

CEFET MG – UNED ARAXÁ

**COMPROVAÇÃO DA EFICÁCIA DA TÉCNICA DE ANÁLISE DE
FLUXO MAGNÉTICO NA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES
ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO NA INDÚSTRIA.**

Erli de Oliveira Gonçalves Júnior

ARAXÁ - MG

2012

ERLI DE OLIVEIRA GONÇALVES JÚNIOR

**COMPROVAÇÃO DA EFICÁCIA DA TÉCNICAS DE ANÁLISE DE
FLUXO MAGNÉTICO NA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES
ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO NA INDÚSTRIA.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como um dos pré-requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Henrique José Avelar

ARAXÁ – MG

2012

FOLHA DE APROVAÇÃO A SER ANEXADA NA VERSÃO IMPRESSA

Este trabalho é dedicado à minha família, nas pessoas de minha mãe Carolina, meu filho Enzo, meus irmãos Fernando, Silas, Antônio, Wender, Rafael e Fred. Ao meu grande amor, fonte de inspiração Fernanda e toda a turma "Metal", por sempre terem acreditado em mim.

AGRADECIMENTOS

Sem sombra de dúvidas agradeço primeiramente ao Criador, pois como uma criação deste, pude aprender, criar, viver, estudar e amar minha família, amigos e todas as genialidades do homem e as maravilhas de Deus. Agradeço a todos os meus professores, amigos de classe, de vida e a minha família, pois esses sempre me carregaram nessa jornada de aprendizado e conquistas.

A todos vocês, muito obrigado.

Tu és eternamente responsável por aquilo que cativas.

Antoine de Saint Exupéry

RESUMO

Desde que a indústria tomou rumo à mecanização e automatização de suas tarefas, percebe-se o emprego cada vez maior do número de motores elétricos utilizados em seus processos. Isso se deve à facilidade de uso, baixo custo operacional, ecologicamente corretos, de fácil manutenção e com um custo relativamente baixo de aquisição. Devido à crescente competitividade das plantas industriais, a busca por menores custos produtivos, mais eficiência, redução de preços de seus produtos e maiores lucros, tornaram-se os principais alvos das empresas. Para que isso seja uma verdade, precisamos de plantas e maquinários com confiabilidade elevada e altos níveis de disponibilidade, evitando assim paradas imprevistas e frequentes, minimizando perdas e produzindo mais devido à alta disponibilidade. Nesse contexto, demanda-se de técnicas de monitoramento da condição das máquinas que sejam não invasivas, não destrutivas e que possam ser realizadas com os motores em operação. Com isso, evitam-se paradas para a realização de testes, por falhas não monitoradas e para a realização de manutenções preventivas periódicas baseadas apenas no tempo. Tudo isso impactando negativamente na disponibilidade e na produtividade por consequência. Para isso, este estudo visa realizar uma explanação sucinta do funcionamento de motores elétricos de indução com gaiola de esquilo, realizar uma revisão bibliográfica dos equacionamentos matemáticos que determinam as frequências de falha e comprovar o uso da técnica de análise de fluxo magnético e espectro de corrente na detecção de falhas incipientes em motores elétricos de média tensão aplicados em condições reais na indústria. Essas técnicas são realizadas com os motores em operação e sem a necessidade de abertura dos mesmos, sendo adequada para a alta demanda de disponibilidade da indústria atual. Existem diversos estudos acadêmicos da aplicação da técnica, contudo em condições laboratoriais em motores de baixa tensão e pequena potência, sendo esse estudo focado em motores de média tensão e grande potência aplicados na indústria.

Palavras-chave: Motores elétricos de indução. Fluxo magnético. Espectro de corrente. Manutenção preditiva.

ABSTRACT

Since that industry has taken towards mechanization and automation of its tasks, we can see a large increase in the number of electric motors used in their processes. This is due to ease of use, low operating cost, environmentally friendly, easy to maintain and with a relatively low cost of acquisition. Due to the increasing competitiveness of industrial plants, the search of lower production costs to be more efficient and able to put their products at the lowest possible price in the market and gain higher profits became the main target of them. To make it real, we need plants and machinery with high reliability and availability, avoiding unplanned and frequent stops, minimizing losses and producing more due to high availability. In this context, we need technical condition monitoring of machines that are not invasive, non-destructive and can be performed with the motors running. This avoids stops for testing, breaks due lack of monitoring or failures and stops to perform periodic preventive maintenance based only on time. All negatively impacting on the availability and productivity as a consequence. For this reason, this study aims to conduct a brief explanation of the operation of electric motors with squirrel cage induction, a bibliographic review of mathematical equations that determine the frequency of failure and to confirm the use of the technique of magnetic flux and spectrum of current on the detection of incipient faults in medium voltage electric motors applied in real conditions in the industry. Those techniques are performed with motors operating without the need of opening them, being suitable for the high demand of availability of for current industry. There are many academic studies of the technique, however, under laboratory conditions in low voltage motors and small power, and this study focused on medium voltage motors and high power applied in the industry.

Keywords: Electric Induction Motors. Magnetic flux. Spectrum of current. Predictive Maintenance. Condition monitoring.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Classificação de motores	15
FIGURA 2 - Motor em bom estado.....	20
FIGURA 3 - Falta de fase em estrela.....	21
FIGURA 4 - Falta de fase em triângulo.....	21
FIGURA 5 - Curto-circuito entre fases	22
FIGURA 6 - Curto-circuito entre espiras	22
FIGURA 7 - Bobina curto circuitada	23
FIGURA 8 - Bobina em curto para massa na saída da ranhura	24
FIGURA 9 - Bobina em curto para massa no meio da ranhura	24
FIGURA 10 - Curto-circuito nas ligações	25
FIGURA 11 - Fase danificada devido a desequilíbrio de tensão	25
FIGURA 12 - Enrolamento danificado por sobrecarga	26
FIGURA 13 - Defeito causado por travamento do rotor.....	27
FIGURA 14 - Enrolamento danificado por surto de tensão	28
FIGURA 15 - Rotor com barra quebrada	28
FIGURA 16 - Domínio do tempo e da frequência	31
FIGURA 17 – Coleta de corrente	32
FIGURA 18 - Regra da mão esquerda.....	33
FIGURA 19 - Vista explodida de um motor de indução	34
FIGURA 20 - Processo de coleta do fluxo magnético.....	35
FIGURA 21 - Picos múltiplos da frequência da linha	37
FIGURA 22 - Espectro das frequências de rotações do eixo e síncrona	40
FIGURA 23 - Frequência da corrente no rotor devido ao escorregamento	42
FIGURA 24 - Harmônicos da frequência de escorregamento	43
FIGURA 25 - Espectro para $k=1$ $f = 119,31$ Hz.....	44
FIGURA 26 - Espectro para $k=1$ $f = 79,55$ hz	45
FIGURA 27 - Frequência de passagem de ranhuras no estator	46
FIGURA 28 - Bandas laterais de $2xfs$ em torno da f_{psp}	47
FIGURA 29 - frss banda inferior $k=1$	48
FIGURA 30 - frss banda superior $k=1$	48
FIGURA 31 - flfs banda superior $n=1$	49
FIGURA 32 - flfs banda inferior $n=1$	50
FIGURA 33 - Frequência de passagem de barras do rotor	51
FIGURA 34 - Bandas laterais de $2xfl$ em torno da f_{psp} do rotor	52
FIGURA 35 - frsr banda superior mais fr	53
FIGURA 36 - frsr banda inferior mais fr	53
FIGURA 37 - Banda lateral superior de $2xfs$ da $f_{pspr} + fs$	54
FIGURA 38 - Banda lateral superior de $2xfs$ da $f_{pspr} - fs$	55
FIGURA 39 - Representação do curto-circuito entre espiras.	57
FIGURA 40 - Curto entre espiras em baixa frequência	59
FIGURA 41 - fra para $k=3$	61
FIGURA 42 - Bandas laterais de sfs da rotação	62
FIGURA 43 - Bandas laterais de $2xsfs$ em torno da frequência da linha	63
FIGURA 44 - Rotor com gaiola de esquilo	64
FIGURA 45 - Frequência de anel quebrado $s.fs$	65
FIGURA 46 - Fsva mais sensível	66
FIGURA 47 - Equação simplificada de assimetria de tensão	68
FIGURA 48 – Bandas laterais de s.fs da rotação	76
FIGURA 49 – Bandas laterais de s.fs da frequência da linha.....	77
FIGURA 50 - Vista do estator.....	75
FIGURA 51 - Visão 1 da falha detectada.....	76
FIGURA 52 - Visão 2 da falha detectada.....	77
FIGURA 53 - Visão 3 da falha detectada.....	78
FIGURA 54 - Visão 4 da falha detectada.....	79
FIGURA 55 - Visão 5 da falha detectada.....	79
FIGURA 56 - Visão 6 da falha detectada.....	80

FIGURA 57 - Visão 7 da falha detectada.....	81
FIGURA 58 - Rotor exposto	81
FIGURA 59 - Sinal de atrito no rotor	82
FIGURA 60 - Sinal de atrito no rotor - vista 2	82
FIGURA 61 - Sinal de atrito no rotor - vista 3	83
FIGURA 62 - Motor da bomba 62.21.01 - medição de fluxo magnético	84
FIGURA 63 -Termografia da bomba 62.21.01	84

LISTAS DE SIGLAS

fmm – força magneto-motriz.

fpc – frequências causadas pelas correntes do estator.

fs – frequência da linha.

fsync – frequência síncrona do campo girante.

p – pólos.

fr – frequência de rotação do eixo.

s% - escorregamento percentual.

rpm – rotações por minuto.

dfrq – diferença de frequências.

s – escorregamento.

frc – frequências causadas pelas correntes do rotor.

fss – frequências das ranhuras do estator.

f2lfs – bandas laterais de $2xfs$ em torno da f_{psp}.

qs – quantidade de ranhuras do estator.

frss – bandas laterais da frequência de rotação na f_{psp}.

fsfs – bandas laterais de $s.fs$ da f_{psp}.

fLfs – Bandas laterais de fs na f_{psp}.

f_{psp} – frequência da passagem de ranhuras, do estator ou rotor.

F_{psps} – f_{psp} das ranhuras do estator.

F_{pspr} – f_{psp} das ranhuras do rotor.

Qr – Número de barras do rotor.

Frs – frequências das ranhuras do estator.

F2Lfr – Bandas laterais de $2xfs$ na f_{pspr}.

Frsr – bandas laterais de fr na f_{pspr}.

Fswf – frequências de curto entre espiras.

Fra – frequências causadas por assimetrias do rotor.

FBB – frequências causadas por barras quebradas no rotor.

Fber – frequências causadas por anel do rotor quebrado.

Fsva – frequências causadas por assimetrias de tensão.

LF – Frequência da linha.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO	17
3. PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO.....	20
4 ANÁLISES DE CORRENTE E FLUXO MAGNÉTICO.....	30
4.1 Análise por espectro de corrente	30
4.2 Análise por fluxo magnético	32
5 REVISÃO MATEMÁTICA	36
5.1 Frequências magneto-motrizes (fmm) devido à corrente do estator.....	36
5.2 fmm causadas por uma fonte trifásica balanceada	38
5.2.1 Campos girantes no sentido direto.	38
5.2.2 Campos girantes no sentido reverso.	38
5.3 Fluxo devido às correntes induzidas no rotor	39
6 EQUAÇÕES DETERMINÍSTICAS DE FALHAS	56
6.1 Detecção em baixa frequência - Curto-circuito entre espiras.....	56
6.2 Detecção de curto-circuito entre espiras pela passagem de ranhuras.....	60
6.3 Detecção de assimetrias no rotor	60
6.3.1 Detecção de barras quebradas do rotor.....	61
6.3.2 Detecção de barras quebradas do rotor.....	62
6.4 Detecção de anel quebrado no rotor	63
6.5 Detecção de assimetrias no estator	65

7 ESTUDO DE CASO	69
7.1 Contexto da aplicação	69
7.2 Metodologia aplicada	69
7.3 Comparação entre os espectros dos motores	70
7.3.1 Bandas laterais de <i>s.fs</i> na frequência de rotação	70
7.3.2 Bandas laterais de <i>s.fs</i> e <i>2xs.fs</i> em torno da frequência da linha.....	71
7.4 Descrição da falha.....	75
7.5 Termografia do motor	83
7.5.Termograma do motor	84
8 RESULTADOS.....	86
9 CONCLUSÃO	87
10 REFERÊNCIAS.....	89

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de todos os tipos de bens de consumo, o mundo industrial vive em constante busca pela otimização de seus processos. Os recursos naturais são finitos e cada vez mais escassos. A competitividade crescente e a necessidade de atender ao mercado consumidor com volumes cada vez maiores e prazos cada vez menores tem feito com que a indústria busque a excelência produtiva.

Dentro desses aspectos se inclui a disponibilidade de todo o maquinário de uma planta produtiva. Esses devem estar prontos para operar a maior parte possível do tempo, sob pena de impactarem em perdas produtivas caso falhem subitamente, além dos custos de seus reparos afetarem diretamente as despesas de manutenção e por fim o custo operacional do produto, o que afeta a competitividade da planta.

Nesse contexto de disponibilidade e custos de manutenção incidindo diretamente no custo do produto, este estudo visa focar no carro chefe, dentre os maquinários existentes em uma planta industrial, a força motora que produz todo o trabalho, os motores elétricos. Esses, portanto, são importantes alvos na continuidade operacional e devem ser monitorados de perto, pois a ocorrência de falhas nesses causam a parada de uma planta, a redução da capacidade produtiva e o custo com sua troca e reparo.

Dentro da vasta quantidade de modelos existentes e aplicados na indústria de motores elétricos (ver figura 1 – Tipos de Motores Elétricos – Manual WEG), os mais utilizados e alvo desse estudo são os motores de indução assíncronos, também conhecidos como motores assíncronos ou, simplesmente, motores de indução.

de casos reais, em que as técnicas foram aplicadas a uma indústria de mineração, em motores de média tensão e grandes potências.

Devido à impossibilidade de realização da maioria dos testes elétricos convencionais nos motores elétricos energizados, visto o fato de serem necessários ao processo produtivo continuamente, faz-se necessário a aplicação de uma técnica não invasiva e dinâmica, que possa ser aplicada com o motor energizado, em plena operação.

Dentro desse aspecto, a técnica de análise espectral da corrente, bem conhecida, é um recurso para a avaliação da condição do motor, a exemplo o artigo de *Análisis de vibración y análisis de corriente, herramientas de mantenimiento predictivo aplicadas em La detección de problemas em motores eléctricos*³. Esta técnica necessita do acesso aos cabos elétricos do motor, de um eletricista para a realização das medições e abertura de painéis elétricos com exposição ao risco. Já na análise de fluxo magnético, uma amostra do fluxo magnético resultante do funcionamento do motor elétrico é tomada em campo, no próprio motor, sem nenhuma das dificuldades relatadas para a medição dos espectros de corrente.

Já existem estudos acadêmicos diversos sobre a aplicação das técnicas de fluxo magnético e espectro de corrente e suas eficácias, contudo amplamente testadas em condições laboratoriais com motores de baixa tensão, como exposto no artigo *Acompanhamento predictivo de motores de indução trifásicos através da análise de fluxo magnético*⁴. Portanto existe uma grande carência de comprovação com casos reais de detecção de falhas com em motores de média ou alta tensão, com potências elevadas e aplicadas em condições industriais, sendo esse o foco deste trabalho.

³ BRITO et al., 1999.

⁴ LAMIN et al., 2004.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Um motor elétrico é um dispositivo de conversão em que a energia elétrica é convertida em energia mecânica e, conseqüentemente, em trabalho.

A conversão se dá pelas interações eletromagnéticas de suas partes e, com isso, fornecendo potência através de um eixo girante. Dentre a enorme gama de motores elétricos, elegemos para o foco desse trabalho os motores trifásicos de indução assíncronos com gaiola, por serem esses os mais predominantes na indústria moderna.

Basicamente os motores elétricos de indução possuem o seguinte princípio de funcionamento: com a alimentação senoidal trifásica aplicada ao conjunto de bobinas montadas na parte estacionária do motor, o campo eletromagnético resultante cria vetores de força alternantes, causando o efeito de um campo girante com força motriz. O rotor do motor de indução é constituído por uma gaiola contendo dois anéis paralelos distanciados e interconectados por barras, formando uma estrutura similar a uma gaiola de esquilo. O rotor, ao ser submetido ao campo eletromagnético girante, recebe, por indução, correntes rotóricas em suas barras e essas, por sua vez, criam um campo eletromagnético em oposição ao campo estático. O rotor inicia o movimento rotativo para acompanhá-lo, no intuito de eliminar a força causadora das correntes induzidas. Em motores de indução trifásicos, o campo girante existente no estator é obtido através da aplicação de alimentação elétrica trifásica, em que cada fase está defasada no tempo em 120° . No estator do motor estão montados os grupos de bobinas defasados também em 120° , construídas em núcleos ferromagnéticos e, assim, formando-se os pólos de um eletroímã ao redor do estator.

Com uma montagem adequada dos grupos de bobinas e usufruindo da defasagem no tempo entre as três fases, temos, a cada instante uma delas predominando em amplitude. Com as ondas se alternando em amplitude, temos variações na densidade do fluxo magnético, sendo máximo quando a fase se encontra no máximo de sua amplitude. As linhas de fluxo cortam as barras condutoras do rotor, induzindo nesse uma tensão proporcional à velocidade relativa entre o campo girante com força

magneto-motriz e o rotor. A tensão induzida no rotor é o produto dos vetores de velocidade das barras condutoras, a densidade do fluxo magnético e o comprimento das barras, a tensão induzida no rotor sofrerá uma variação senoidal ao longo do tempo.

