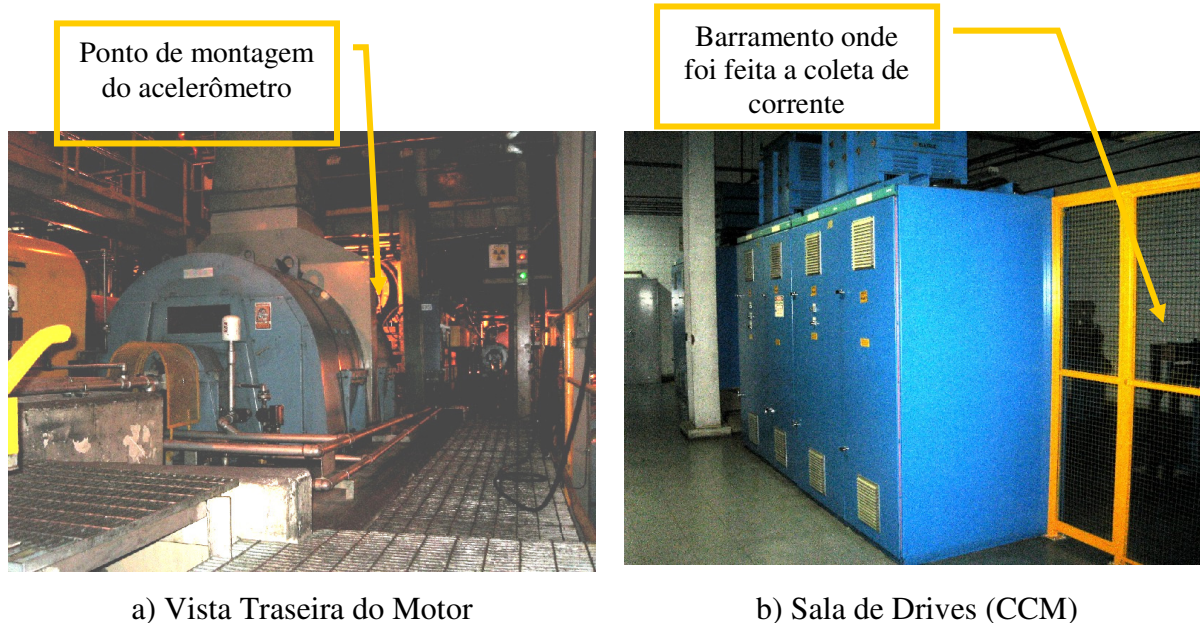


Figura 6.3 – Vista do Local utilizado no Trabalho

Conforme pode ser visto na figura 6.3a), o motor é de difícil acesso, fazendo-se assim, as coletas diretamente no seu barramento que se encontra no seu Centro de Comando, como se pode ver na figura 6.3b). Uma outra vantagem apresentada nessa configuração é de se aumentar a vida útil dos equipamentos utilizados no teste, pois os mesmos não se submetem ao ambiente hostil presente na área próxima ao motor, com presença de óleo, poeira e etc.

## 7 RESULTADOS

Na avaliação dos resultados apresentados, busca-se acompanhar no espectro de frequências da corrente as assinaturas que caracterizem as falhas procuradas em cada teste para que assim se possa validar a aplicabilidade de MCSA em MCC. Em um primeiro momento buscou-se a confirmação laboratorial, comparando-se a assinatura com o rolamento já defeituoso e com a sua falha agravada, e, posteriormente, a confirmação em campo, monitorando-se uma falha em desenvolvimento na carga.

### 7.1 Testes Laboratoriais

O motor de corrente contínua foi ensaiado em duas condições de carga: a vazio e com carga (13 A na armadura), sendo a mesma gerada por um freio mecânico. Para cada condição de carga foi-se analisado o motor com rolamento danificado e com o dano agravado fortemente.

Sabe-se que com a degradação do rolamento, o motor apresentava variações em seu torque, o que leva por fim ao travamento do eixo. Essa falha foi observada na frequência de rotação do rotor.

Para a confirmação da presença da velocidade de rotação, coletou-se a velocidade real do eixo da máquina com um tacômetro digital ao mesmo tempo em que se fazia a coleta de dados de corrente, para que se tivesse uma base de comparação com o valor encontrado no espectro de frequência. Os dados a seguir sumarizam o resultado:

1) Motor a vazio e sem avarias:

Rotação medida com tacômetro = 24,43 Hz (1466 RPM)

Rotação dada pelo espectro = 24,75 Hz (1485 RPM)

Obs.: A diferença de 0,32 Hz ou 19 RPM ocorre em função da resolução espectral, mas não traz prejuízo à análise.

Como pode ser observado no espectro da figura 7.1, o objetivo foi plenamente atingido, visto que a frequência de rotação foi identificada tanto nos casos do motor apresentar-se com ou sem carga.

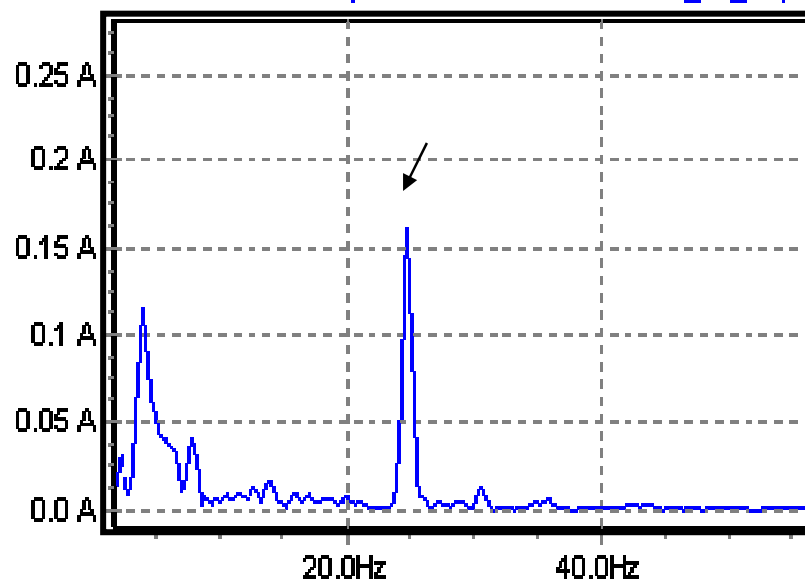


Figura 7.1 – Componente referente à rotação do motor CC a vazio e sem agravante no dano do rolamento

Pode-se ver na figura que a frequência de 24,75 Hz apresenta-se bastante destacada no espectro. Os testes foram então repetidos com carga:

2) Motor com carga e sem avarias:

Rotação medida com tacômetro = 20.6 Hz (1236 RPM)

Rotação dada pelo espectro = 20.75 Hz (1245 RPM)

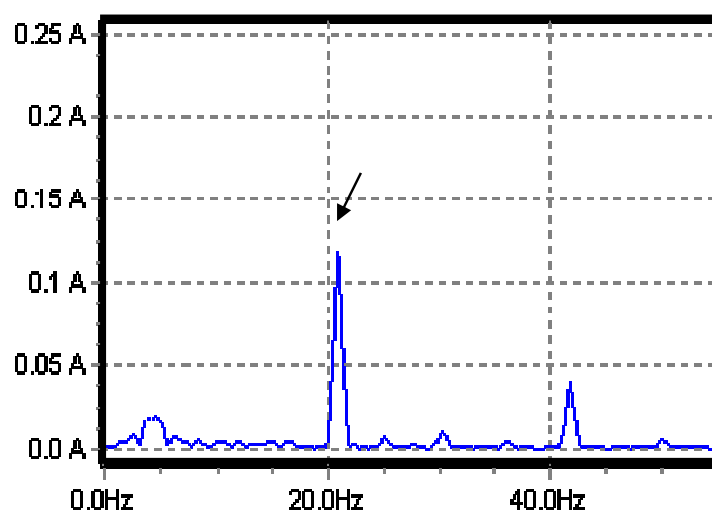


Figura 7.2 - Componente referente à rotação do motor CC carregado e sem agravante no dano do rolamento

Confirmada a hipótese de que a frequência de rotação tem sua assinatura no espectro de corrente, o próximo passo é a confirmação de que a avaria no rolamento é refletida com e sem carga no motor.