Como o circuito das barras condutoras do rotor são fechados por anéis também condutores nas extremidades, forma-se um circuito fechado onde as tensões senoidais induzidas geram, por sua vez, correntes também senoidais circulantes por esse circuito fechado, a gaiola do rotor. Como o circuito do rotor tem característica indutiva, teremos a tensão defasada da corrente e da mesma forma que no estator, essas correntes circulantes no circuito da gaiola geram o surgimento de sua própria força magneto-motriz. A interação das forças magneto-motrizes do estator e do rotor cria o conjugado eletromagnético que força o rotor a entrar em giro no sentido de rotação da força magneto-motriz desenvolvida pelo campo girante do estator.

A velocidade de rotação do campo girante é denominada de rotação síncrona e a rotação do rotor é pouco inferior a essa rotação síncrona, a cerca de 5% abaixo. Essa característica chama-se escorregamento e é dada pela relação entre a diferença da velocidade síncrona com a velocidade de rotação do eixo pela rotação síncrona. O escorregamento é necessário para que as linhas de indução do campo girante cortem as barras do rotor e mantenha o movimento relativo entre esses, princípio básico da indução. Caso o rotor entre em sincronismo com o campo girante, as linhas não mais serão cortadas, não mais haverá movimento relativo entre rotor e campo girante. Portanto, a indução de tensão, e por consequência, de correntes no rotor, cessam e esse perde sua força magneto-motriz. Se isso ocorre o rotor perde velocidade e gira mais lento que o campo girante, nesse momento, novamente volta a existir movimentação relativa entre o campo girante e o rotor, novamente as linhas de indução voltam a cortar o rotor e esse volta a possuir força magneto-motriz para interagir com a força magneto-motriz do estator, sendo novamente arrastado por esse.

Devido a todas as perdas mecânicas, elétricas e à carga acoplada no eixo do motor, esse não possui condições de atingir a velocidade síncrona, tendo, portanto, sempre correntes induzidas no rotor e, conseqüentemente, torque resultante da interação entre as forças magneto-motrizes do rotor com o estator. Quanto maior a diferença de

velocidades entre rotor e campo girante, maior a quantidade de corrente induzida no rotor e circulante no estator para alimentá-las.

3. PRINCIPAIS TIPOS DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

Os motores elétricos podem sofrer diversos tipos de falhas em suas partes mecânicas e elétricas. O conhecimento das características dessas falhas e suas manifestações, são de suma importância para um diagnóstico correto. Serão apresentadas a seguir, essas falhas e suas características visuais. As imagens, iniciam-se com um estator em boas condições (ver Figura 2).



Figura 2 - Motor em Bom estado

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Um estator em bom estado é mostrado na figura 2. Observa-se a regularidade da coloração das bobinas, na cor natural do cobre, sendo apenas revestido de um verniz isolante.



Figura 3 - Falta de Fase em Estrela

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Na falta de fase de um motor trifásico, onde seus grupos de bobinas estão conectados em estrela, percebe-se uma característica peculiar da queima conforme mostrado na figura 3. Pode ocorrer por um cabo rompido, um fusível queimado ou uma falha interna nas ligações.



Figura 4 - Falta de Fase em Triângulo

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A figura 4 apresenta o mesmo tipo de falha citado na figura 3, contudo, essa falha se deu em um motor trifásico com a ligação em triângulo.



Figura 5 - Curto-circuito entre fases

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Na figura 5 mostra-se uma falha interna no motor com causas prováveis como: sobretensão, falha de isolamento, vibração elevada causando e atrito entre as bobinas.



Figura 6 - Curto-circuito entre espiras

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A figura 6 mostra o curto circuito entre espiras pode se dar pelas mesmas causas citadas para o curto entre fases da figura 5.



Figura 7 - Bobina Curto Circuitada

Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Uma bobina curto circuitada como a mostrada na figura 7 pode ser encontrada em motores com desbalanceamentos e sobrecorrentes em uma fase. Uma sobrecarga excessiva pode elevar a temperatura das bobinas acima da capacidade de isolamento do verniz, causando o derretimento deste e por fim o curto-circuito entre as espiras da mesma fase.



Figura 8 - Curto para massa na saída da ranhura
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Falhas de isolamento e vibração excessiva, são as principais causas de falhas de curto circuito para massa nas ranhuras, conforme mostrado nas figuras 8 e 9.



Figura 9 - Curto para massa no meio da ranhura
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

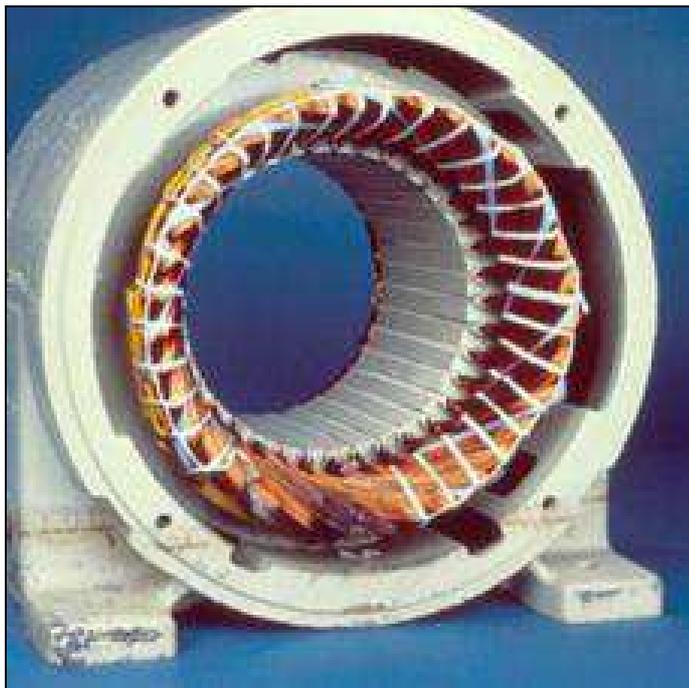


Figura 10 - Curto-circuito nas ligações
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Um motor elétrico pode apresentar o curto-circuito nas ligações dos cabos às suas bobinas conforme mostrado na figura 10 por motivos como: falhas de montagem, deficiência de contato e isolamento danificada.

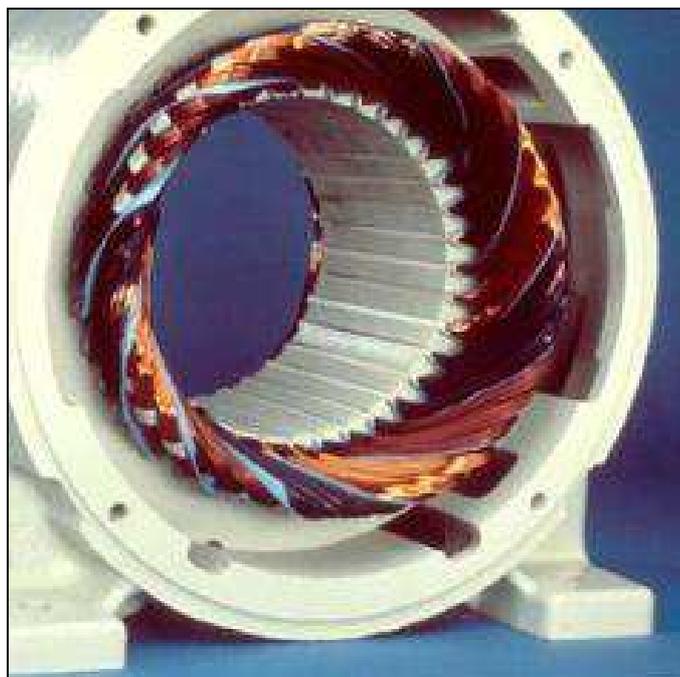


Figura 11 - Fase danificada por desequilíbrio de tensão
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A falha mostrada na figura 11 é menos comum. Uma rede de alimentação elétrica, com pouquíssima probabilidade terá uma fase com níveis de tensão elevados e desbalanceados a um nível de queima de uma das fases, contudo, caso ocorra, o aspecto visual será conforme apresentado nesta imagem.

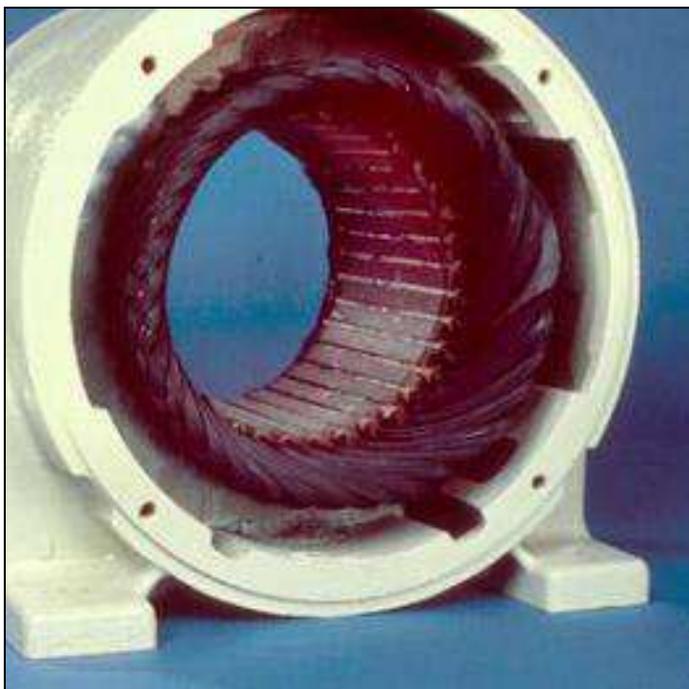


Figura 12 - Enrolamento danificado por sobrecarga
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A falha ilustrada pela figura 12, provavelmente é a mais encontrada nos motores danificados num parque industrial. Essa falha ocorre quando o motor é submetido a um nível de carga superior ao qual ele foi projetado. Isso causa um aquecimento acima dos valores permitidos, culminando em uma queima geral de todo o pacote estatórico.

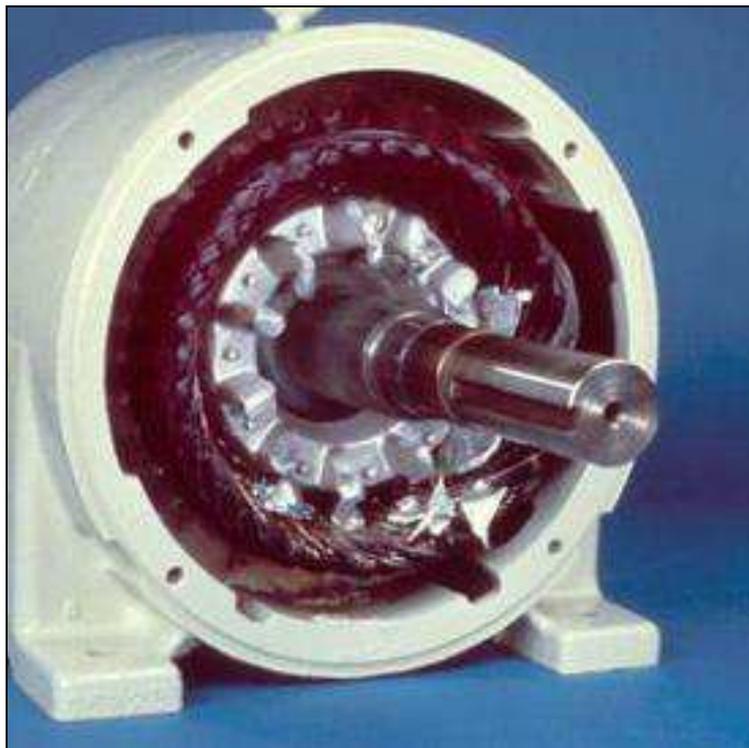


Figura 13 - Defeito causado por travamento do rotor
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

Na figura 13, temos um tipo de falha que ocorre com grande frequência nas industriais. Em momentos em que uma carga sofre um travamento por causas mecânicas diversas e o eixo do motor é totalmente bloqueado e impedido de girar, ocorre a elevação da corrente a valores que podem chegar a 10 vezes a corrente nominal do motor. Com isso uma queima imediata de todo o bobinamento é praticamente impossível de ser evitada.

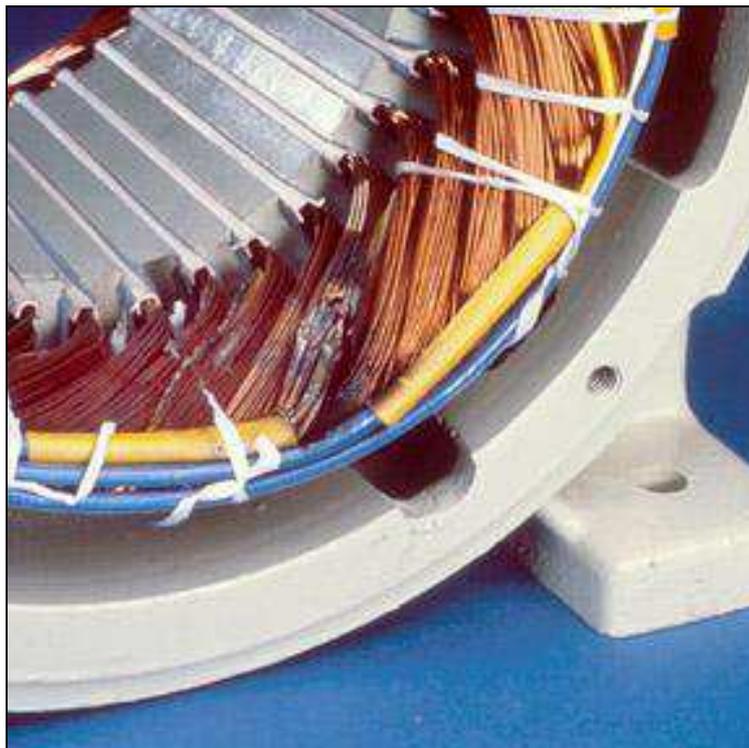


Figura 14 - Enrolamento danificado por surto de tensão
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A figura 14 apresenta um tipo de falha típico de surtos elevatórios de tensão. A exemplo uma descarga atmosférica que pode atingir uma linha, um chaveamento do circuito, dentre outras causas. Com isso a isolação não consegue suportar ao nível de tensão em que foi exposto e se rompe, fechando o curto-circuito entre as espiras adjacentes.

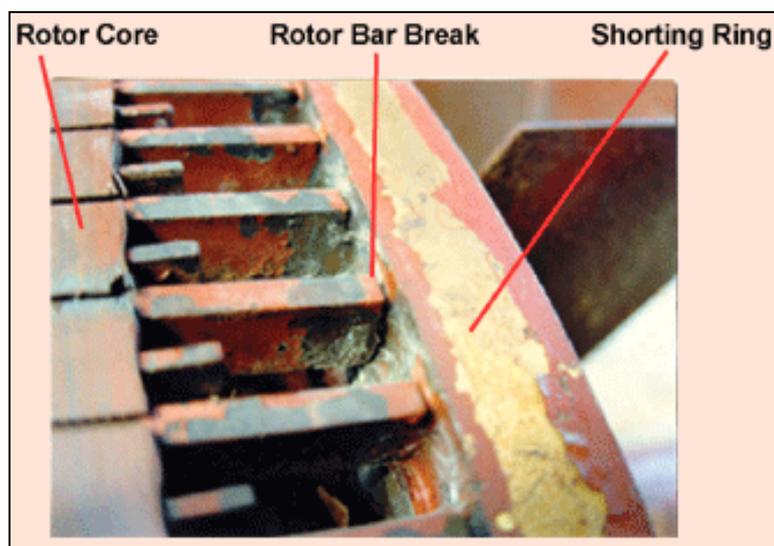


Figura 15 - Rotor com barra quebrada
Fonte: <http://mpcservice.com.br/artigo02.html>

A figura 15 ilustra um rotor com uma barra solta do anel de curto-circuito da gaiola. Uma barra pode-se quebrar por partidas sucessivas no motor com altas cargas acopladas, onde os vetores de força são suficientes para forçar a barra na direção perpendicular ao seu comprimento. Com isso a união da barra com o anel, submetida a uma força elevada, vem a se separar e causar a perda de uma parte do circuito rotórico. Outras falhas como baixa isolação devido à contaminação por substâncias líquidas aquosas (água, polpa de minério etc.), excesso de lubrificantes nos rolamentos que adentram no estator, excentricidade e empenamento do rotor, dentre outras falhas de origem mecânica também ocorrem com mais ou menos frequência.

Existe uma grande dificuldade de detecção de falhas de origem elétrica em motores elétricos, especialmente nos que se encontram em funcionamento. Pois, em um motor energizado não é possível a instalação de equipamentos de medição que aplicam sinais elétricos para testá-los, visto o fato destes se encontrarem energizados, com tensões elétricas aplicadas e com correntes elétricas em seus cabos de alimentação. Dessa forma, os motores que não podem parar de funcionar em uma empresa ficam submetidos ao surgimento de falhas imprevistas, pois não é possível medir as características elétricas desses com os mesmos em operação, podendo então entrar em falha se nenhuma técnica de inspeção for aplicada.

4 ANÁLISES DE CORRENTE E FLUXO MAGNÉTICO

A análise de fluxo magnético e espectro de corrente são análises dinâmicas, ou seja, realizadas com os motores em plena operação. Com isso os testes estáticos não são possíveis de serem realizados, visto o fato de os motores estarem energizados e não ser possível a aplicação de sinais elétricos de testes.