3) Motor a vazio e com avaria no rolamento:

Rotação medida com tacômetro = 24.58 Hz (1475 RPM)

Rotação dada pelo espectro = 24.5 Hz (1470 RPM)

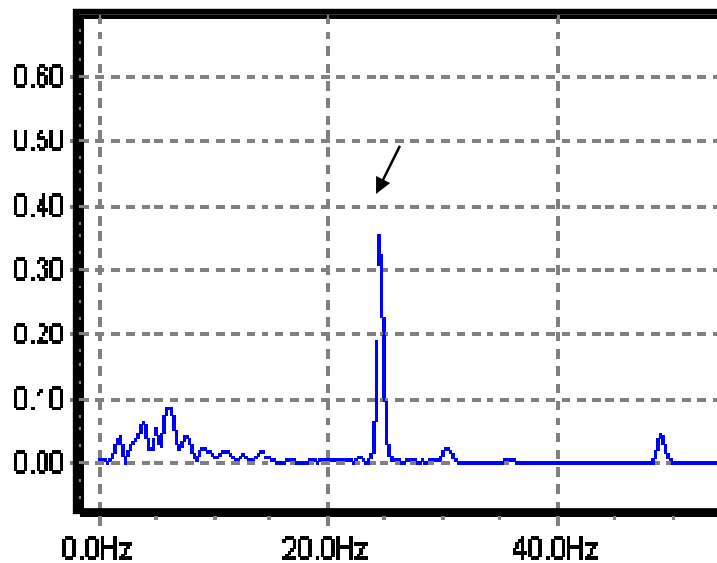


Figura 7.3 - Componente referente à rotação do motor CC a vazio e com rolamento com avaria agravada

Vê-se que para a frequência de rotação o valor da corrente é bastante diferente (passando de 0,16 para 0,35 pu), refletindo claramente a falha no rolamento agravada. Para o caso do motor com carga tem-se:

4) Motor com carga e com avaria no rolamento:

Rotação medida com tacômetro = 20.58 Hz (1235 RPM)

Rotação dada pelo espectro = 20.5 Hz (1230 RPM)

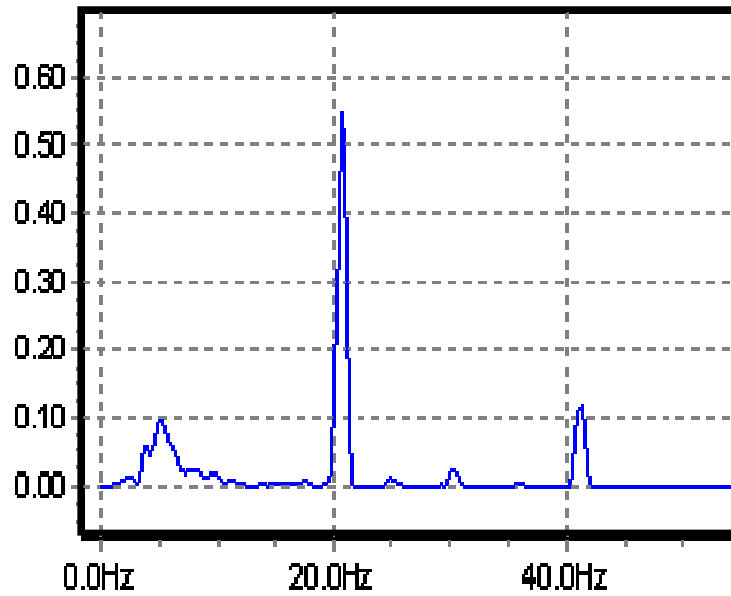


Figura 7.4 - Componente referente à rotação do motor CC carregado e com rolamento avariado

Novamente vê-se que a assinatura reflete a falha, passando o valor 0,17 pu para 0,55 pu, que pode ser demonstrado nas seguintes superposições, onde a linha em azul é o espectro com o rolamento nas suas condições iniciais, e em vermelho apresenta-se o espectro com condições agravadas:

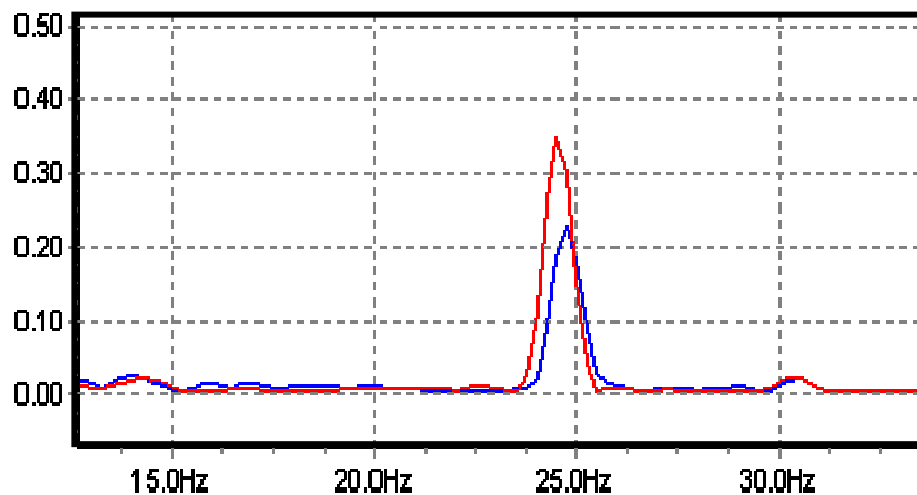


Figura 7.5 - Superposição dos espectros com o motor a vazio



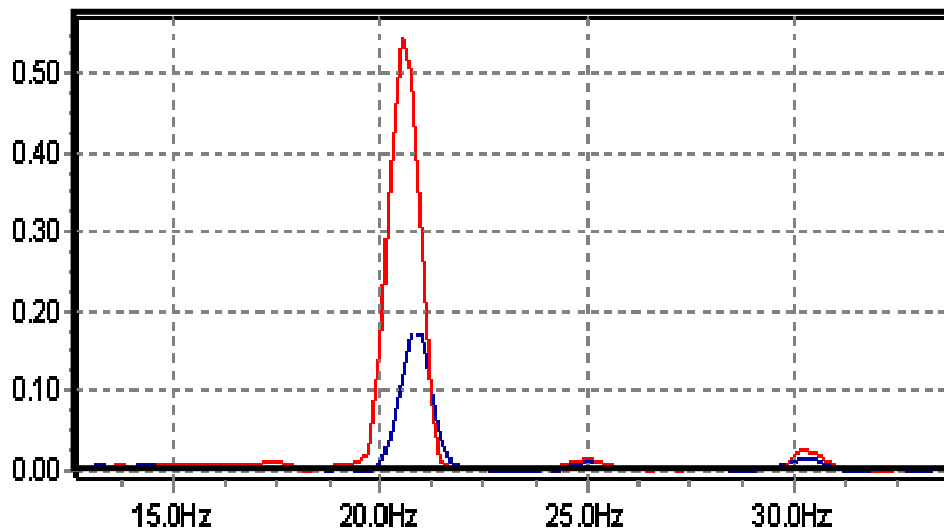


Figura 7.6 - Superposição dos espectros com o motor carregado

### 7.1.1 Considerações

O sistema detectou a avaria no rolamento de teste, sendo esse resultado ainda mais evidente quando o motor encontra-se com carga, como pode-se ver nos espectros superpostos acima). Esse resultado confirma as hipóteses teóricas apresentadas, além de se poder inferir que a técnica de MCSA apresentou bastante acuidade na detecção de falhas, podendo-se aplicar a mesma em áreas industriais com bastante sucesso como iremos verificar na prática no próximo experimento.

Além disso, considera-se que, com base em experiência da planta, pode-se estabelecer *baselines* para avaliações de históricos dessas assinaturas, fazendo-se com que o especialista em manutenção preditiva da planta tenha sua atuação bastante facilitada devido à facilidade com que as análises são feitas através de MCSA.

## 7.2 Testes Em Campo

O primeiro passo foi realizar a aquisição do sinal (primeira coleta de dados), e verificar se a frequência de rotação da máquina é identificável no espectro de frequências. Assim como foi feito em laboratório, em campo esse fato é necessário para as demais análises de falhas no motor, visto que as assinaturas em questão são múltiplos da fundamental do sistema.

Para isso, verificou-se primeiramente qual era o valor de rotação dado pelo tacômetro

acoplado ao motor, para em seguida procurar-se tal frequência no gráfico da figura 7.7.