Os testes estáticos incluem: Teste de resistência de isolamento, índice de polarização / absorção e resistência ôhmica das bobinas. .

Outras limitações com relação aos testes estáticos são os tipos de falhas que não podem ser detectados por esses. Estão inclusas falhas nas barras e anéis do rotor, empenamento de eixo, dentre outras possíveis falhas de origem mecânica especialmente.

A análise dinâmica de motores elétricos, realizada com os motores em condições normais de operação, permite detectar falhas que podem ser detectadas nos testes estáticos e ainda as falhas de origem mecânica que não são detectadas por esses.

4.1 ANÁLISE POR ESPECTRO DE CORRENTE

Essa análise é realizada através da tomada de amostras de corrente que flui pelo motor, sendo essas amostras fontes de todas as informações inerentes à sua condição de operação. Utiliza-se um instrumento denominado alicate amperímetro, o qual tem a mesma função de um transformador de corrente, ao qual, por meio da indução e através da relação de transformação, uma amostra de baixa intensidade da corrente circulante no motor é disponibilizada em sua saída e essa será analisada. As correntes, ainda em forma analógica, são processadas por um equipamento coletor de dados e suas formas de ondas são digitalizadas e alteradas do domínio do tempo para o domínio da frequência através da FFT (Fast Fourier Transforming – figura 16).

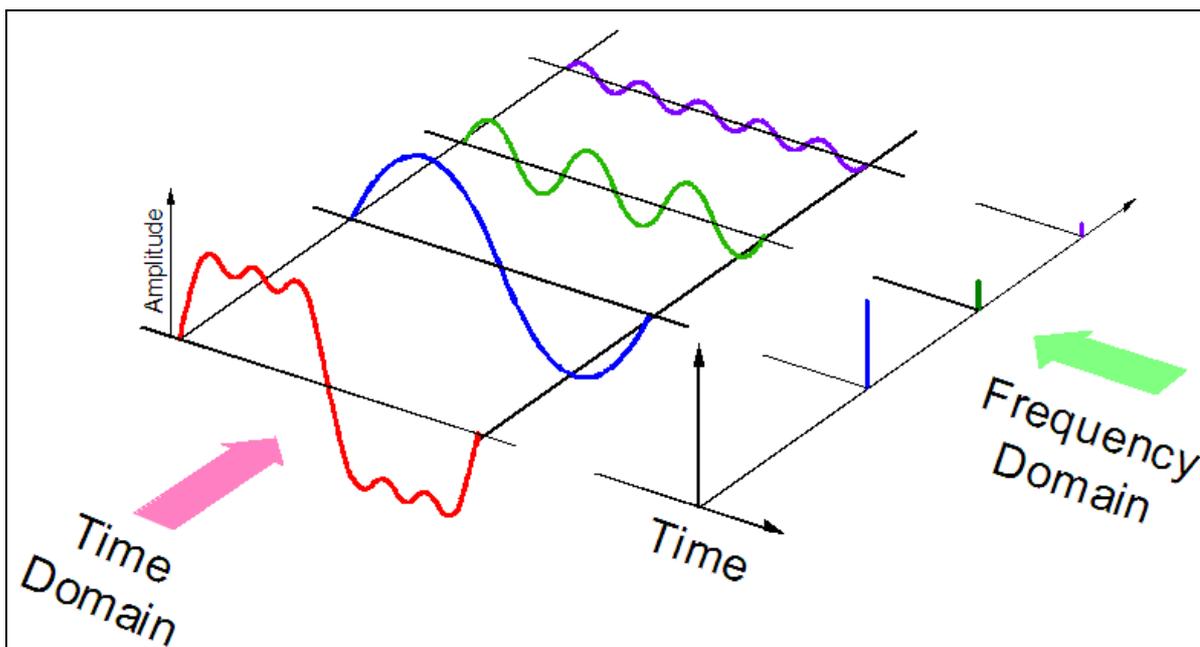


Figura 16 - Domínio do tempo e da frequência

Fonte: <http://testrf.com/2010/spectrum-analyzer-tutorial/>

De posse dos sinais de corrente digitalizados e apresentados no domínio da frequência, busca-se falhas pelas alterações de amplitude das frequências determinísticas, analisando as alterações dessas frequências ao longo do tempo, sendo isso o indicador do surgimento de falhas.

As amostras das correntes são tomadas nas salas elétricas, nos cabos da saída das gavetas de alimentação até o motor. Para tanto, é necessário que o técnico seja um profissional da área elétrica, autorizado e capacitado a realizar trabalhos em eletricidade. Durante a realização das medições, o técnico necessita utilizar roupas especiais contra arco elétrico, luvas isolantes, máscaras de proteção facial e demais E.P.I.'s obrigatórios conforme mostrado na figura 17.



Figura 17 – Coleta de amostra de corrente
Fonte: Acervo do autor

4.2 ANÁLISE POR FLUXO MAGNÉTICO

Todo condutor de eletricidade percorrido por uma corrente elétrica manifesta essa ocorrência com o surgimento de um campo eletromagnético no entorno desse condutor, bem como no surgimento de uma força de ação com direção e sentido definidos conforme mostrado na figura 18.

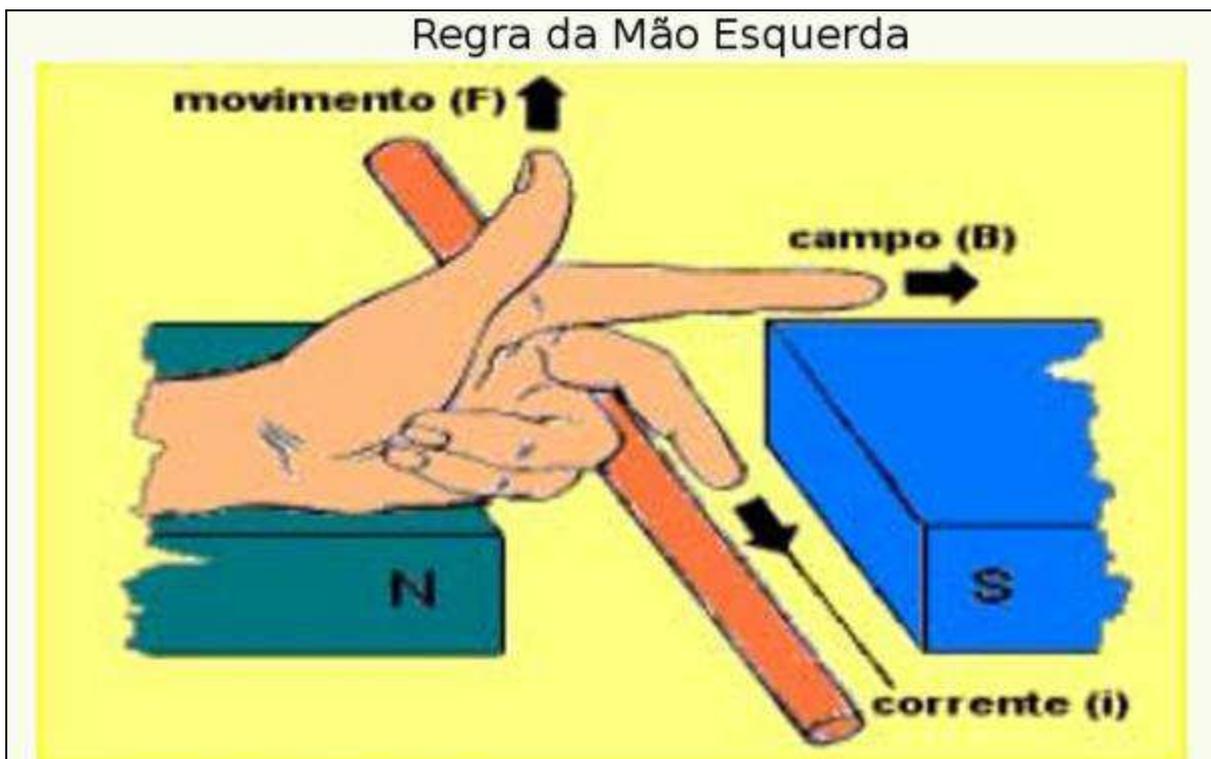


Figura 18 - Regra da mão esquerda

Fonte: fórum.the-west.com.pt

Em um motor elétrico, existem vários componentes, dentre eles grupos de bobinas, estator, rotor, gaiola de esquilo, rolamentos, carcaça, etc.. Na Figura 19 é apresentada uma vista explodida do motor, onde os componentes do mesmo podem ser visualizados. Todos esses componentes sofrem a ação de forças mecânicas e eletromagnéticas, sendo que cada componente possui suas manifestações e essas se somam formando um fluxo eletromagnético global resultante.

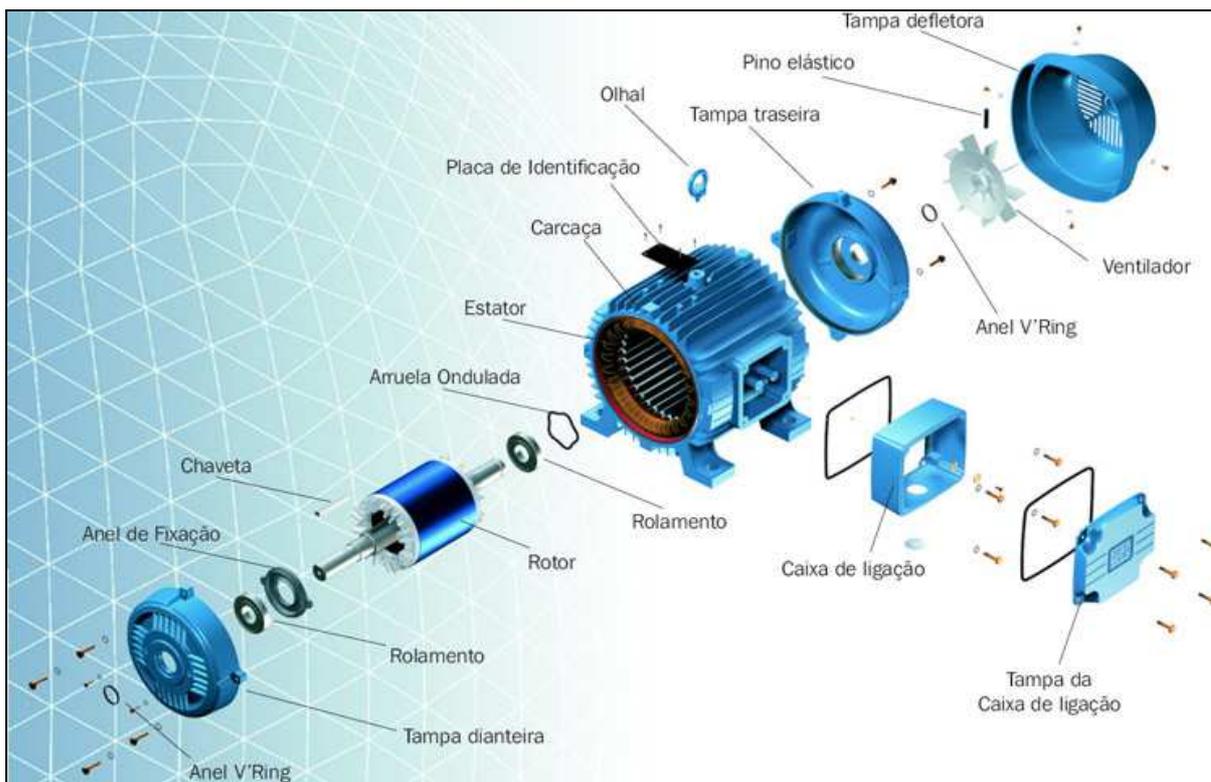


Figura 19 - Visão explodida do motor elétrico

Fonte: <http://www.weg.com>

Esse fluxo resultante traz consigo todas as componentes de operação de cada uma das partes envolvidas no funcionamento do motor, formando assim o que pode se chamar de “assinatura”, sendo esse fluxo resultante tomado com o motor em condições de normalidade de operação. Qualquer alteração na condição de suas partes causará uma deturpação na componente eletromagnética respectiva e, com isso, modificará o fluxo global resultante. Baseado em equações matemáticas, cada manifestação de falha mecânica ou elétrica possui uma frequência determinística que se altera em amplitude, de forma proporcional, à severidade da falha ocorrida sendo essas monitoradas periodicamente para determinação da “saúde” do motor.

Através do uso de uma espira de medição construída em forma circular e colocada na parte traseira do motor, centralizada na tampa defletora deste, amostras do fluxo magnético são tomadas e tratadas da mesma forma que as amostras de corrente na análise espectral já mencionada (Figura 20). Esses espectros no domínio da frequência transportam um vasto conteúdo frequencial, rico em informações características dos componentes do motor. De posse de um software especialista, dotado de ferramentas,

pode-se analisar, após a determinação por cálculos das frequências de falha, a condição de operação dos motores.

O espectro do fluxo corresponde ao resultado dos efeitos de ambas as componentes de frequência das correntes do estator e do rotor. Em adição à frequência fundamental, o espectro inclui harmônicos causados pela assimetria da fonte de alimentação e outros vários tipos de situações anormais ou falhas como excentricidade, falhas de falta para massa das fases do estator, falhas de curto entre espiras e falhas no rotor. (KOKKO, 2003, p.20).



Figura 210 - Processo de coleta do fluxo magnético
Fonte: Acervo do autor

O fluxo magnético presente no entreferro não pode ser distinguido entre armadura e rotor separadamente, contudo nos extremos das bobinas, esse fluxo de dispersão pode ser medido e as componentes podem ser analisadas separadamente (ALGER, 1970).

Para um monitoramento da condição dos motores, a amplitude exata do fluxo não é necessária, pois o diagnóstico é dado em termos de mudanças relativas no espectro.

5 REVISÃO MATEMÁTICA

5.1 FREQUÊNCIAS MAGNETO-MOTRIZES (FMM) DEVIDO À CORRENTE DO ESTATOR

Esta equação estabelece os picos que surgem no espectro de frequências e que são devidos à frequência da fonte de alimentação do motor elétrico. Esses picos são normais e não representam falhas no motor.

Equação 1

$$f_{pc} = k \cdot f_s$$

Onde k é um inteiro ímpar (1,3,5,7,9,...) e f_s é a frequência da linha de alimentação (do inglês *source*). Foi tomado como exemplo um motor da marca BBC de 4.160 V, 6 pólos, potência de 510 cv e rotação de 1188 rpm. Esse motor é aplicado em uma bomba de polpa de minério e foi escolhido para a exemplificação das frequências que serão aqui apresentadas, cujo espectro é apresentado na Figura 21 e seus valores mostrados na tabela 1.

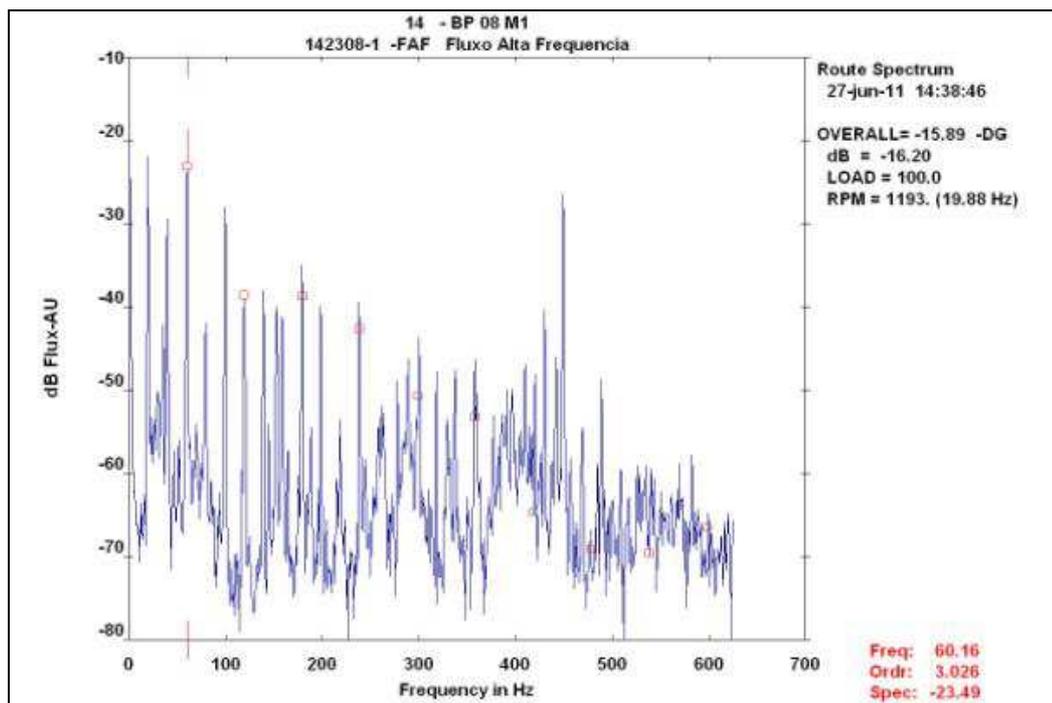


Figura 221 - Picos múltiplos da frequência da linha
Fonte: Software VibView – Acervo do autor

Essas são frequências das forças magneto-motrizas que aparecem em condições normais de funcionamento, juntamente com seus harmônicos devido às correntes do estator.

Tabela 1 - Harmônicos Ímpares da f_s

Frequência de Rotação e seus harmônicos							
Base (Hz)	3 ^o	5 ^o	7 ^o	9 ^o	11 ^o	13 ^o	15 ^o
60	180	300	420	540	660	780	900

Fonte: KOIKKO, 2003.

5.2 FMM CAUSADAS POR UMA FONTE TRIFÁSICA BALANCEADA

5.2.1 Campos girantes no sentido direto.

Equação 2

$$F = m \cdot f_s,$$

Sendo f_s a frequência da linha.

Onde $m = 6k + 1$ e $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ou seja $(1^{\circ}, 7^{\circ}, 13^{\circ}, 19^{\circ}, \dots)$

5.2.2 Campos girantes no sentido reverso

Equação 3

$$f = n \cdot f_s$$

Onde $n = 6k - 1$ e $k = 1, 2, 3, \dots$ ou seja $(5^{\circ}, 11^{\circ}, 17^{\circ}, 23^{\circ}, \dots)$

Cálculo da frequência de rotação mecânica:

$$f_{sync} = \frac{f_s}{p}$$

onde f_{sync} é a frequência de rotação síncrona do campo girante, f_s é a frequência da linha e p o número de pares de pólos do motor.

Em um motor trifásico, a frequência de rotação síncrona e seus harmônicos são definidos pela seguinte equação:

Equação 4

$$f_{sync} = \frac{f_s}{p} (6k \pm 1)$$

Onde k é um inteiro (0,1,2,3,...). Esses picos são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 - Harmônicos da f_s para quantidades de pólos diversos

Rotação síncrona e seus harmônicos									
		k=0		k=1		k=2		k=3	
		6k+1	6k-1	6k+1	6k-1	6k+1	6k-1	6k+1	6k-1
p	Frequência síncrona	5°	7°	11°	13°	17°	19°	23°	25°
1	60	300	420	660	780	1020	1140	1380	1500
2	30	150	210	330	390	510	570	690	750
3	20	100	140	220	260	340	380	460	500
4	15	75	105	165	195	255	285	345	375

Fonte: KOIKKO, 2003.

Em um motor de 6 pólos (3 pares de pólos) e com frequência da linha $f_s=60$ Hz, a frequência de rotação síncrona do campo girante é de $f_{sync}=20$ Hz.

$$f_{sync} = \frac{60 \text{ Hz}}{3} = 20 \text{ Hz}$$

5.3 FLUXO DEVIDO ÀS CORRENTES INDUZIDAS NO ROTOR

Equação 5

$$S\% = \frac{f_{sync} - f_r}{f_{sync}},$$

Para o motor de exemplo a rotação medida pelo software VibView é $f_r=19,89$ Hz.

Equação 6

$$S = f_{sync} - f_r = 20 - 19,89 = 0,11Hz$$

onde f_r é a rotação real do eixo em operação.

O escorregamento percentual (S%) é de:

$$S\% = \frac{20 - 19,89}{20} = 0,55\% \text{ ou } 0,0055$$

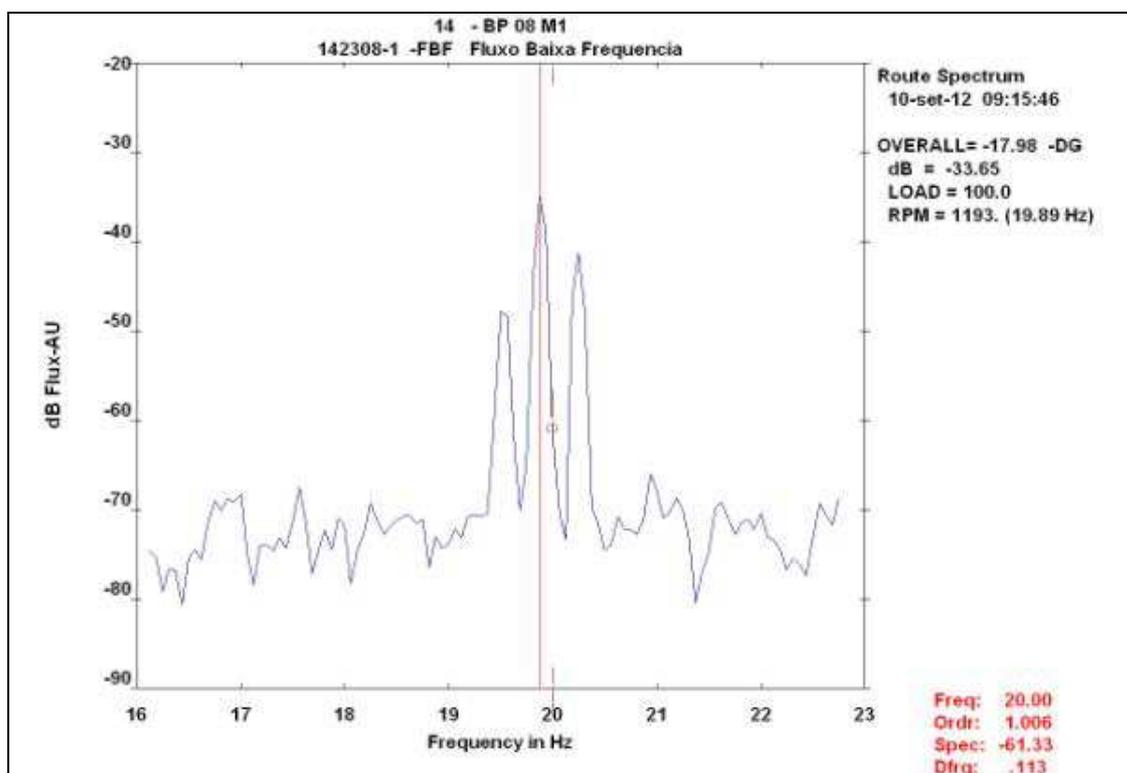


Figura 232 - Espectro das frequências de rotações do eixo e síncrona
Fonte: Acervo do autor

O espectro da Figura 22 mostra o pico da rotação do eixo (com seu valor marcado no descritivo no canto superior direito RPM = 1193 ou 19,89 Hz) e no canto inferior direito o descritivo do ponto marcado com um pequeno quadrado, sendo esse valor de 20 Hz, o valor da frequência de rotação síncrona. Devido ao número de linhas de resolução não ter sido elevado o bastante, o pico de f_{sync} não apareceu

desvinculado do pico de fr, pois a diferença entre esses é de apenas 0,11Hz como calculado.

O equipamento coletor de dados foi configurado para uma resolução de 3200 linhas em uma faixa de frequência de 0 – 200 Hz. Isso fornece a seguinte resolução:

$$\text{Hz/linhas} = (200/3200) = 0,062 \text{ Hz/linhas}$$

O software é capaz de rastrear os passo mínimos de 0,062Hz, contudo sua apresentação em tela não apresenta um pico distinto para o valor de escorregamento. Conforme mostrado no canto inferior direito (valor da diferença de frequência entre a linha vermelha e o pico marcado), no campo Dfrq = 0,113 , valor esse calculado para o escorregamento.

Em um motor de indução, a rotação real do eixo sempre será menor do que a rotação síncrona (f_{sync}). Essa diferença de velocidade chama-se escorregamento (s) e é a responsável por permitir que haja correntes induzidas no rotor, pois é necessário que exista uma diferença de velocidade entre o campo girante elétrico e o eixo, com isso linhas de indução serão cortadas e a indução ocorrerá no rotor. Essa constante diferença de velocidade chama-se escorregamento, sendo definida pela letra S e calculada percentualmente pela equação 5

A frequência da corrente induzida no rotor tem seu valor baseado no escorregamento (S%) vezes a frequência da linha (f_s).

Equação 7

$$F_{rc} = s \cdot f_s$$

Sendo $s=0,055$ e $f_s=60\text{Hz}$

$$F_{rc} = 0,055 \times 60 = 0,33\text{Hz} \text{ (Figura 23).}$$

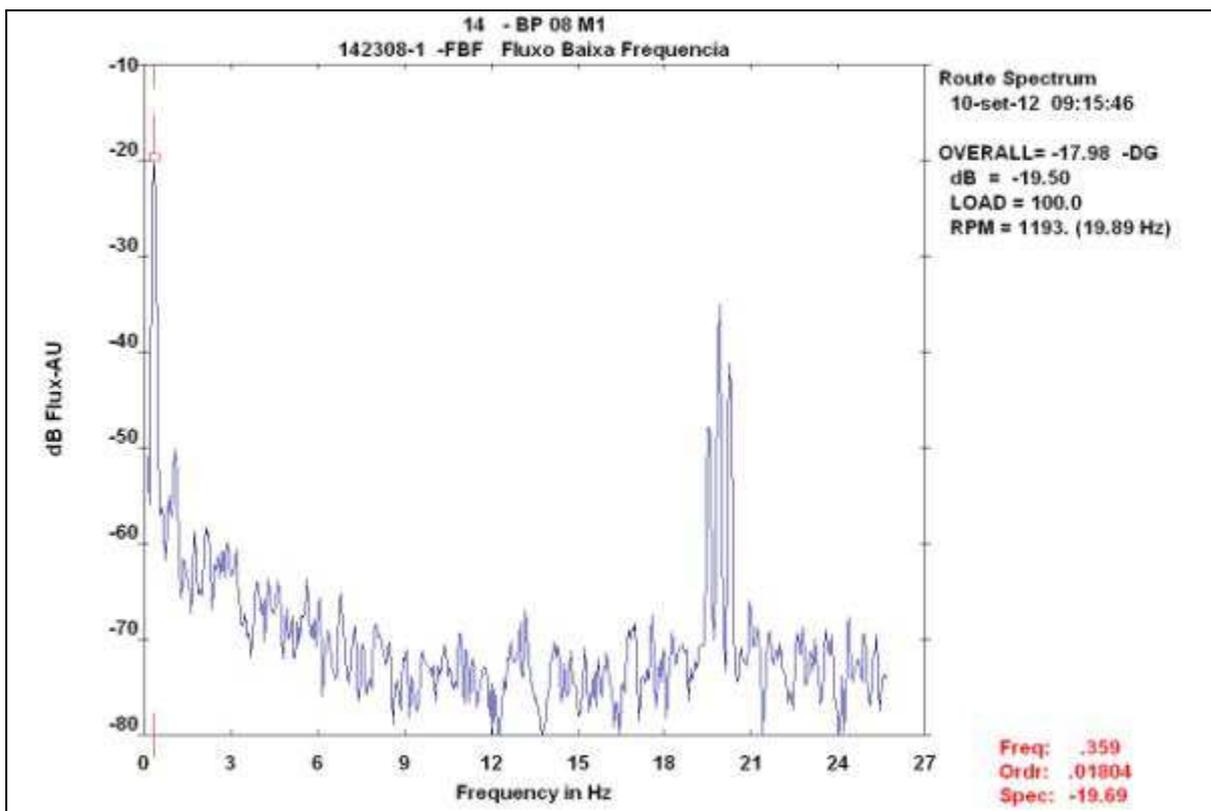


Figura 243 - Frequência da Corrente no rotor devido ao escorregamento
Fonte: Acervo do autor

Frequências das correntes induzidas no rotor em termos de harmônicos da frequência da linha, podendo ser no sentido direto ou reverso – Henao *et al.* (2000)

No sentido direto - Frequências de sequência positiva, no sentido do campo girante.

Equação 8

$$F_{rc} = F_s(1 - m(1 - s)) \quad (6)$$

Sendo $m = 6k + 1$ e $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ (isto é $1^o, 7^o, 13^o, 19^o, \dots$) E no sentido reverso – Frequências de sequência negativa, em sentido oposto ao campo girante:

Equação 9

$$F_{rc} = F_s(1 + n(1 - s))$$

Sendo $n = 6k - 1$ e $k = 1, 2, 3, \dots$ (isto é $5^o, 11^o, 17^o, 23^o, \dots$), ver espectro da fig. 24.

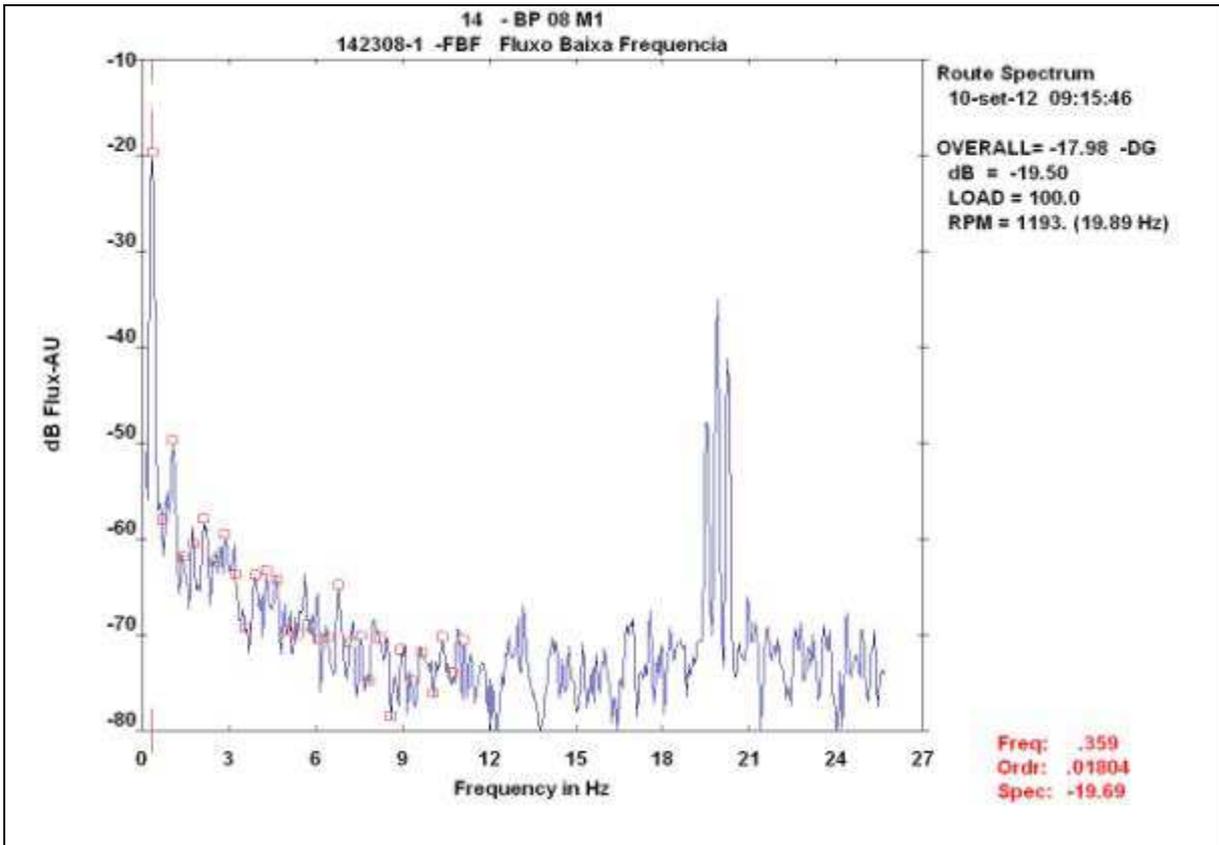


Figura 254 - Harmônicos da frequência de escorregamento
Fonte: Acervo o Autor

As equações para as correntes que surgem no rotor devido ao fluxo axial são as seguintes:

Equação 10

$$f_{rc} = \left(\frac{f_s}{p}\right) * s$$

E seus harmônicos são:

Equação 11

$$f_{rc} = \left(\frac{f_s}{p}\right) * [1 - (6k + 1)(1 - s)]$$

Onde $k = 1, 2, 3, \dots$ (Figura 25).

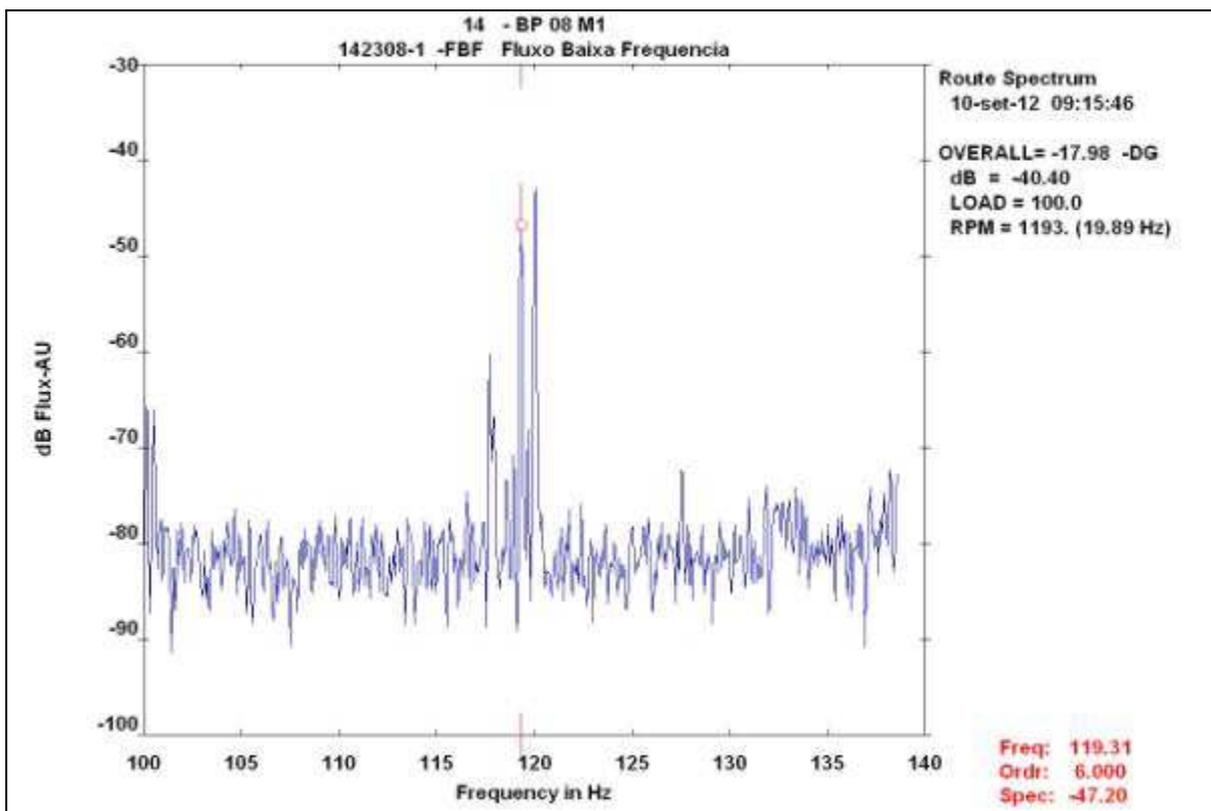


Figura 265 - Espectro para $k=1$ $f=119,31$ Hz
 Fonte: Acervo do Autor

Percebe-se que para $k=1$, temos um valor de exatamente 6 vezes a frequência de rotação do eixo do motor.