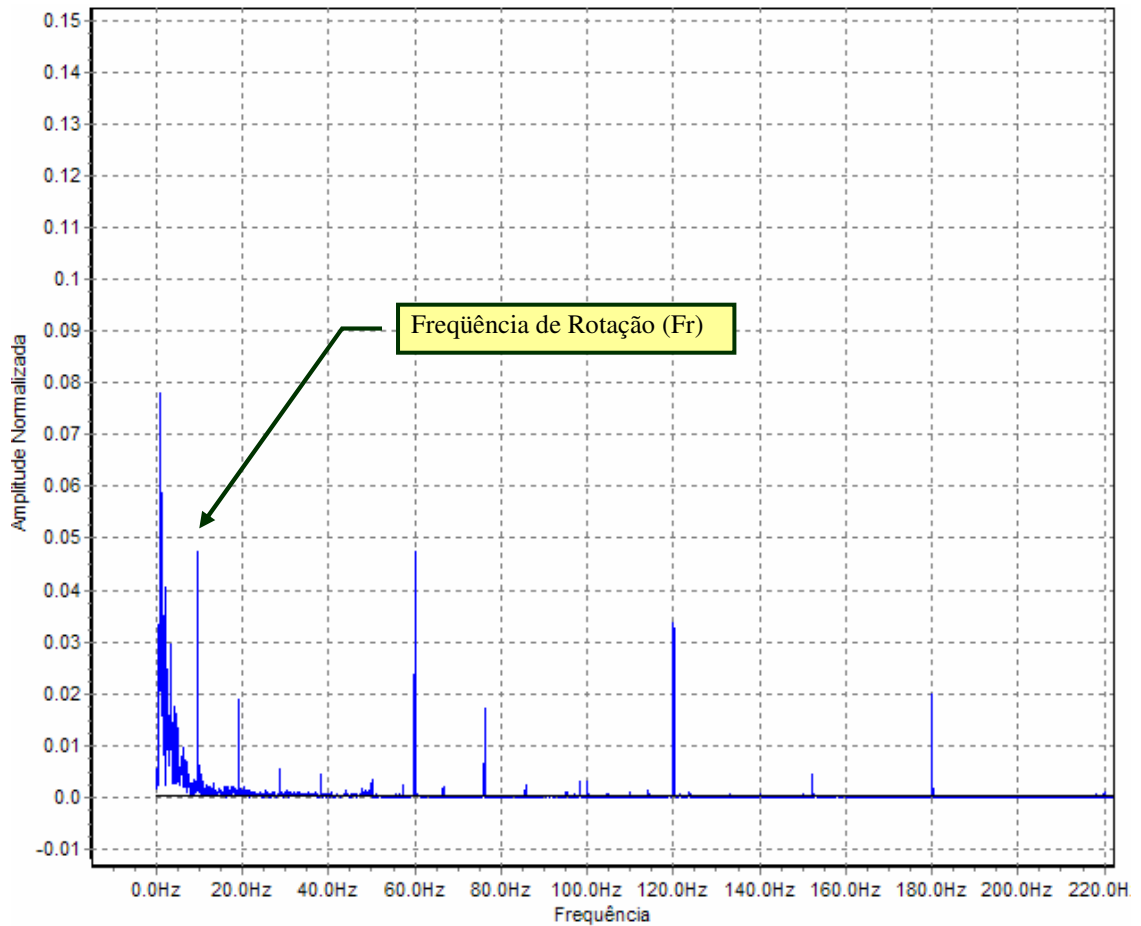


Figura 7.7 – Localização dos Dados no Gráfico

Frequência dada pelo tacômetro = 580 rpm = 9.67 Hz

Frequência dada pelo gráfico = 9.70 Hz

Conforme se pode verificar na figura 7.7, a frequência de rotação é facilmente encontrada no espectro, servindo essa de base para as próximas análises, onde se busca identificar as frequências relativas à assinatura do rolamento da carga do sistema.

Conforme explicitado no item 5.2, apresenta-se abaixo a tabela de frequências que constituem a assinatura do rolamento presente na carga.

Tabela 7.1 – Dados para Análise

<i>Dados/ Origem</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Resultado</i>
Frequência de rotação do motor (Fr)/ Acompanhamento do tacômetro acoplado ao motor	$F_r$	9,67 Hz
Frequência da pista externa do rolamento (BPFO)/ Catálogo Timken	$18,78 \times F_r$	180,3 Hz
Frequência da pista interna do rolamento (BPFI) / Catálogo Timken	$21,21 \times F_r$	203,6 Hz
Frequência do elemento rolante (BSF) / Catálogo Timken	$= 8,04 \times F_r$	77,2 Hz
Frequência da Gaiola (FTF) / Catálogo Timken	$0,4697 \times F_r$	4,5 Hz

Fonte: Catálogo Timken

A partir desse ponto é que poderemos buscar essas frequências no espectro, conforme é ilustrado na figura 7.8:

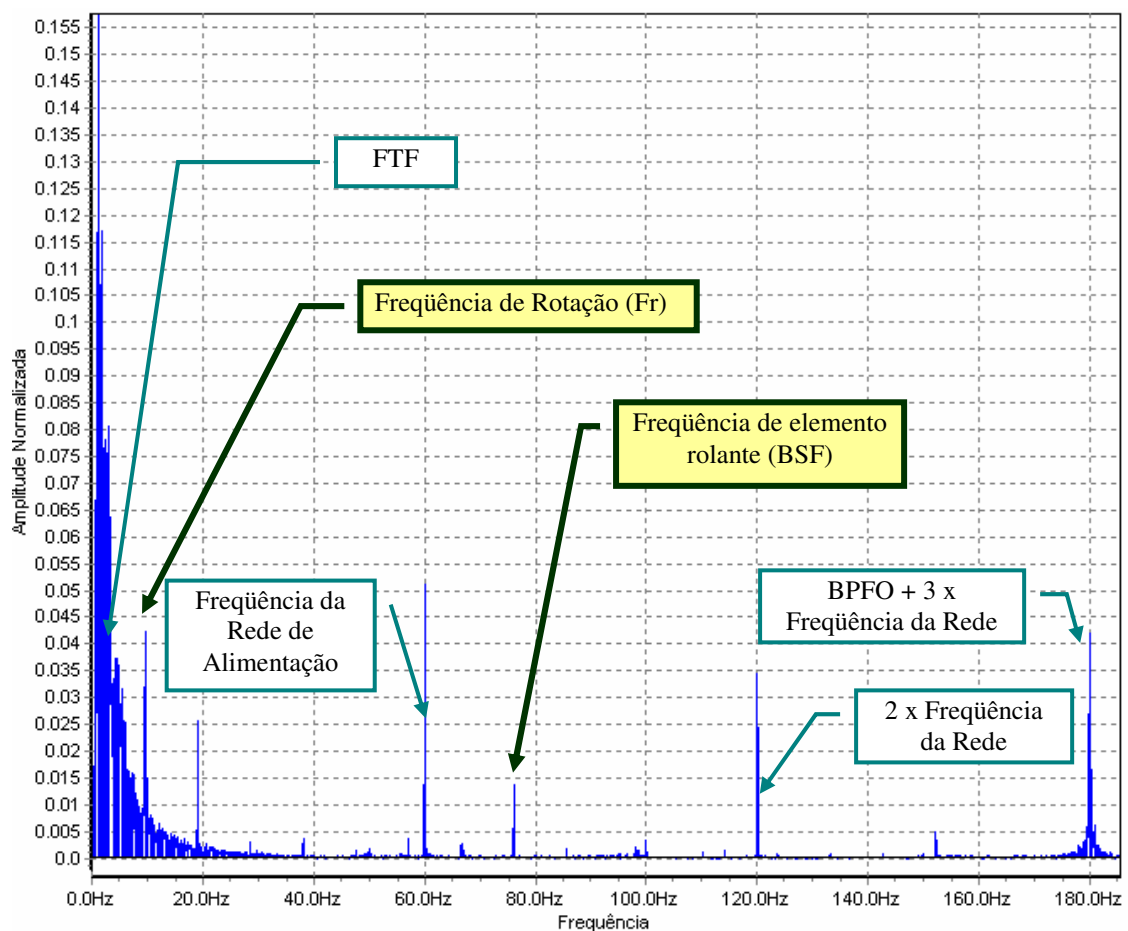


Figura 7.8 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta 24/11/2006

Embora os dados de Frequência de Rotação e BSF sejam bastante claros no gráfico, o mesmo não acontece com os outros, visto que o BPFO coincide com uma harmônica da frequência de rede de alimentação (180 Hz). Na frequência do BPF1 não há valor em destaque e na FTF o sinal se encontra bastante ruidoso, dificultando a localização e análise de quaisquer componentes do espectro.

Um ponto a se esclarecer é que a fim de se minimizar os efeitos de pequenas variações de carga entre as coletas, é feita a normalização dos valores, adotando-se como valor de referência o maior valor presente na coleta. No caso de utilização em máquinas de corrente contínua o maior valor sempre foi dado pelo valor presente em 360 Hz, justificado esse fato pelo *drive* conversor de energia, nos moldes do que foi explicitado no Capítulo 4.

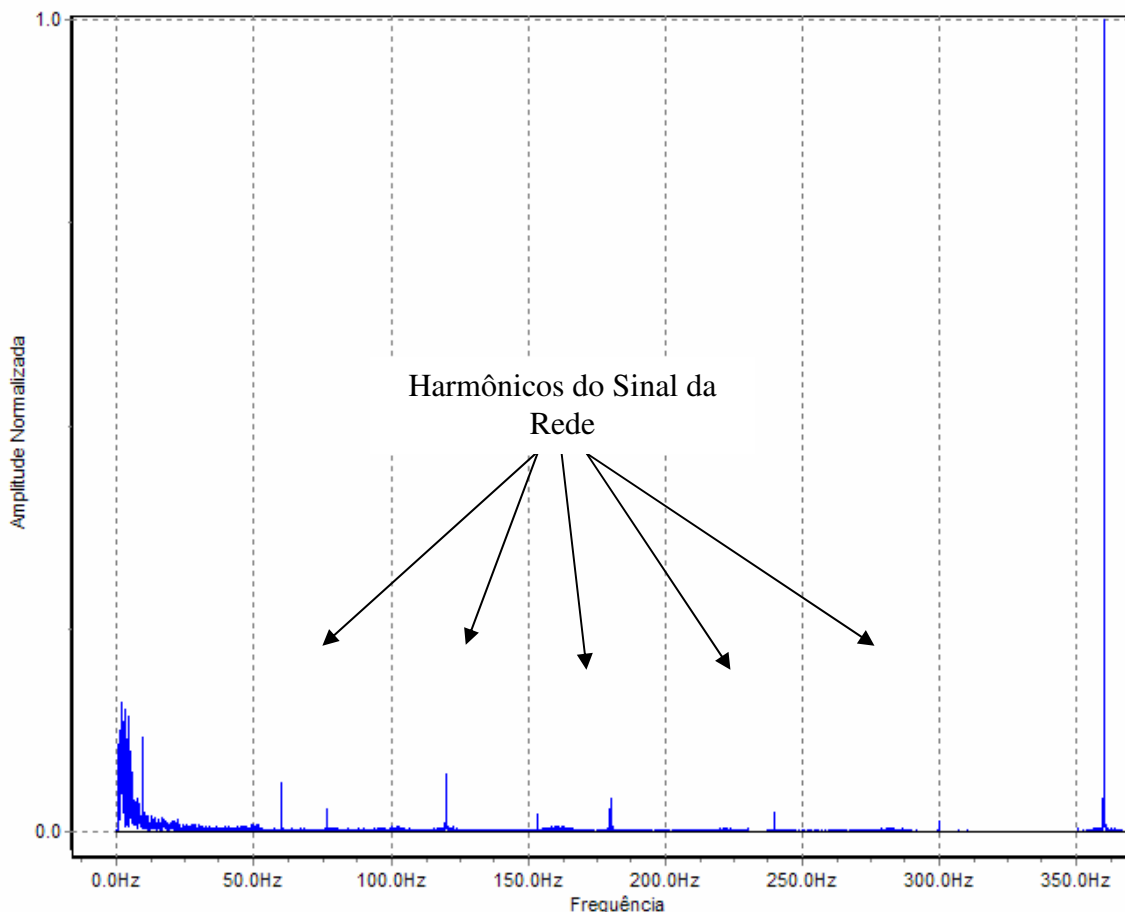


Figura 7.9a - Conteúdo Harmônico do Sinal da Rede

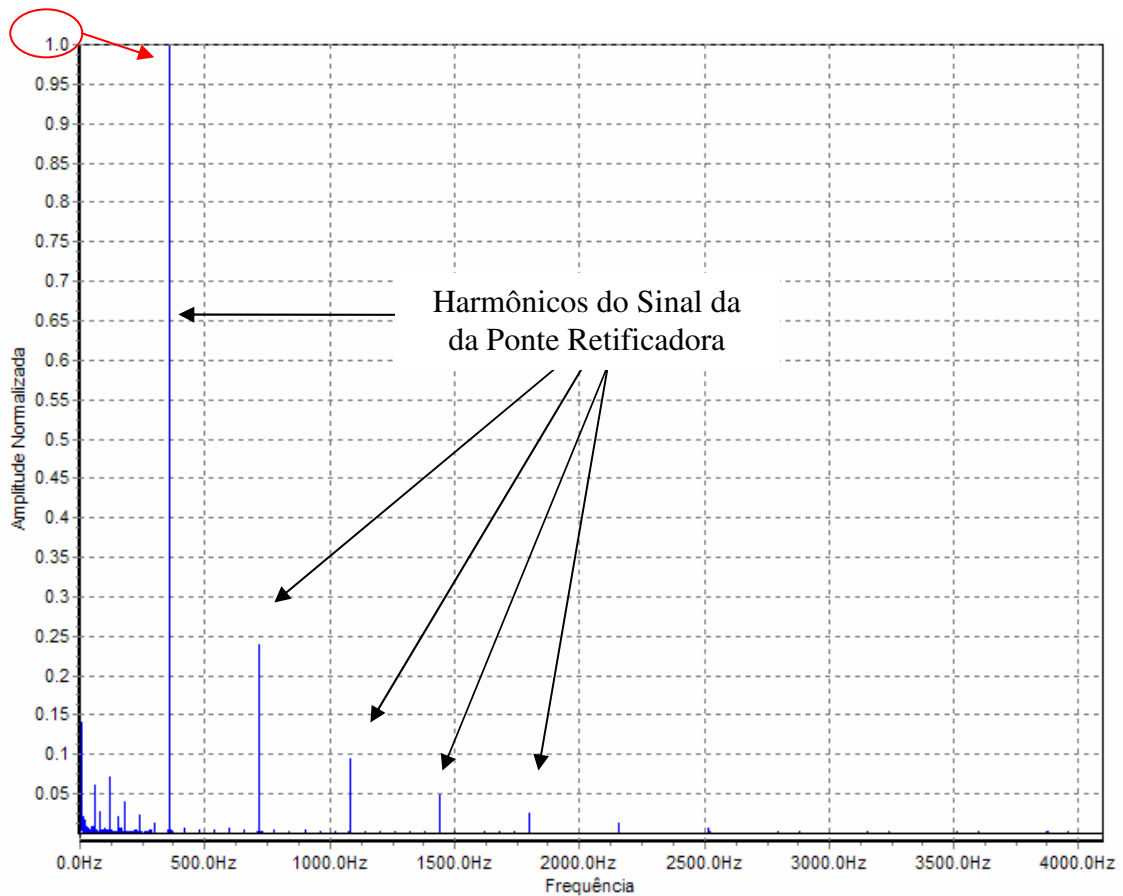


Figura 7.9b - Conteúdo Harmônico da Ponte Retificadora

As figuras 7.9a e 7.9b explicitam o fato apresentado acima, apresentando-se o sinal em 360 Hz como sendo o maior no espectro. Como pode-se observar, tal frequência difere bastante em sua magnitude ao resto do espectro, sendo assim preferível utilizar a diferença em dB para facilitar a comparação.

De posse desses dados, seguem-se as coletas, realizadas em diversos dias e com variação das condições da máquina para que se possa fazer o acompanhamento dos valores referentes ao rolamento do seu mancal, com a primeira coleta apresentada na figura 7.10.

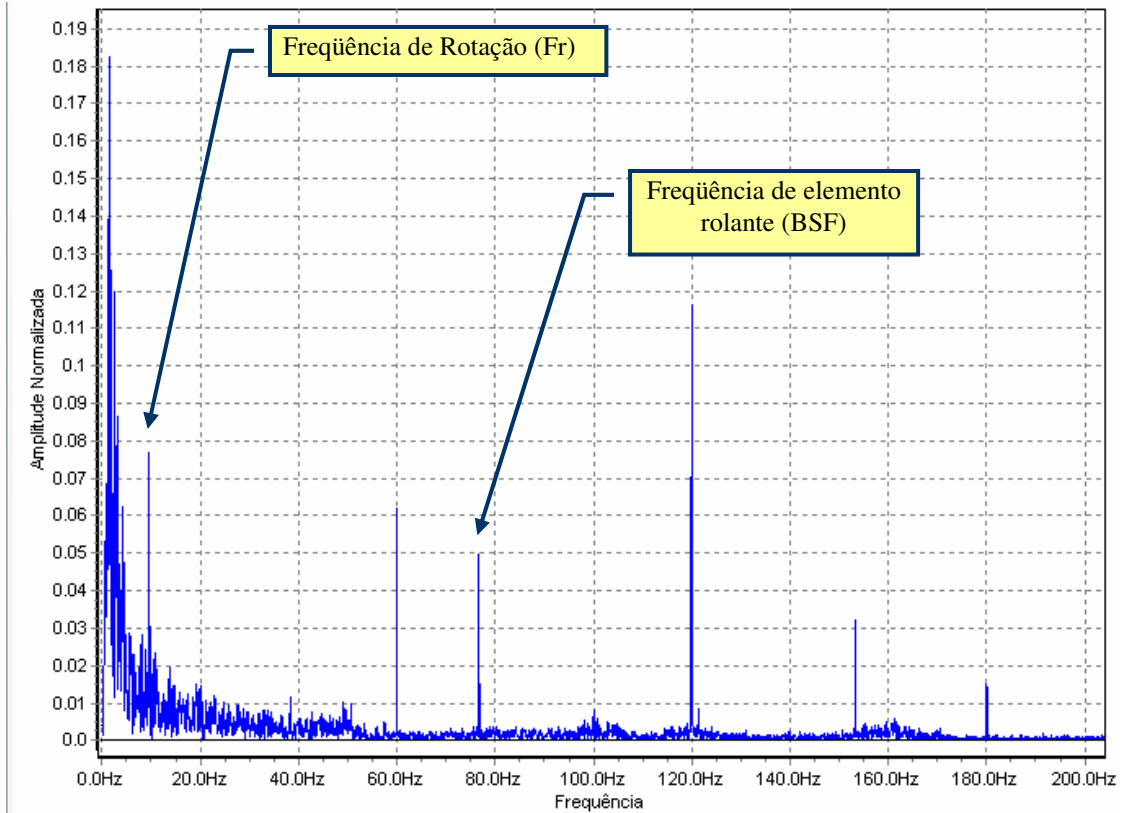


Figura 7.10 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta 04/12/2006

Encontrou-se na coleta de 04/12/2006 o valor de 26 dB para a frequência de BSF, ante ao valor de 37 dB encontrado na primeira coleta (dia 24/11/2006). A componente referente à sua frequência de elemento rolante é maior do que o da primeira coleta (de 0,014 pu a mesma foi para aproximadamente 0,050 pu). Assim, comparando-se com a primeira coleta (do dia 24/11), vê-se que o estado do sistema em 04/12/2006 é pior, apresentando a componente de assinatura do elemento rolante variações significativas nesse período.