Equação 12 (Figura 26)

$$frc = \left(\frac{f_s}{p}\right) * [1 + (6k - 1)(1 - s)]$$

Onde $k = 1,2,3,\dots$

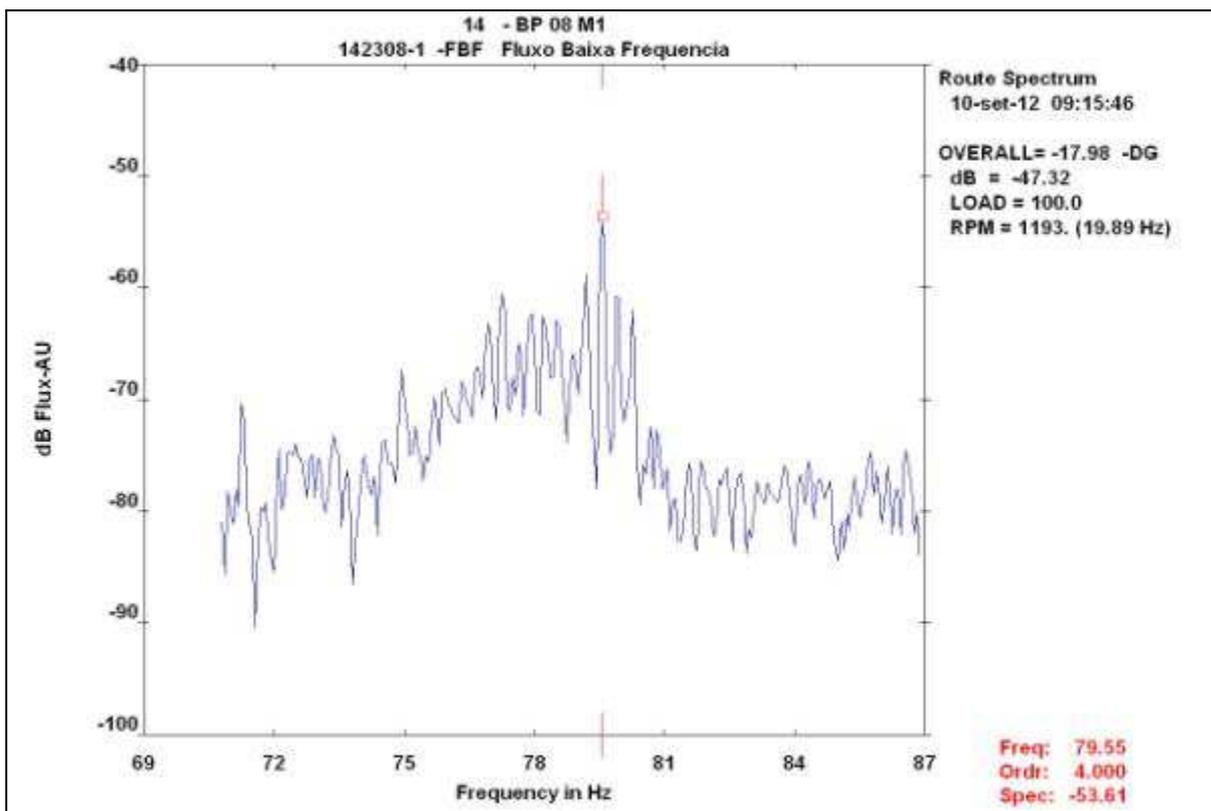


Figura 276 - Espectro para $k=1$, $f = 79,55$ Hz
Fonte: Acervo do Autor

Nesse caso para $k=1$, temos um valor de exatamente 4 vezes a frequência de rotação do eixo do motor. Em suma as equações 11 e 12 calculam para valores de k , os múltiplos inteiros da frequência de rotação.

Frequência de passagem de ranhuras do estator

Equação 13 (Figura 27)

$$f_{ss} = Q_s \cdot f_r - f_s$$

Para esse motor que possui 54 ranhuras no estator, rotação de 19,88 Hz e $f_s = 60$ Hz teremos $f_{ss} = 1013,52$ Hz.

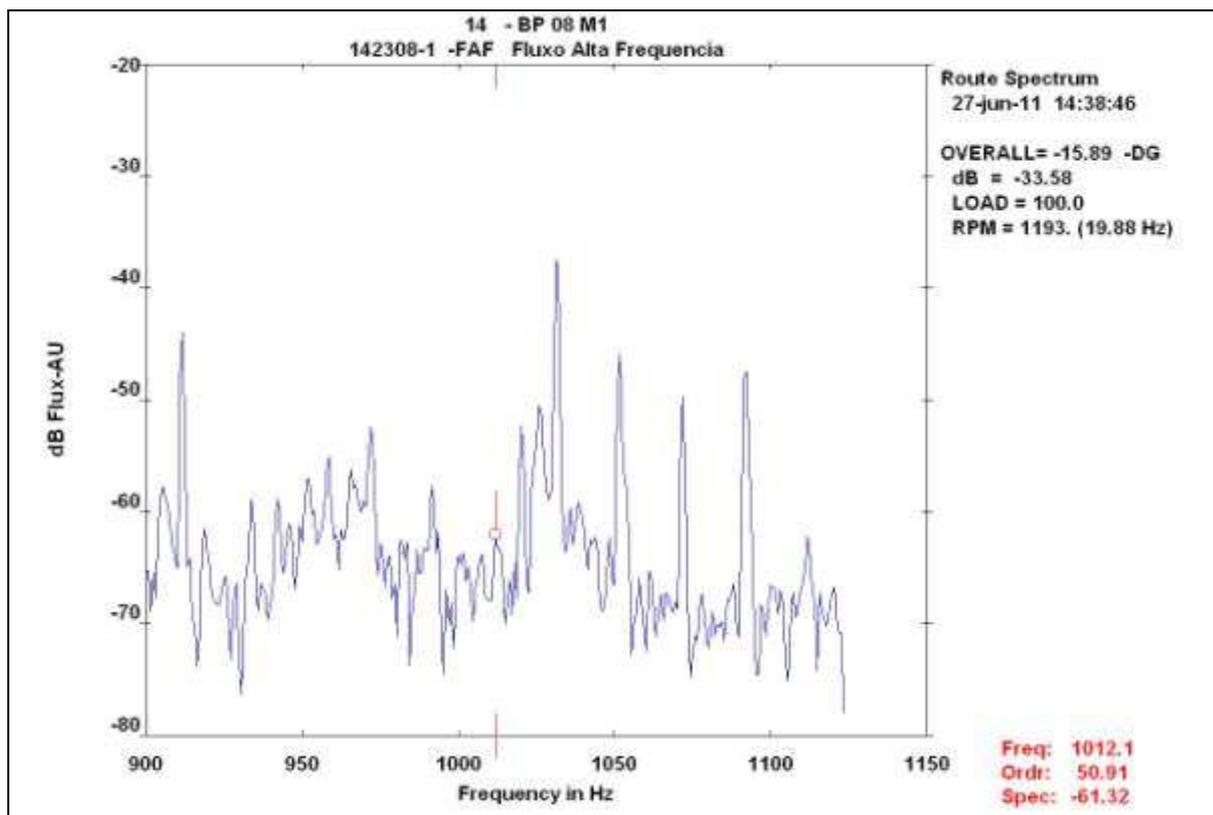


Figura 287 - Frequência de passagem de ranhuras no estator
Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na f_{ss}

Equação 14 (Figura 28)

$$F_{2LFS} = (Q_s \cdot f_r - f_s) \pm 2 \cdot n \cdot f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

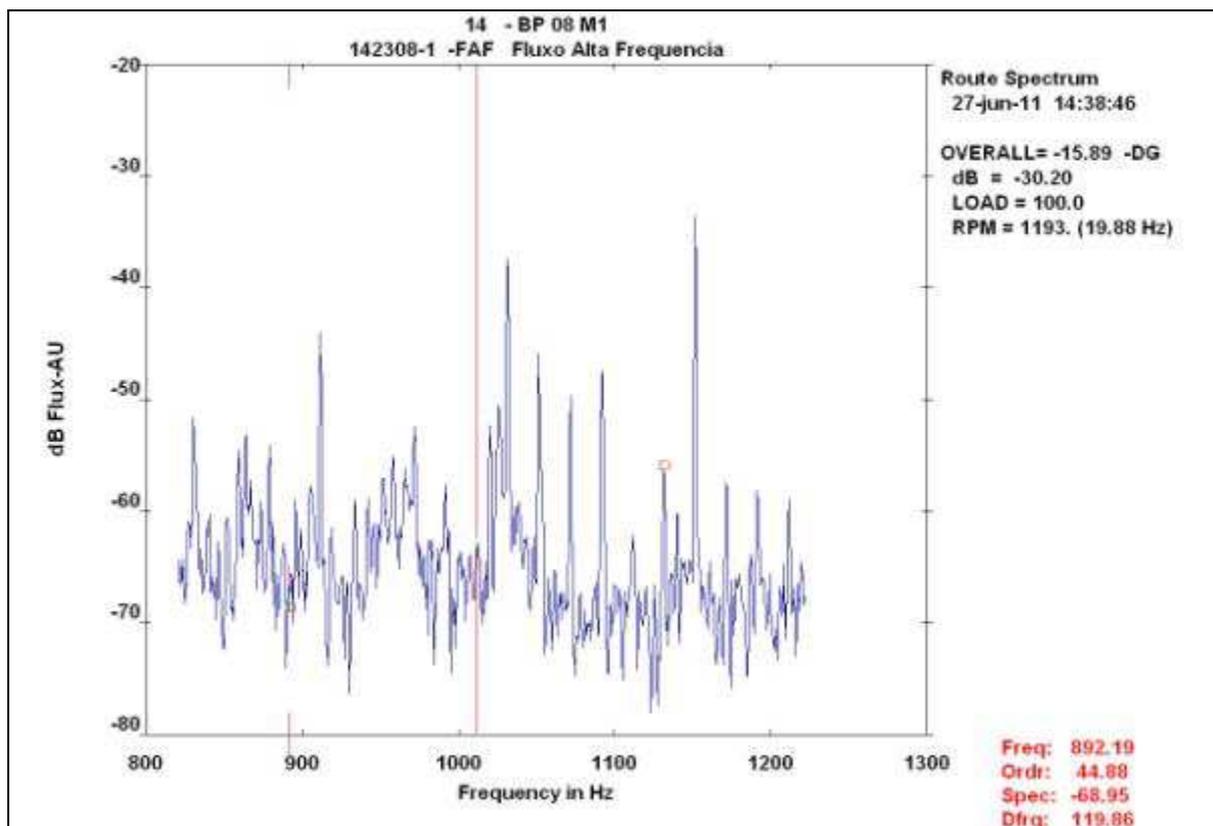


Figura 298 - Bandas Laterais de 2xFs em torno da F_{sp}
Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na fss moduladas pela frequência de rotação.

Equação 15—(Figura 29 e 30)

$$F_{r_{ss}} = [(Qs.fr - fs) \pm 2.n.fs] + k.fr \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ e } k = 1, 2, 3 \dots$$

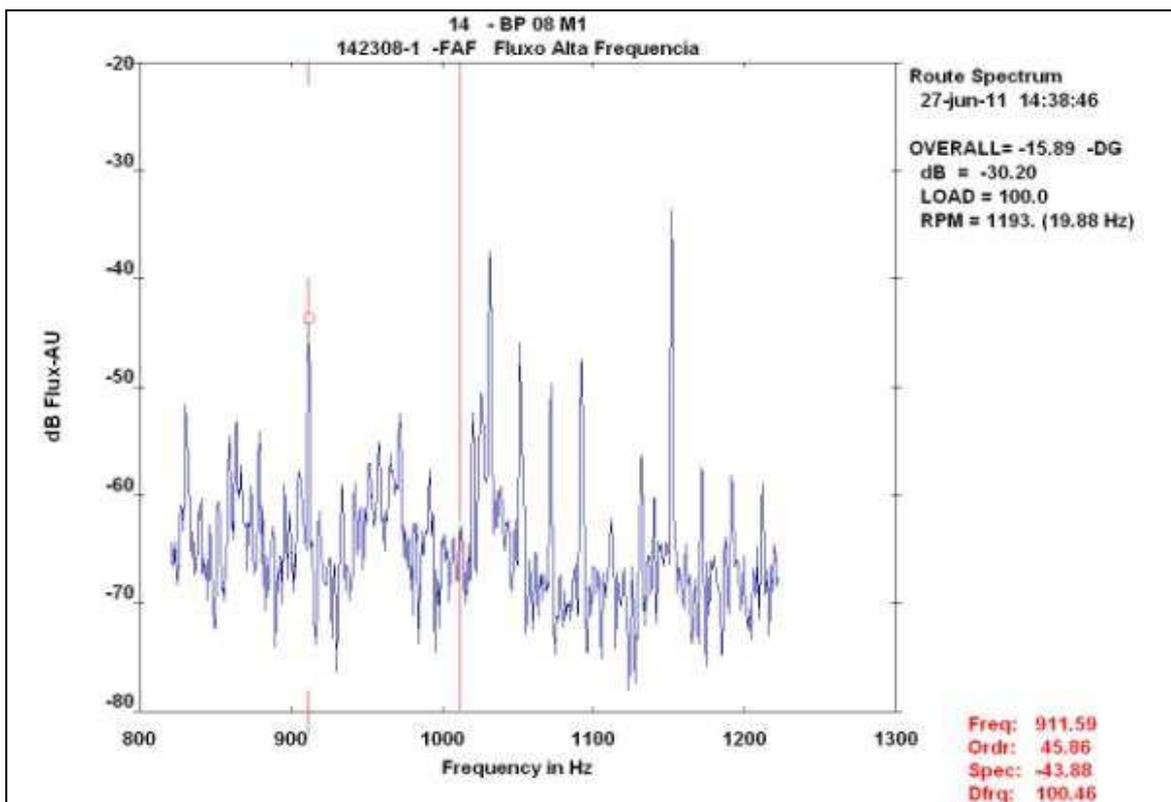


Figura 29 - frss banda inferior k=1

Fonte: Acervo do Autor

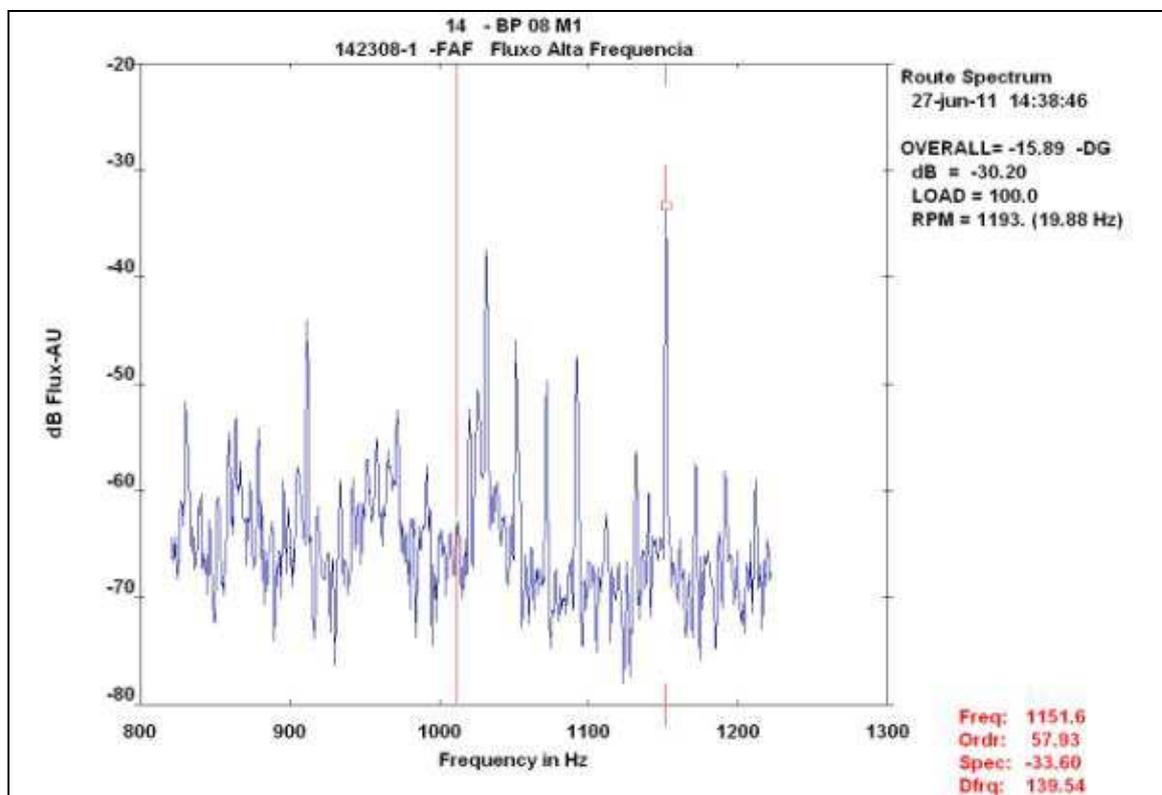


Figura 30 - frss banda superior k=1

Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na fss moduladas pela frequência de escorregamento.