Este trabalho visa também confirmar em diversas coletas de que essa análise é comprovada, sendo então seu procedimento repetido, a fim de se ter o acompanhamento histórico. (ver figuras 7.11 a 7.14).

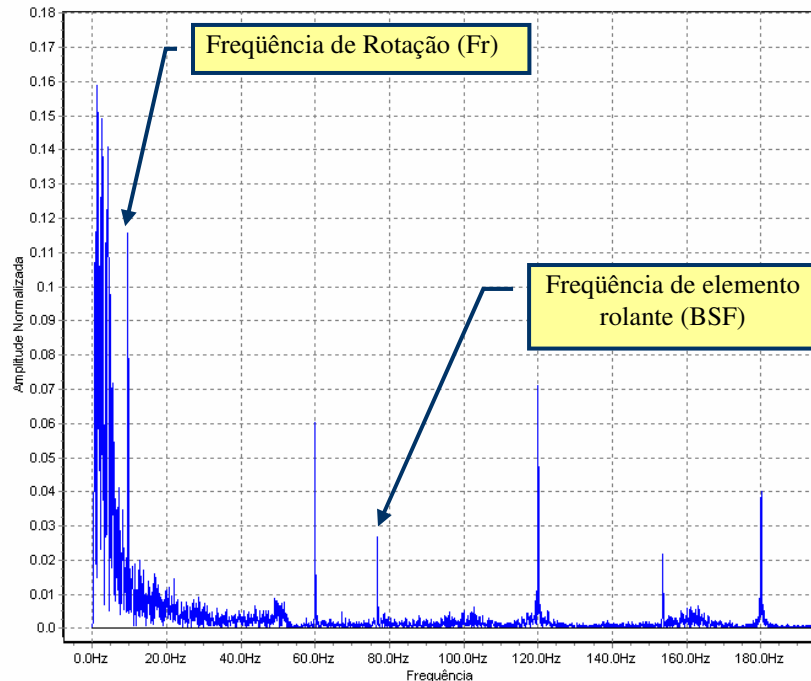


Figura 7.11 – Localização dos Dados no Gráfico – Coleta dia 08/12/2006

No dia 08/12/2006 o valor apresentado para a frequência de elemento rolante foi de 31 dB (apresentado na figura 7.11), indicando que o rolamento encontrava-se em estado de falha menos agravado, próximo ao que se encontrava na primeira coleta (do dia 24/11/2006). Programou-se então outra coleta para o dia 13/12/2006, apresentada na figura 7.12.

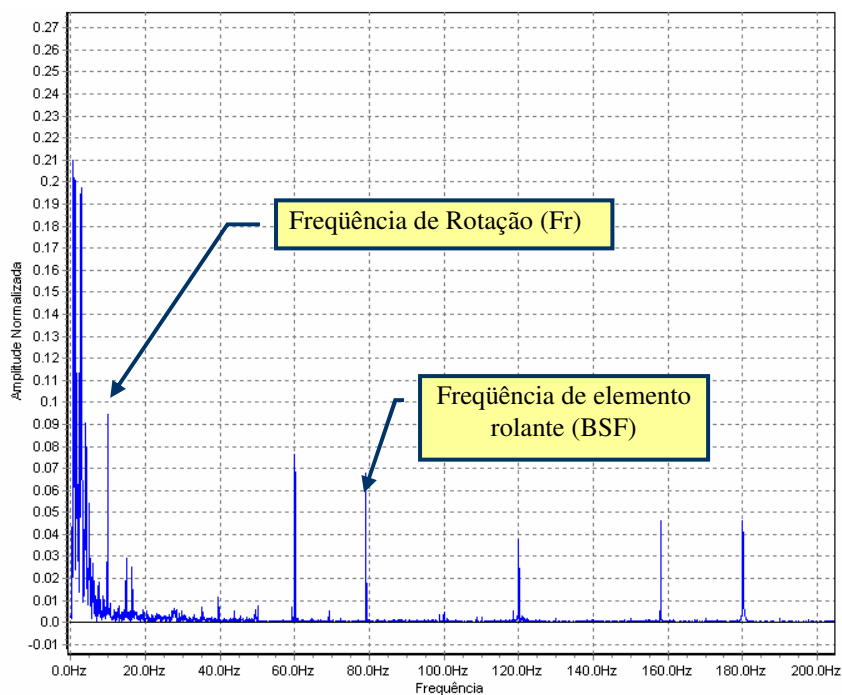


Figura 7.12 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 13/12/2006

O valor de 23 dB indica piora considerável no rolamento que se encontrava na máquina. Isso inclusive pode ser visto ainda mais acentuadamente quando se vê que o valor em pu passou de 0,027 para 0,069 pu.

Novamente foi feita uma nova coleta, também com outro conjunto de mancal e rolamento, a fim de se verificar se haveriam mudanças significativas na frequência BSF (ver figura 7.13).

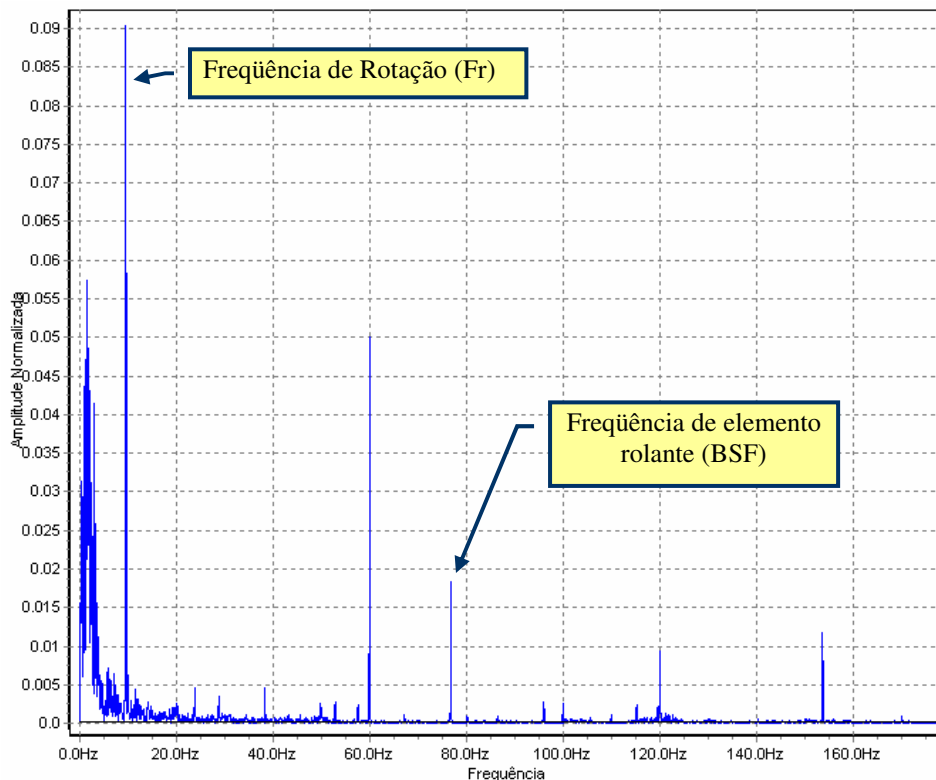


Figura 7.13 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 27/12/2006

A figura 7.13 demonstra a presença do elemento rolante, sendo o valor encontrado 34 dB para a frequência BSF. Esse valor denota que o rolamento do mancal estava em melhores condições, visto que a atenuação em dB foi bastante alta (o valor de 0,017 pu para a componente da assinatura do BSF também pode ser utilizado para se chegar à essa análise).

Por fim, foi feita a última coleta (figura 7.14), para a continuidade do acompanhamento histórico.



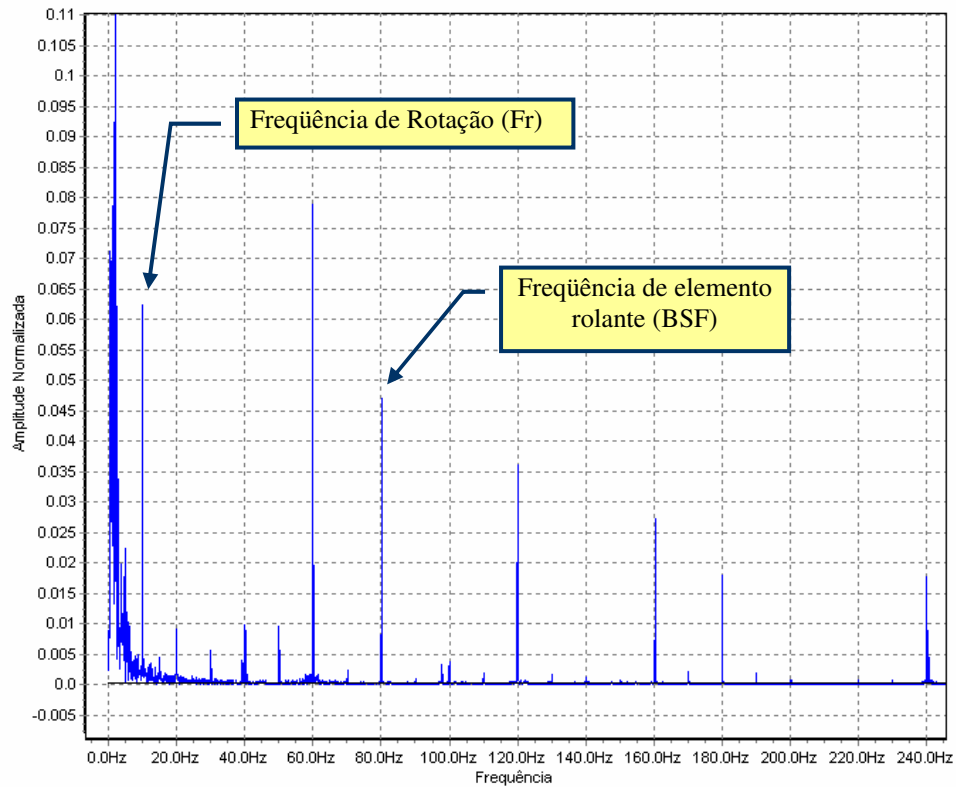


Figura 7.14 – Localização dos Dados no Gráfico - Coleta dia 02/01/2007

A frequência BSF agora apresentava valor de 26 dB, indicando novamente uma piora em relação ao último conjunto.