Equação 16 – F_{sfs}

$$F_{sfs} = [(Q_s \cdot f_r - f_s) \pm 2 \cdot n \cdot f_s] + k \cdot s \cdot f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ e } k = 1, 2, 3 \dots$$

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na fss modulas pela frequência da linha.

Equação 17 (Figura 31 e 32)

$$FL_{fs} = [(Q_s \cdot f_r - f_s) \pm 2 \cdot n \cdot f_s] + f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

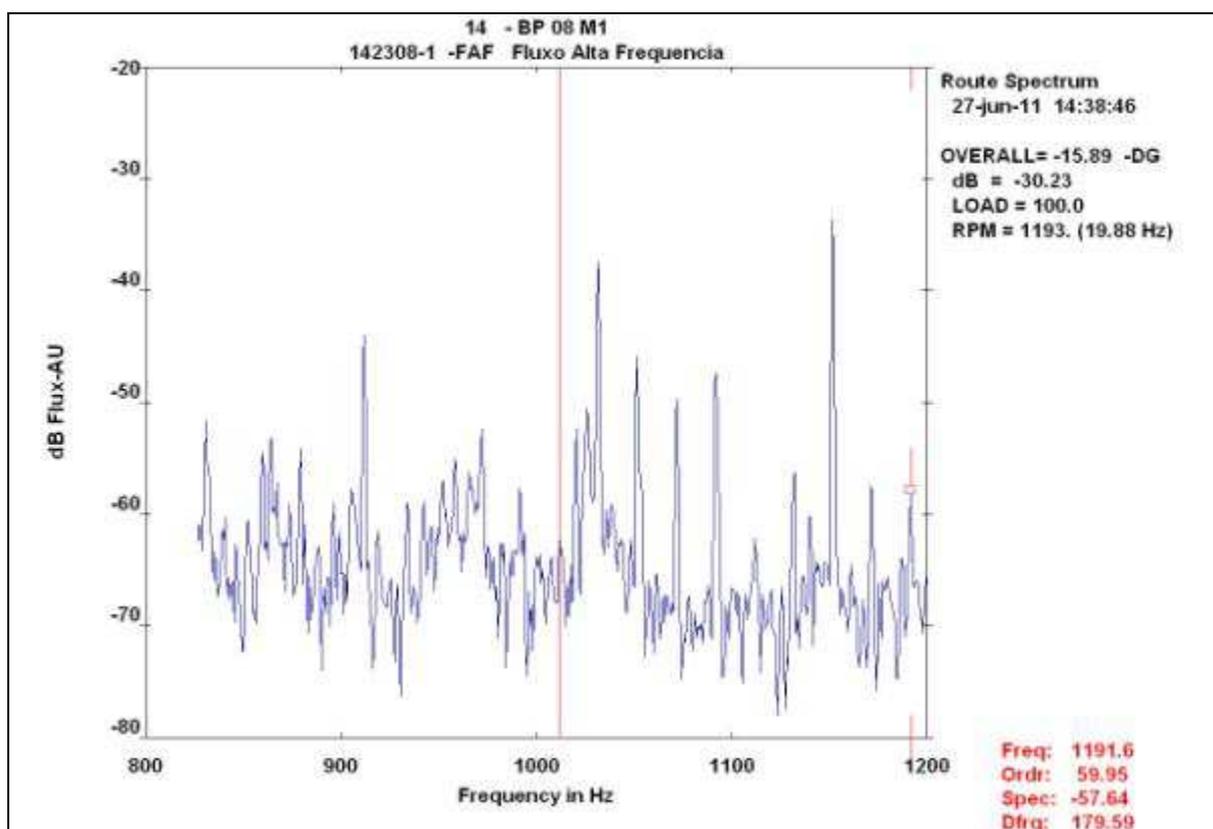


Figura 31 - fL_{fs} banda superior n=1

Fonte: Acervo do Autor

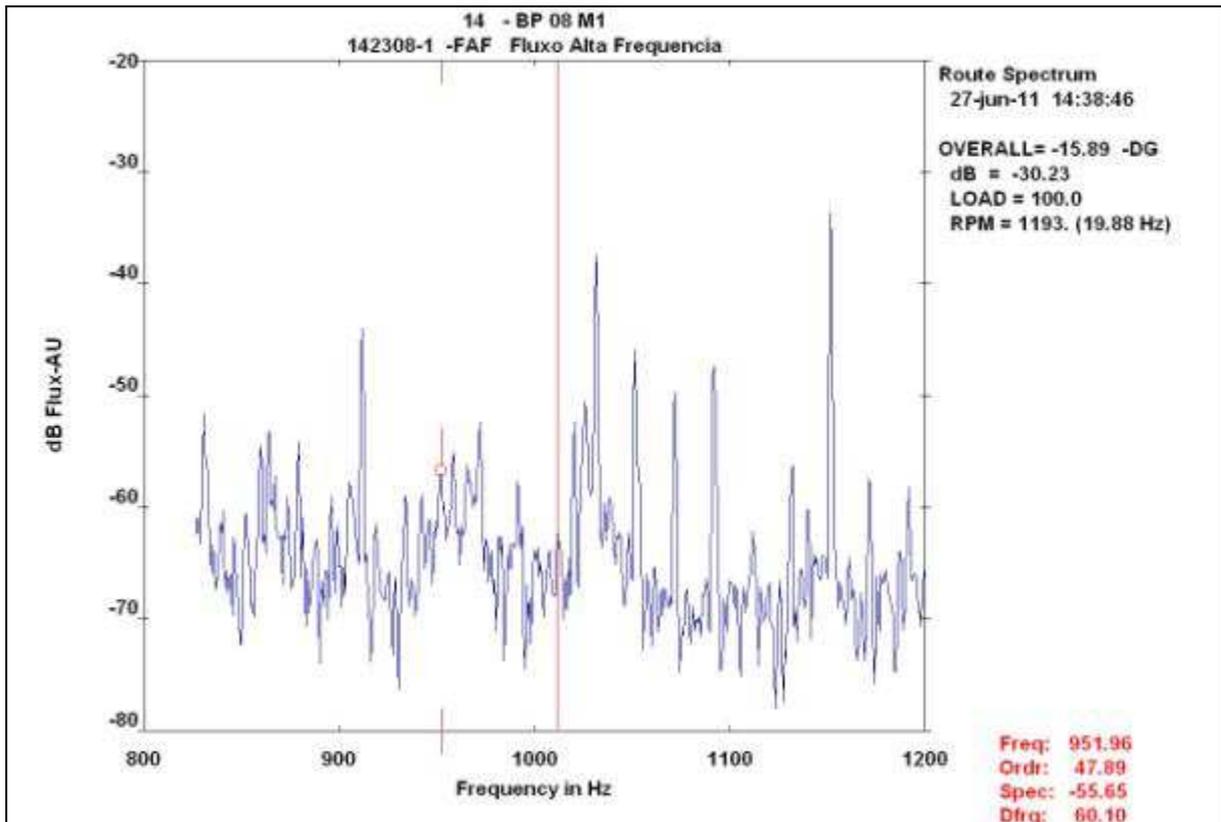


Figura 302 - fLfs banda inferior n=1

Fonte: Acervo do Autor

Frequência de passagem de ranhuras do rotor, para esse motor são 64 barras.

Equação 18 (Figura 33)

$$Frs = Qr \cdot fr - fs$$

$$frs = 64 \times 19,88 - 60 = 1212,32 \text{ Hz}$$

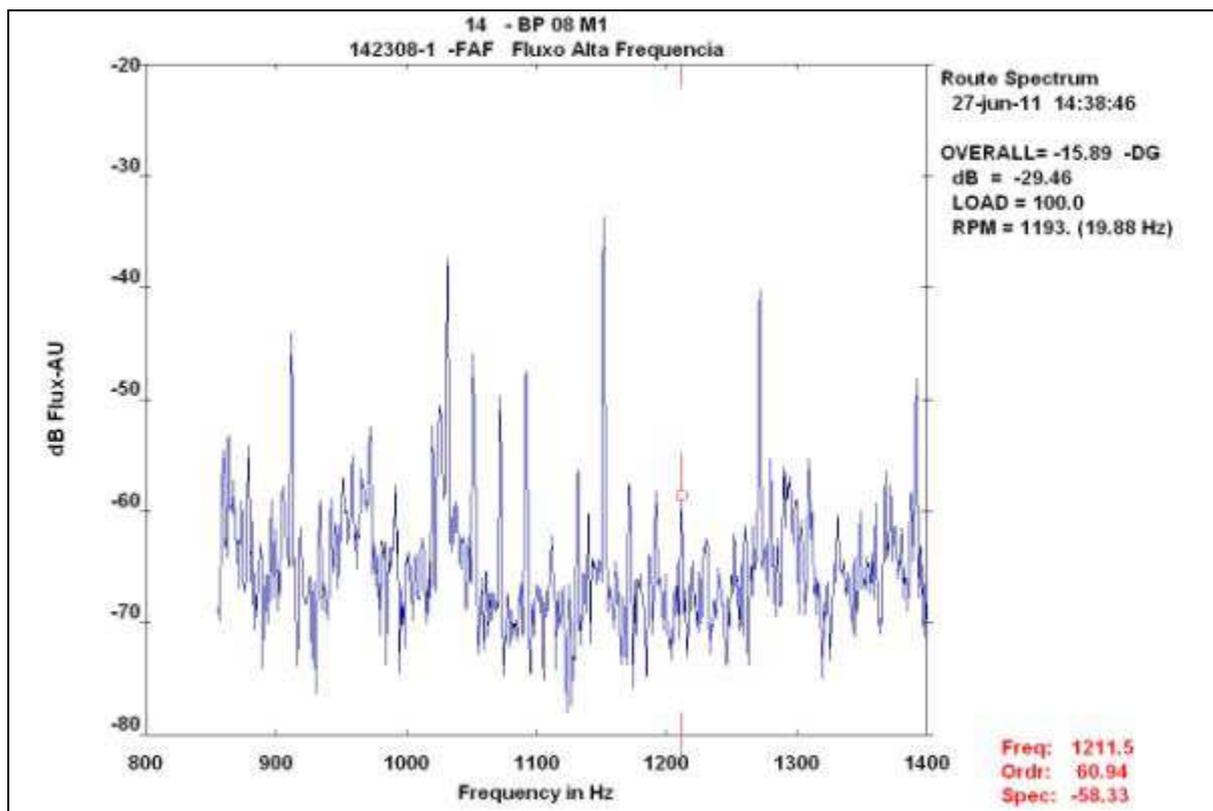


Figura 313 - Frequência de passagem de barras do rotor
Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na f_{rs}

Equação 19 (Figura 34)

$$F_{2LFR} = (Q_r \cdot f_r - f_s) \pm 2 \cdot n \cdot f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

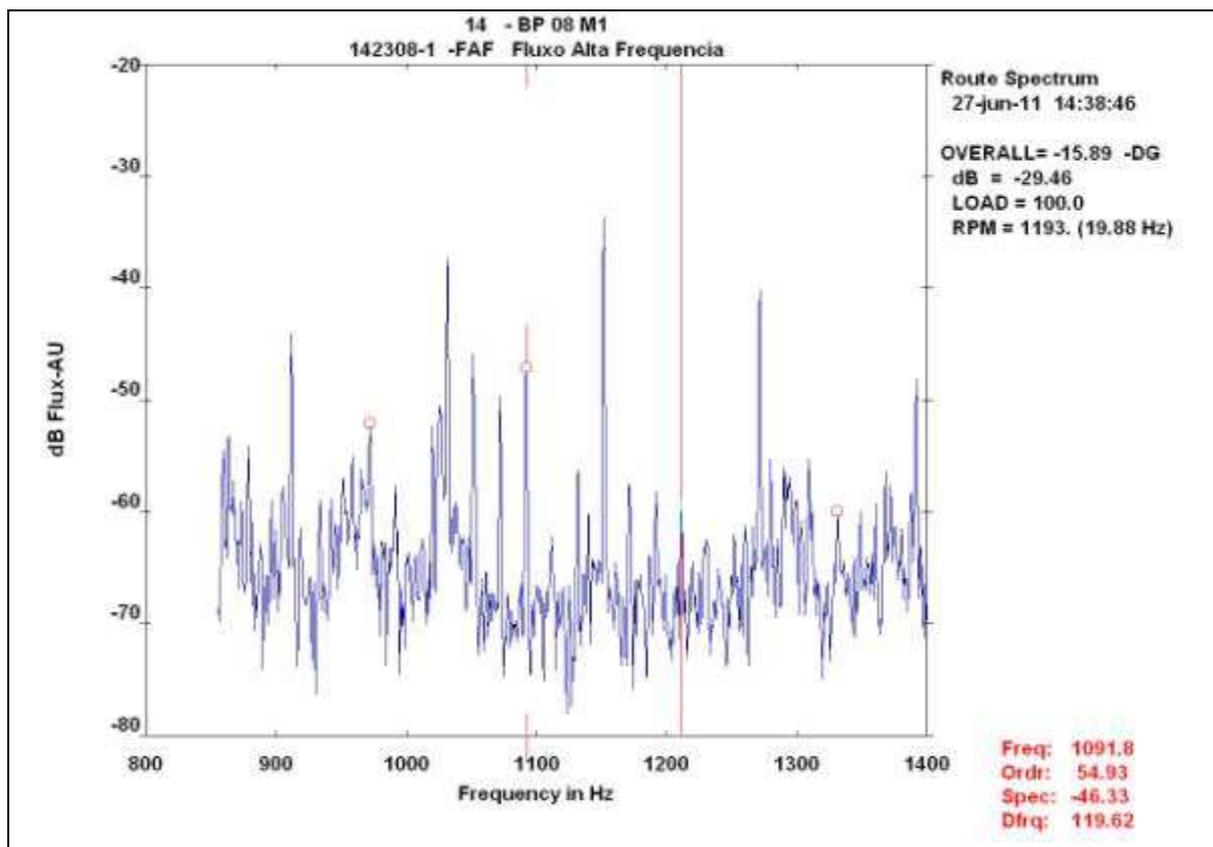


Figura 324 - Bandas laterais de 2xFL em torno da PSP do rotor
Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na frs moduladas pela frequência de rotação.

Equação 20– (Figura 35 e 36)

$$F_{rsr} = [(Q_r \cdot fr - fs) \pm 2 \cdot n \cdot fs] + k \cdot fr \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ e } k = 1, 2, 3, \dots$$