Os dados dos experimentos foram então resumidos na Tabela 7.1:

Tabela 7.1 – Valores encontrados para o Elemento Rolante (BSF)

Dia	Valor da Frequência de Rotação (dB)	Valores BSF (em pu)	Valor BSF (dB)
24/11/2006	27,47	0,014	37
4/12/2006	22,27	0,049	26
8/12/2006	18,72	0,027	31
13/12/2006	20,51	0,069	23
27/12/2006	21,04	0,017	34
2/1/2007	24,11	0,047	26

A fim de estabelecer mais comparações realizaram-se concomitantemente diversas medições de vibração, na posição horizontal da caixa redutora da máquina, conforme pode-se ver na figura 7.15, que apresenta a primeira coleta de vibrações:

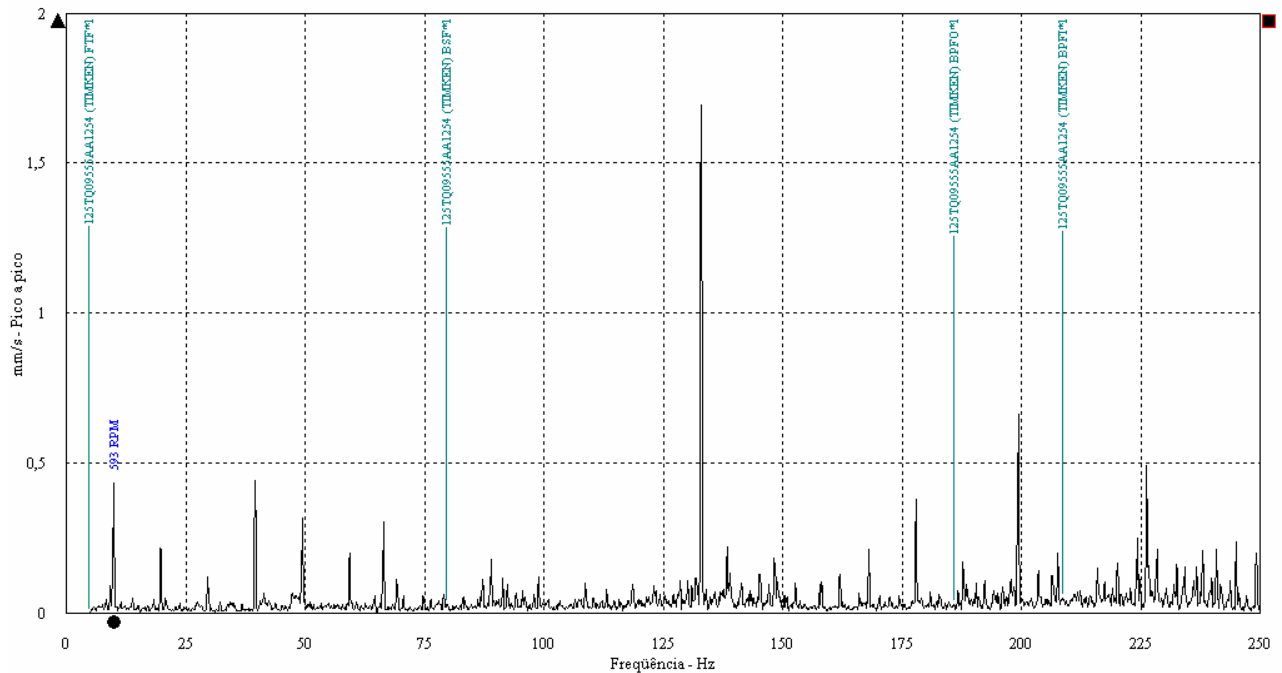


Figura 7.15 – Coleta de Dados de Vibração - Coleta dia 24/11/2006

Entretanto os resultados desse tipo de medição foram insatisfatórios para quaisquer conclusões, mesmo para o analista de vibrações presente no campo, pois:

- Como pode-se observar na figura, o espectro apresentado é extremamente ruidoso, não sendo possível identificar claramente as frequências características de BSF no espectro, e nem mesmo a análise assistida pelo software SKF Machine Analyst.
- A instalação dos equipamentos de análise foi dificultada pelo acesso ao local, sendo possível apenas a instalação na posição horizontal, como já explanado. A correta análise de vibrações demanda uma instrumentação maior, com pontos em diversos eixos da máquina a ser analisada.

Como o objetivo era determinar se a técnica de MCSA pode ser aplicada na detecção de falhas na carga dos motores, no caso os rolamentos dos mancais dos cilindros de trabalho, determinou-se juntamente com a equipe da retífica de cilindros (responsáveis pela montagem

e manutenção dos mancais) o grau estimado de prioridade de manutenção (sendo 1 para o conjunto em pior condição – com manutenção urgente, e 5 para o menos preocupante) do rolamento em posição na máquina. Esclarece-se que há 3 conjuntos de rolamentos (denominados conjunto “A”, “B” e “C”), trocados de forma periódica, sendo a avaliação do grau de prioridade de manutenção dos mesmos de forma visual.

Tais parâmetros serviram como base de comparação com os valores encontrados nas coletas para as frequências de elemento rolante dos rolamentos dos mancais. De posse dos valores anotados para cada coleta, pode-se estabelecer a seguinte correlação:

Tabela 7.2 – Avaria dos Mancais x Valor em BSF

Dia	Conjunto de Mancais e Rolamento	Prioridade de manutenção (de 1 a 5)	Valor da Frequência de Rotação (dB)	Valor BSF (dB)
24/11/2006	A	4	27,47	37
4/12/2006	B	2	22,27	26
8/12/2006	C	3	18,72	31
13/12/2006	B	2	20,51	23
27/12/2006	C	3	21,04	34
2/1/2007	B	2	24,11	26

Fonte: Coleta em Campo – Novelis - Pindamonhangaba

A correlação entre os dados é a comprovação na prática de que falhas incipientes nos elementos rolantes presentes no mancal da carga do motor em questão geram variações de torque no mesmo, que, como já foi debatido e apresentado no referencial teórico, geram variações de fluxo magnético na armadura, e por fim na sua corrente de armadura. Essa comprovação permite à equipe técnica de manutenção preditiva da área verificar continuamente qual é a condição do equipamento instalado e em operação no momento.

O gráfico da figura 7.16 apresenta a comparação dos valores envolvidos:

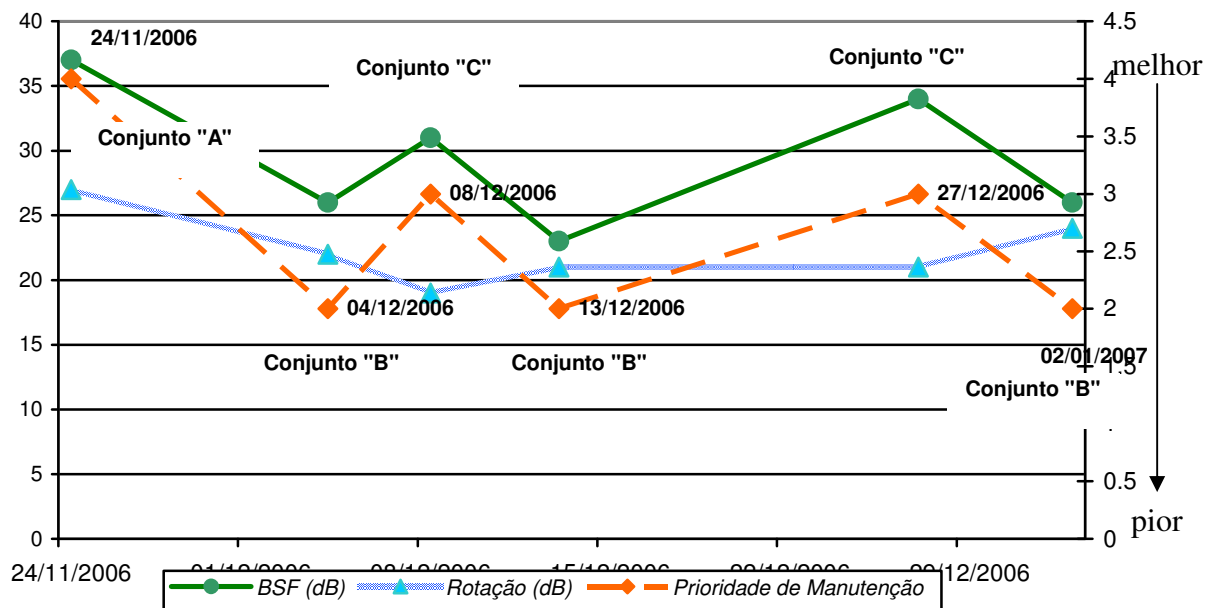


Figura 7.16 – Correlação entre Severidade Estimada x Freqüência do BSF

Vê-se pelo figura 7.16 que existe uma correlação bastante evidente entre a condição estimada do rolamento do mancal e a informação trazida pela assinatura no espectro de corrente do motor para o elemento rolante, confirmando assim a confiabilidade da técnica na detecção e acompanhamento de falhas em sistemas mecânicos, na carga do motor.