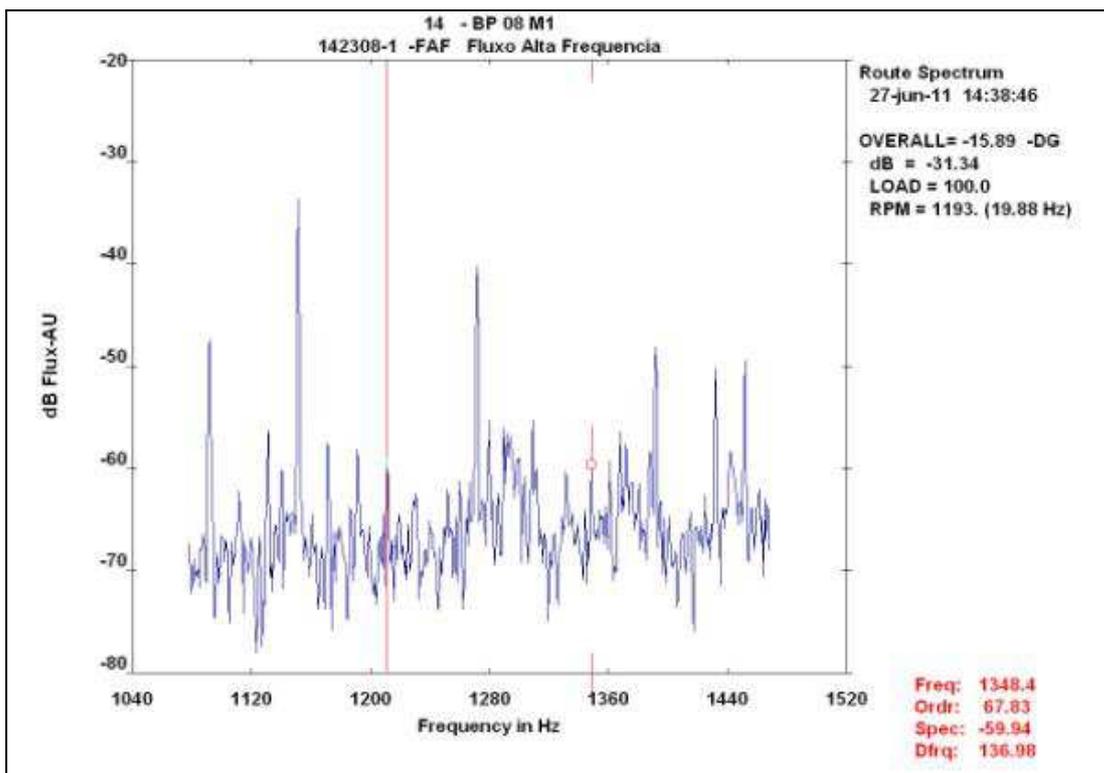


Figura 335 - Frsr banda superior mais fr
Fonte: Acervo do Autor

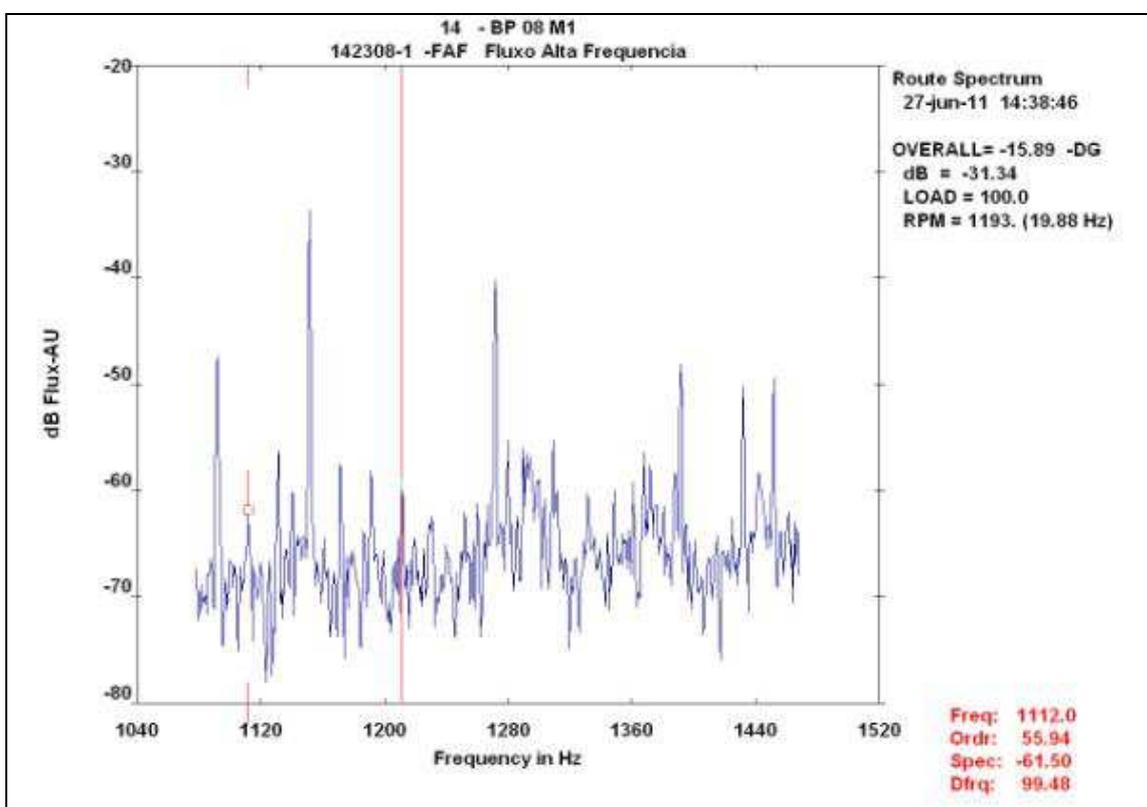


Figura 346 - Frsr banda inferior mais fr
Fonte: Acervo do Autor

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na frs moduladas pela frequência de escorregamento.

Equação 21 – Fsfr

$$Fsfr = [(Qr.fr - fs) \pm 2.n.fs] + k.s.fs \quad n = 1,2,3, \dots \text{ e } k = 1,2,3 \dots$$

Bandas Laterais de duas vezes a frequência da linha na frs modulas pela frequência da linha.

Equação 22 (Figura 37 e 38)

$$FLfr = [(Qr.fr - fs) \pm 2.n.fs] + fs \quad n = 1,2,3, \dots$$

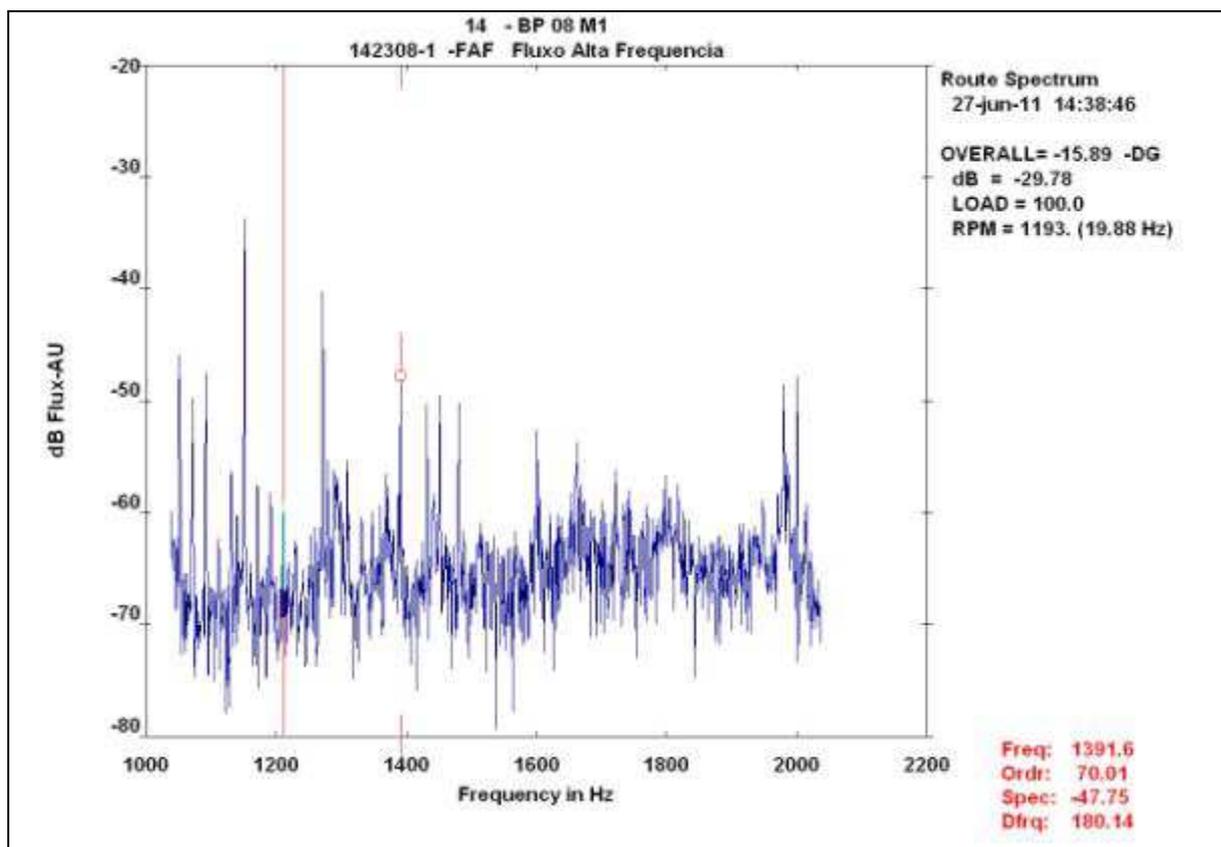


Figura 357 - Banda lateral superior de 2xfs da PSpR + fs
Fonte: Acervo do Autor

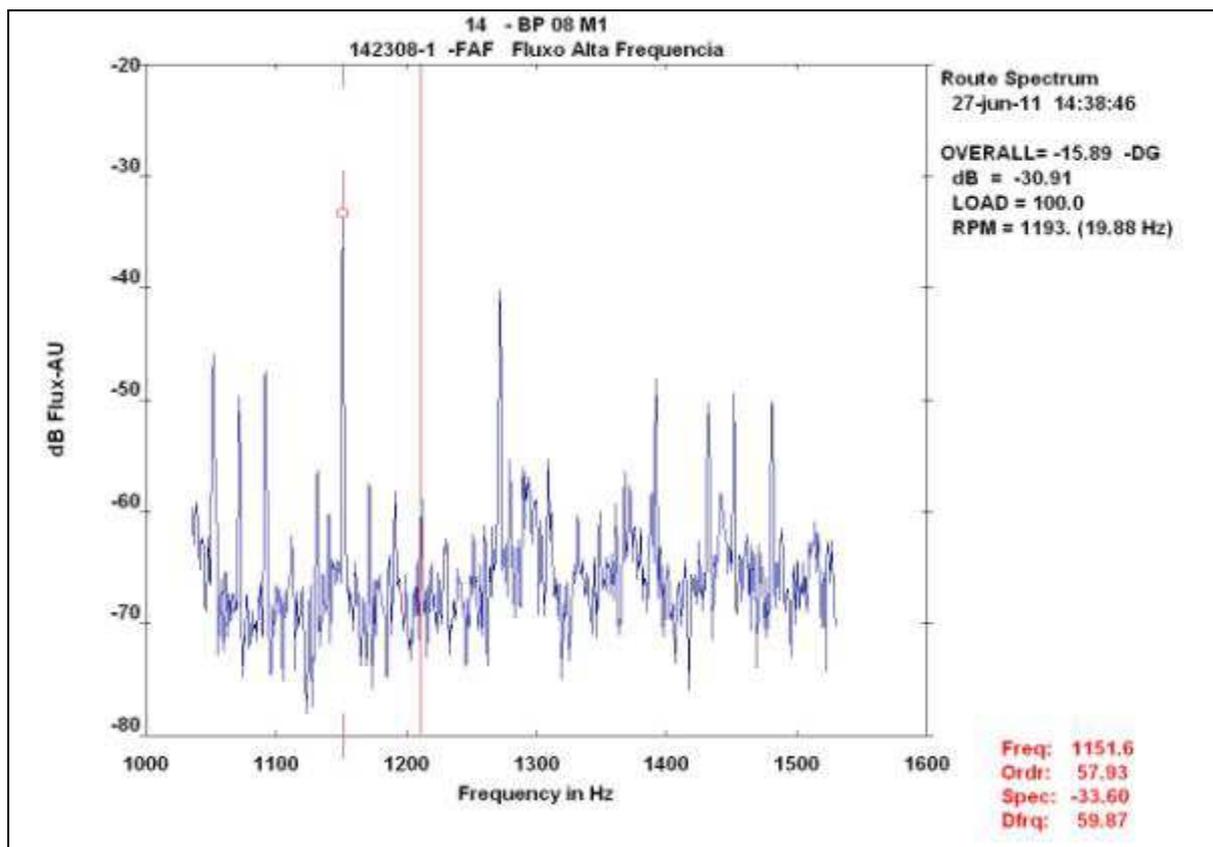


Figura 368 - Banda lateral superior de 2xfs da PSPr - fs
Fonte: Acervo do Autor

6 EQUAÇÕES DETERMINÍSTICAS DE FALHAS

6.1 DETECÇÃO EM BAIXA FREQUÊNCIA - CURTO-CIRCUITO ENTRE ESPIRAS

Baseado na experiência industrial, pode-se afirmar que a falha de curto-circuito entre espiras é uma das mais complexas de detecção e previsibilidade do tempo para entrada em curto franco. As principais causas possíveis para a ocorrência dessa falha são:

1. Vibração.
2. Contaminação por pequenas partículas sólidas, causando abrasão.
3. Defeitos de fabricação, permitindo deficiências na isolação.
4. Picos de sobretensão causando rupturas na isolação.

Estando o motor em operação, não é possível a aplicação dos testes convencionais para a detecção do curto entre espiras. O único teste possível de ser aplicado com o motor desenergizado e que pode detectar a ocorrência do curto entre espiras é o de medição da resistência ôhmica das bobinas do motor. A diferença entre a resistência ôhmica é muito pequena entre uma bobina em condições normais e outra com poucas espiras em curto-circuito. Além desse aspecto de difícil detecção de diferenças, o motor necessita estar desenergizado, o que inviabiliza a aplicação na maioria dos equipamentos de uma indústria que opera continuamente.

Na Figura 39 temos a representação de uma bobina com 3 espiras. Nestas bobinas dois pontos (a e b) estão representando um curto-circuito, explicação realizada por Joksimovic (2000).

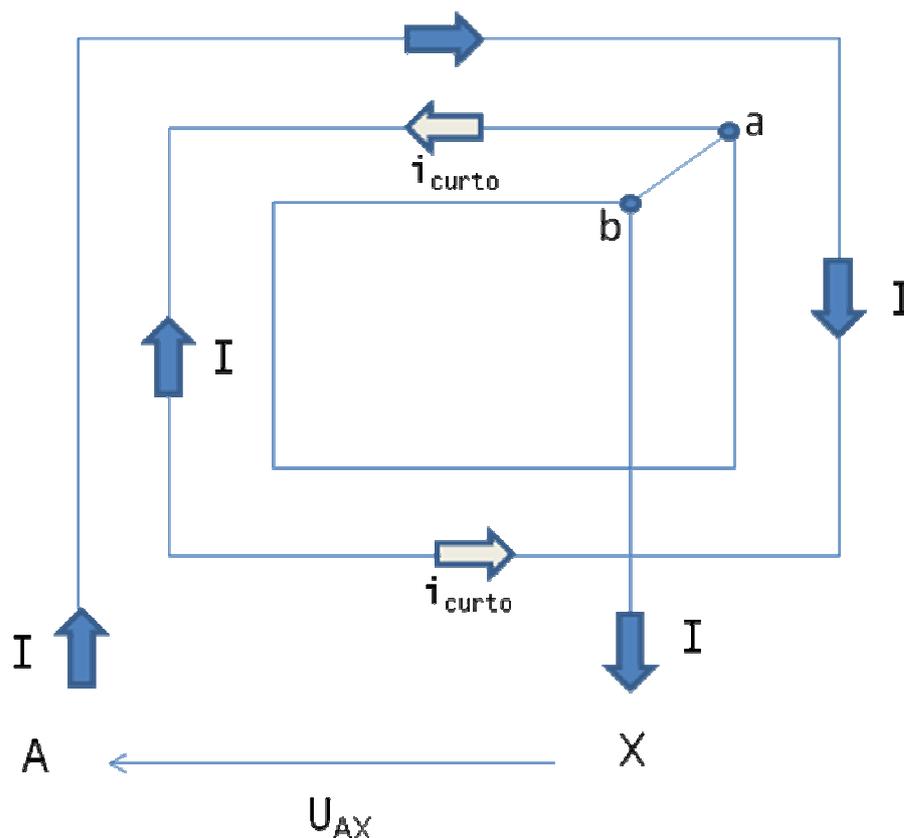


Figura 39 - Representação do curto-circuito entre espiras.
Fonte: Joksimovic(2000)

O circuito acima é alimentado por uma diferença de potencial (U_{AX}) entre os pontos A e X e esse circuito é, em condições normais, percorrido apenas pela corrente I. Devido ao curto-circuito que surge entre os pontos a e b, esses causam o surgimento de um circuito fechado percorrido pela corrente i_{curto} . As correntes I e i_{curto} vão gerar forças magneto-motrizes (fmms) opostas e a fmm resultante dessa bobina terá seu volume de energia reduzido no seu entorno (JOKSIMOVIC, 2000).

Para que esse tipo de falha fosse detectado, seria necessária uma medição periódica da resistência ôhmica das bobinas com um equipamento chamado Microhmímetro ou com um Surge Test, mas em ambos os casos é necessário que o motor seja desenergizado e seus cabos de alimentação desconectados, o que inviabiliza a aplicação em campo num processo produtivo ininterrupto.

De posse da alteração do fluxo eletromagnético resultante, devido ao surgimento do curto entre espiras, torna-se possível detectar as alterações ocasionadas no espectro sob análise. o 21º harmônico da frequência da linha se apresenta em todas

as falhas do estator (NANDI, 2000). após a coleta de um número superior a 1000 espectros de fluxo magnético, atestaram que o 19º e o 21º harmônicos da frequência da linha são os mais estimulados com o surgimento do curto-circuito entre espiras e desbalanceamento de fases, sendo, portanto, consideradas frequências determinísticas para o diagnóstico de curto entre espiras (LAMIN, 2004).

O curto entre espiras elimina uma grande quantia de espiras do estator, isso causará um efeito na distribuição do fluxo magnético no entreferro do motor. Além disso, uma tensão será induzida no curto-circuito e isso resultará em uma corrente que fluirá e será limitada apenas pela própria impedância do curto-circuito. Esse valor de impedância determinará o tempo até que o curto-circuito se expanda e ocasione uma falha severa de isolamento. A corrente de falta devido ao curto-circuito na espira se torna uma fonte de uma fmm adicional, no qual também há uma distribuição do espectro sobreposta na distribuição principal do campo eletromagnético. Isso conduzirá a uma mudança nos harmônicos observados no fluxo de dispersão medido, sendo isso a base para a técnica de identificação desse tipo de ocorrência (MELERO *et al.*, 2000).

A equação que identifica as frequências relevantes em baixa frequência para detecção de espiras em curto é mostrada a seguir (MELERO *et al.*, 2000):

Equação 23 – Frequências relevantes devido a curto-circuito entre espiras em baixa frequência (Figura 40).

$$f_{swf} = k \cdot f_s \pm n \cdot f_r$$

Onde n é um número natural inteiro não múltiplo do número de pólos do motor e k é a ordem dos harmônicos da frequência de linha.

Em suma, essa equação detecta o surgimento de curtos entre espiras, analisando as bandas laterais da frequência de linha, distanciadas em múltiplos da frequência de rotação do rotor (MANUAL CSI, 1997).