Já a correlação entre o elemento rolante (BSF) e a freqüência de rotação não é tão evidente, possivelmente porque sobre a freqüência de rotação incidam também outros efeitos presentes no sistema mancal – eixo pinhão e motor.

Na prática, a avaliação dessas condições faz com que a análise histórica seja considerada bastante válida nessa aplicação, podendo nesse caso inclusive estabelecer-se um padrão de alarme para auxílio na decisão de se trocar ou não o mancal em operação no laminador.

Além disso, a avaliação preditiva dos mancais permite que se busque a máxima produtividade do laminador, bastando estabelecer relação entre a velocidade de rotação dos cilindros de trabalho do mesmo com a condição do mancal inserido na máquina.

Diante da confirmação prática, ressaltam-se também as diversas vantagens da técnica de MCSA, aplicadas nesse caso, como o custo da instalação de equipamentos, considerado ínfimo diante da possibilidade de se aumentar a produtividade do sistema inteiro; a sua acessibilidade, visto que a instalação do equipamento para acompanhamento dos motores foi considerada bastante fácil, bastando-se acoplar o transdutor de corrente no painel elétrico de

alimentação do motor; a sua rapidez de diagnóstico, bastando para isso analisar a componente sob estudo no seu espectro de frequências; mas, principalmente, a sua abrangência e confiabilidade de diagnóstico.

### 7.2.1 Considerações

Entre as coletas houve variações das condições do motor a ser analisado, devido a fatores externos (material sendo processado, regime térmico da máquina, etc). Com isso, houve a preocupação de se comparar os dados sempre sob a mesma base. Para isso foi feita a normalização dos valores encontrados das frequências com base no maior valor (dado pela magnitude da frequência de 360 Hz, da ponte retificadora), além da avaliação da carga do motor, dada pela figura 7.17:

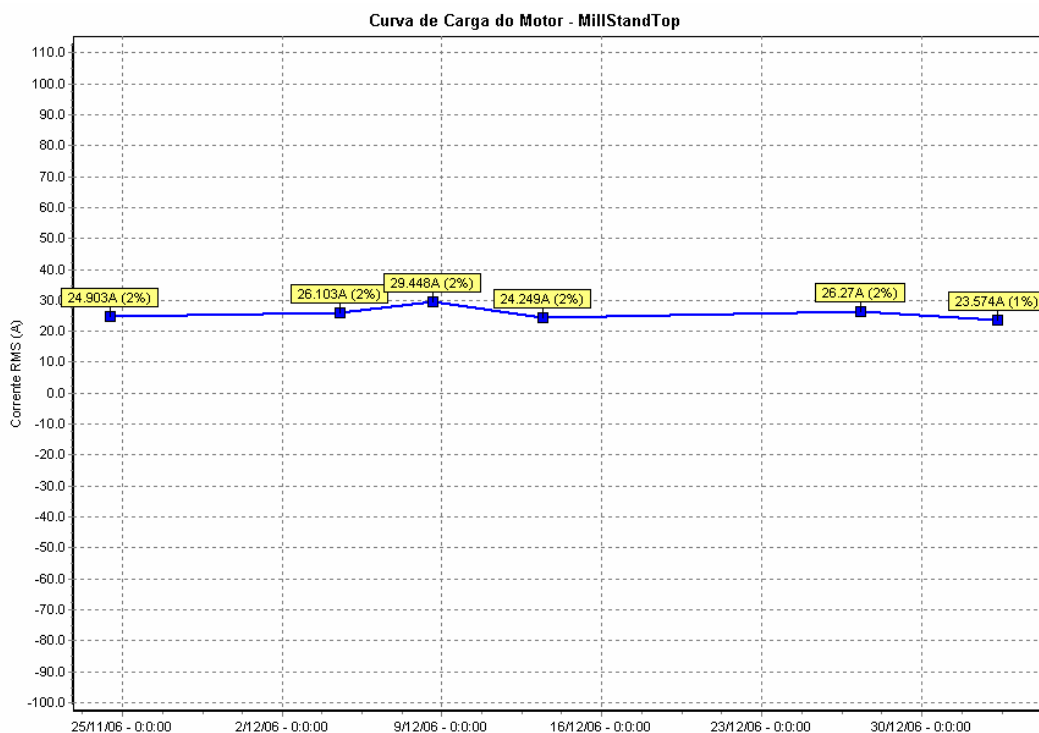


Figura 7.17 – Curva de Carga das Coletas

Como se pode ver na figura 7.17 existe uma pequena variação de carga entre as análises. Na prática, como já foi exposto, isso em nada prejudica a análise, pois foi feita a

normalização dos valores em relação ao máximo valor do espectro.

De acordo com o apresentado no item 7.2, a frequência de elemento rolante foi bastante marcada quando da troca de mancais. Isso facilitou em muito a análise, possibilitando, inclusive, o desenvolvimento de padrões que possam servir como carta de severidade para o problema específico em questão.

No problema específico tratado nesse estudo a técnica de MCSA pode ser utilizada para a avaliação de padrões de condição de maquinários, permitindo que se possa estabelecer parâmetros de condições de uso desses maquinários, levando a um conseqüente aumento de produtividade da fábrica, ficando demonstrado sua relevância para o ambiente industrial.

## 8 CONCLUSÕES

Com esse trabalho, verificou-se que a técnica de MCSA tem larga aplicação na indústria. Antes aplicada somente a Motores de Indução Trifásicos, a mesma foi objetivo de aplicação experimental em Motores de Corrente Contínua. Seu uso e desenvolvimento justificam-se, devido à importância econômica desses motores em suas aplicações, geralmente críticas em relação a paradas para manutenção corretiva.

Com isso, buscou-se primeiro embasar-se teoricamente, para que depois fosse feita uma avaliação em laboratório e outra em campo, onde se confirmou que a técnica pode ser adaptada para uso em MCC, com a modificação de se medir não o sinal inteiro em sua forma DC, mas sim o sinal AC resultante da retificação (ou seja, o *ripple*).

Nos testes laboratoriais viu-se que a frequência de rotação da máquina é facilmente identificada, permitindo-se com isso utilizar-se diversos dos padrões desenvolvidos ao longo do trabalho apresentado em [18], por exemplo, para as análises de padrões de falhas na assinatura de corrente do motor. Exemplo claro disso foi a caracterização da falha provocada no rolamento, confirmando-se que o padrão de falha do mesmo refletiu o defeito imposto. Esse efeito foi, inclusive, agravado quando a máquina operava com carga, sendo isso uma das grandes vantagens apresentadas de MCSA, visto que se incentiva o uso dessa técnica quando a máquina apresenta carga próxima à nominal, não sendo necessária nenhuma parada de máquina para sua aplicação.

A experiência realizada em campo foi bastante rica em diversos aspectos da técnica:

- Confirmação prática da aplicabilidade da técnica: viu-se que a mesma pode ser aplicada na detecção de falhas em elementos da carga do motor, e mesmo com a transmissão e a caixa redutora como “filtros”, a assinatura de corrente apresentou bastante exatidão em apresentar um padrão para os mancais que apresentavam seus rolamentos defeituosos.
- Utilização da técnica para cargas variáveis entre medições: Em contrapartida ao impedimento da utilização da técnica quando a coleta é feita durante variações de carga (ou seja, quando o sinal não é estacionário), a mesma pode ser aplicada para cargas variáveis, tomando-se o cuidado de mantê-la constante ao longo da coleta, bastando-se para a análise efetuar a normalização dos dados.
- Comparação com a técnica de vibrações: As análises de vibrações foram realizadas

medindo-se na posição horizontal da caixa redutora do motor. Vê-se nas mesmas que o seu espectro é muito mais poluído do que a análise corrente apresentada. Assim a sua análise é considerada mais difícil, exigindo outras medições, além de mais perícia de quem as faz e analisa.

- Frequências harmônicas resultantes da alimentação da rede e da ponte retificadora: O analista deve tê-las em mente quando fizer as coletas, pois, conforme foi demonstrado no caso da frequência da pista externa do rolamento utilizado no experimento em campo, por vezes a mesma se confunde com a frequência de interesse do padrão de alguma determinada falha. Para que isso não ocorra, o analista precisa separar as harmônicas da rede e também as harmônicas da ponte retificadora (conforme visualiza-se na figura 6.9).

Diante do apresentado tanto em confirmação laboratorial quanto em campo, vê-se que a técnica de MCSA é plenamente aplicável aos Motores de Corrente Contínua, desde que os aspectos básicos apresentados em 4.3 sejam respeitados.

De forma geral viu-se que os padrões apresentados foram de muita utilidade para a manutenção preditiva, visto que os mesmos refletiram os defeitos apresentados nos motores em estudo de forma bastante clara, tanto na forma de análise de *troubleshooting* no caso laboratorial, como na forma de acompanhamento histórico e *troubleshooting* nos testes em campo.

## 8.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

A aplicação de técnicas de manutenção preditiva em Motores de Corrente Contínua pode ser desenvolvida, no ponto de vista desse trabalho, das seguintes formas:

- Outros tipo de padrões e características de carga: Técnicas de *short-time Fourier* e *Wavelets*, por exemplo, podem ser usadas na análise dos padrões para se minimizar ou mesmo eliminar os efeitos da variação de carga, e a técnica poderia ser aplicável a sinais não estacionários. Além disso, outro tipos de modulação, como a modulação por fase, podem ser estudadas na caracterização de sinais que apresentam frequências de assinatura que se confundem com outras, como é o caso do BPFO na aplicação em campo desse trabalho, que se confunde com o 3 harmônico da rede de alimentação.
- Aplicação de agentes inteligentes na detecção de falhas: Assim como já ocorre em



Motores de Indução Trifásicos, sugere-se que as ferramentas de análise tenham ferramentas de localização automática dos padrões de falhas. A aplicação assistida dessas ferramentas facilita o trabalho do analista, bastando ao mesmo conferir os padrões e diagnósticos do sistema.

- Desenvolvimento de ferramentas que tenham o comando do início de coleta: Os motores de corrente contínua são geralmente aplicados em locais onde os mesmos passam constantemente por aceleração e desaceleração, dificultando-se a programação automática das coletas de dados que aproveitem carga constante por softwares externos ao sistema de controle do sistema. Como esses motores são acionados muitas vezes por equipamentos que dispõem de diversos protocolos de comunicação, considera-se que caso o próprio equipamento da planta fabril possa ter a lógica interna implementada para comandar a coleta de dados, gerando o sinal para que se dispare a coleta.

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, Márcio Tadeu. **Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade**. MTA, <http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf>. Consultado em 13/02/2007.
- [2] SEIXAS, Eduardo de Santana. **A situação da manutenção no Brasil – Documento Nacional - ABRAMAN**. 55º Congresso da ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Rio de Janeiro, 2000.
- [3] LEVITT, Joel. **Complete Guide to Predictive and Preventive Maintenance**. Industrial Press, 2002.
- [4] WEG. **Manual de Instalação e Manutenção – Motores de Corrente Contínua**. Jaraguá do Sul, 2003.
- [5] FERREIRA, Dirceu. **Princípios de Acionamento de Corrente Contínua – Conversores CA/CC**. PWR Automação e Robótica, 2001.
- [6] SANDERBERG, Kristian. **An overview of Fourier analysis for signal processing**. <http://amath.colorado.edu/courses/3310/OLDER/2001fall/Improc/Webpages/fourier/> Consultado em 30/07/2006.
- [7] SMITH, Steven W. **Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists**. [www.dspguide.com](http://www.dspguide.com), 2002. Consultado em 18/07/2006.
- [8] **ABB Guide to Harmonics with Variable Frequency Drives**. [http://www.joliettech.com/abb\\_guide-to-harmonics-with-ac-drives.htm](http://www.joliettech.com/abb_guide-to-harmonics-with-ac-drives.htm) Consultado em 15/12/2006.
- [9] HUMPHREY, Dave. **“Motor Testing” – Which Road Will you Take?** Indianapolis, Allison Transmission. IEEE Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003.
- [10] Globalpred. **Termovisão/ Termografia**. [www.globalpred.com.br](http://www.globalpred.com.br). Consultado em 22/02/2006.

- [11] TOWNSEND, J. **Princípios da Termografia**. <http://www.termografia.com.br/#topico>. Consultado em 24/02/2006.
- [12] PENROSE, Howard. **Direct Current Motor Electrical Evaluation Using Motor Circuit Analysis**. [www.alltestpro.com/pdf/DC%20Motors%20Paper.PDF](http://www.alltestpro.com/pdf/DC%20Motors%20Paper.PDF). Consultado em 21/03/2006.
- [13] PENROSE, Howard. **Motor Diagnostics Part 5 – DC Motor Analysis**. PdMA Corporation, 2004. [www.motordiagnosics.com/downloads/](http://www.motordiagnosics.com/downloads/) Consultado em 18/03/2006.
- [13] ALMEIDA, Márcio Tadeu. **Manutenção Preditiva - Confiabilidade e Qualidade**. MTA, <http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>. Consultado em 14/02/2006.
- [14] GOLDMAN, Steve. **Vibration Spectrum Analysis**. 2a. Edição, Industrial Press, 1999.
- [15] SCHEFFER, Cornelius e GIRDHAR, Paresh. **Practical Machinery Vibration Analysis And Predictive Maintenance**. Ed. Newnes, 2004.
- [16] COURTNEY, Stuart. **Vibration & Ultrasound Technologies: A Possible Integrated Inspection Tool?**. SKF, 18th International Maintenance Conference, 2003.
- [17] PICKENS, Sam. **Vibration Trouble-shooting Field Guide**. PDM Engineering. [www.reliabilityweb.com](http://www.reliabilityweb.com). Retirado em fevereiro/2007.
- [18] BONALDI, E. L. **Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator**, Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2002.
- [19] PENROSE, H. **Practical Motor Current Signature Analysis- Taking the Mystery Out of MCSA**. <http://www.alltestpro.com/pdf/PracticalSignatureAnalysis.pdf>. Consultado em 13/03/2007;
- [20] THOMSON, W.T. FENGER, M. **Current signature analysis to detect induction motor faults**. IEE Industry Applications Magazine. Jul/ Agosto, 2001, pag. 26-34.
- [21] PENROSE, Howard. **Motor Circuit Analysis: Theory, Application and Energy Analysis**. BJM Corp, 2001.

- [22] PENROSE, Howard. **Applications for Motor Current Signature Analysis**. All-Test Pro, 2004.
- [23] McKINNON, David L. **Online Fault Analysis of DC Motors**. PdMA Coporation. [http://www.pdma.com/PDF/Articles/Online\\_Fault\\_Analysis\\_of\\_DC\\_Motors.pdf](http://www.pdma.com/PDF/Articles/Online_Fault_Analysis_of_DC_Motors.pdf). Consultado em 25/01/2007.
- [24] BONALDI, Erik e OLIVEIRA, Levy Ely de Lacerda de. **Proposição de um Procedimento de Aplicação da Técnica de Análise da Corrente Elétrica para Manutenção Preditiva de Motores de Indução**. 20 COMADEN – International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. Faro, Portugal, 13-15 de junho de 2007.
- [25] MARTIN, Robert. **Harmonic Currents**. ITS Intertek Testing Services. <http://www.cemag.com/99ARG/Martin103.html>. Consultado em 18/01/2007.
- [26] LIU, Xiang-Qun; ZHANG, Hong-Yue; LIU, Jun; YANG, Jing. **Fault detection and diagnosis of permanent-magnet DC motor based on parameter estimation and neural network**. IEEE Transactions on Industrial Eletronics. Outubro, 2000, pag. 1021-1030.
- [27] KLIMAN G.B., STEIN J. **Methods of motor current signature analysis**. Electric machines and power systems. 1992, pag. 463-474.
- [28] BONALDI, E. L. **Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, 2006.
- [29] NICHOLAS, Jack R. **Future of Condition Monitoring, Computerized Maintenance and Plant Reliability & Maintenance**. Maintenance Quality Systems - LLC. [www.reliabilityweb.com](http://www.reliabilityweb.com). Retirado em fevereiro/2007.
- [30] JONES, Roger W.; SEAVER, Delbert. **Investigation and Results of Eddy Currents on DC Motor Bearings**. IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1990.
- [31] LOZOWSKI, Gary E. **Maintenance Concerns for Good Operation of DC Motors**. IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2001.

[32] PGE - Pacific Gas and Electric Company, **Efficiency Opportunities through Motor Maintenance**. PG&E Energy Efficiency Information. 2004.

[33] WEG. **Características e Especificações de Motores de Corrente Contínua e Conversores CA/CC**. Jaraguá do Sul, 2003.

[34] ISLAM, Syed M., HAMILTON, Michael J., LAWRENCE, William B., NAYAR, Chem V. **Investigation of Harmonics from Variable Speed Drives with Six Pulse Rectifiers Under Imperfect Supply Conditions**. IEEE Industry Applications Conference, Vol. 3, 2000.

[35] Catálogo Tinkem de Rolamentos - 2006.