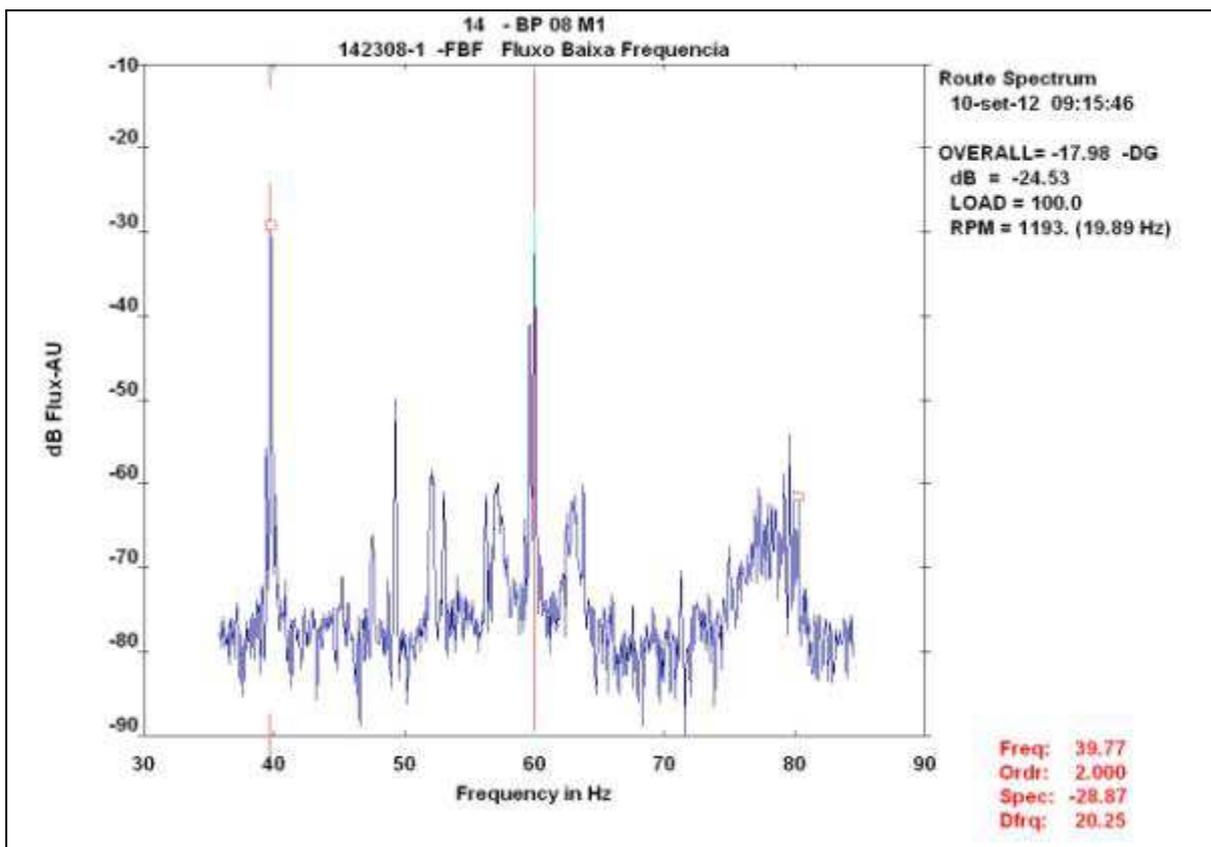


Figura 40 - Curto entre espiras em baixa frequência

Fonte: Acervo do Autor

Após inúmeros testes laboratoriais comparando motores em boas condições com motores dotados de curtos entre espiras e fazendo uso da equação 23, levantaram as seis frequências mais sensíveis que se alteraram em falhas severas, sendo elas (MELERO *et al.*, 2000),:

$$(f_s + 5.f_r), (5.f_s - 3.f_r), (f_s + 3.f_r), (5.f_s - f_r), (f_s - f_r) \text{ e } (3.f_s + f_r).$$

Para a detecção por métodos de monitoramento on-line, onde é possível um acompanhamento em tempo real da condição do motor, foi detectado que para falhas com um pequeno nível de curto entre espiras (1,38% do número de espiras), a frequência de $(f_s + 3.f_r)$ foi a mais sensível para falhas em estágios bastante iniciais, sendo alterada em 5,55%.

6.2 DETECÇÃO DE CURTO ENTRE ESPIRAS PELA PASSAGEM DE RANHURAS

O curto entre espiras pode ser detectado na família de frequências da passagem de ranhuras tanto do estator quanto do rotor. Algumas famílias de frequências em bandas laterais de duas vezes a frequência da linha e as famílias de bandas laterais relacionadas à frequência de rotação, também são indicadores de curtos entre espiras em análises de alta frequência (MANUAL CSI, 1997).

A empresa CSI mostrou em seus estudos de caso de curtos entre espiras que as alterações mais significativas no espectro de motores em boas condições e com falhas ocorrem nas frequências de $(f_{\text{psp}}+2fs)$, $(f_{\text{psp}}+2fs+fr)$ e $(f_{\text{psp}}+8fs)$. Conforme demonstrado na equação 14 e 15 e nas figuras 26 e 27, as alterações nesses picos são indicadores de curto-circuito entre espiras detectável na análise de alta frequência (MANUAL CSI, 1997).

6.3 DETECÇÃO DE ASSIMETRIAS NO ROTOR

Diversos tipos de assimetrias do rotor podem ser detectadas pela análise do fluxo axial. Falhas no rotor possuem várias causas, dentre elas: eletromagnéticas, térmicas, residuais, dinâmicas, ambientais, mecânicas, dentre outras (VAS, 1993).

Existem correntes de sequência positiva e negativa e suas frequências se manifestam no rotor de acordo com a seguinte equação:

Equação 24 - Assimétrias do rotor

$$f_{ra} = s \cdot fs$$

Essas correntes também induziram no estator correntes e sequência positiva e negativa como a seguir:

Equação 25 - Correntes induzidas no estator devido a assimetrias no rotor (Fig. 41)

$$Fra = s.fs \pm k.fs(1 - s)$$

Sendo $k=1,3,5,7\dots$

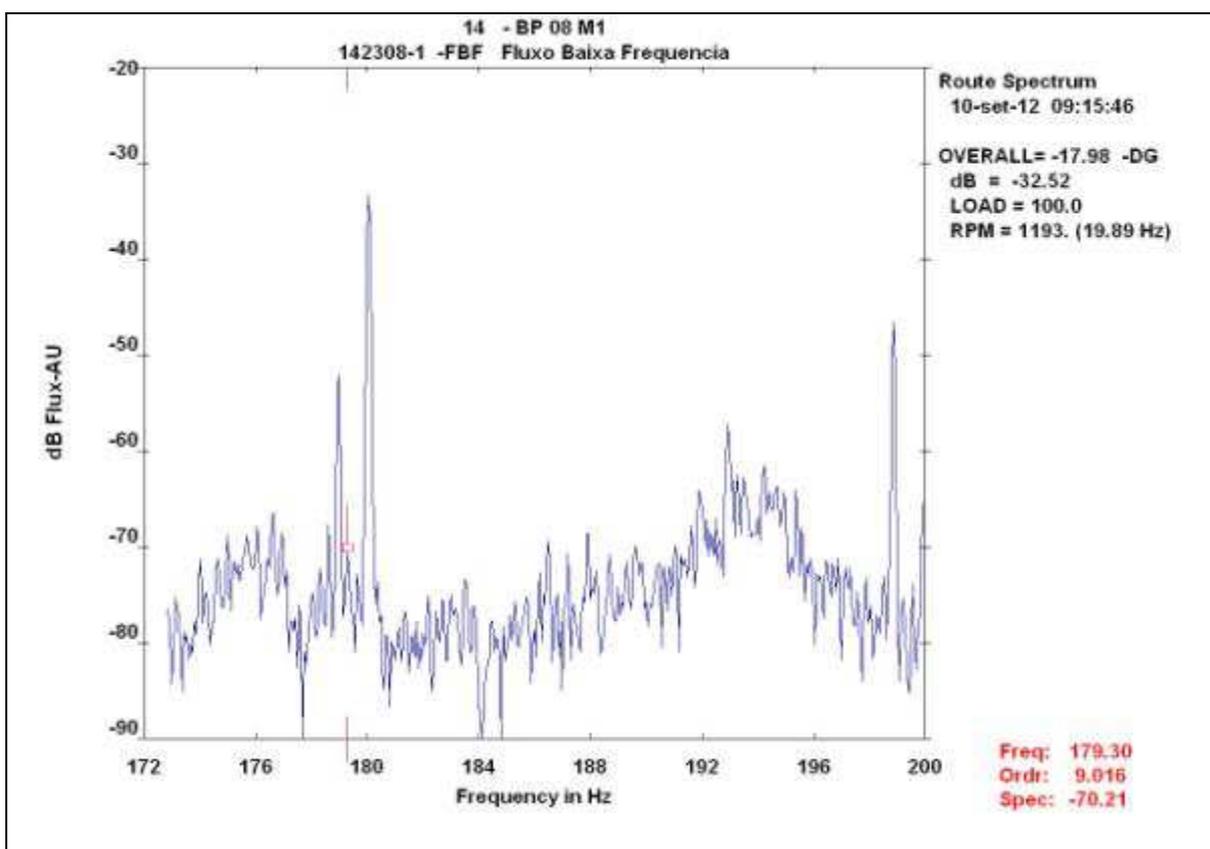


Figura 41 - Fra para $k=3$

Fonte: Acervo do autor

6.3.1 Detecção de barras quebradas do rotor

Quando uma barra do rotor se quebra, a corrente que circulava por essa barra é dividida entre as duas barras adjacentes em suas laterais. Isso ocasiona uma alteração da normalidade do fluxo magnético resultante, perda de torque e perda de

balanceamento dos vetores de fmms, o que ocasiona aumento da vibração mecânica, aquecimento, etc (ELKASAGBY, 1992).

Equação 26 - Detecção de barras quebradas do rotor (Figura 42).

$$f_{BB} = \left(\frac{f_s}{p}\right) \cdot (1 - s) \pm s \cdot f_s$$

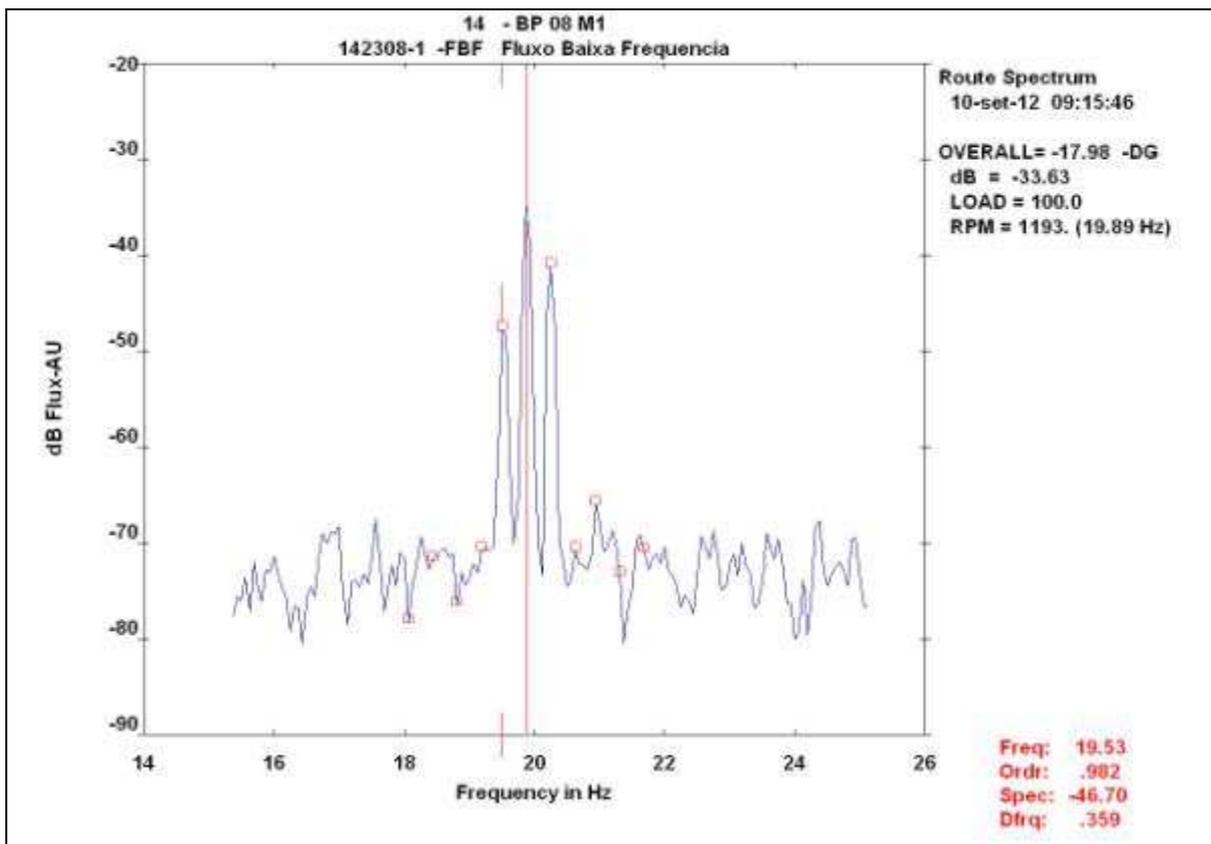


Figura 42 - Bandas laterais de sfs da rotação

Fonte: Acervo do autor

6.3.2 Detecção de barras quebradas do rotor

Equação 27 - Bandas laterais de 2xsfs da frequência da linha (MANUAL DA CSI, 1997 – ver figura 43 desse estudo).

$$f_{rf} = f_s(1 \pm 2 \cdot s)$$

A condição do rotor será analisada pela diferença de amplitude entre a frequência da linha e a banda lateral inferior de 2 vezes a frequência de escorregamento, $f_s(1-2s)$, sendo que a diferença de amplitude entre esses picos diminui à medida que o rotor perde barras.

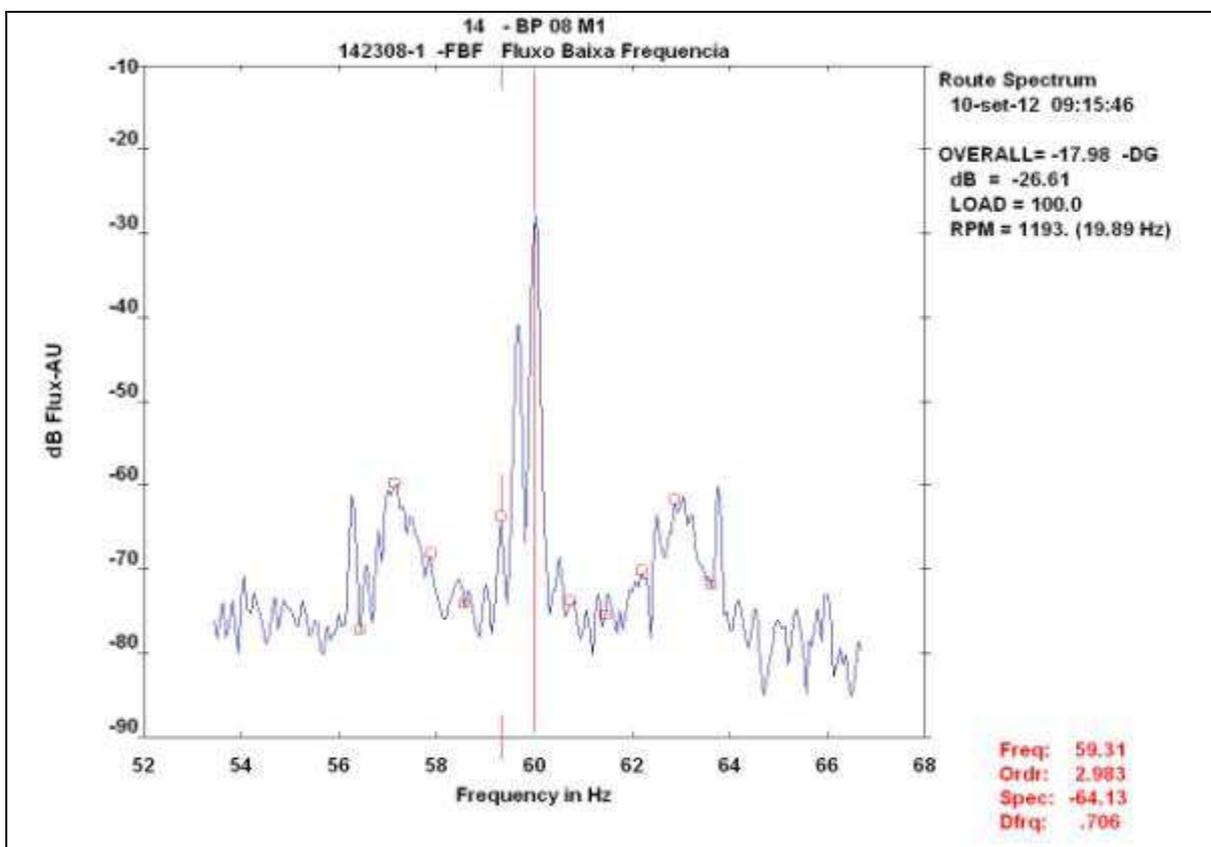


Figura 43 - Bandas laterais de $2xsfs$ em torno da frequência da linha
Fonte: Acervo do autor

6.4 DETECÇÃO DE ANEL QUEBRADO NO ROTOR

O anel é o componente que faz o curto-circuito entre as barras (Figura 44), sendo dois, um em cada extremidade da chamada gaiola de esquilo. Quando o anel se quebra, as correntes precisam tomar caminhos diferentes, deturpando completamente os vetores de f_{rms} .

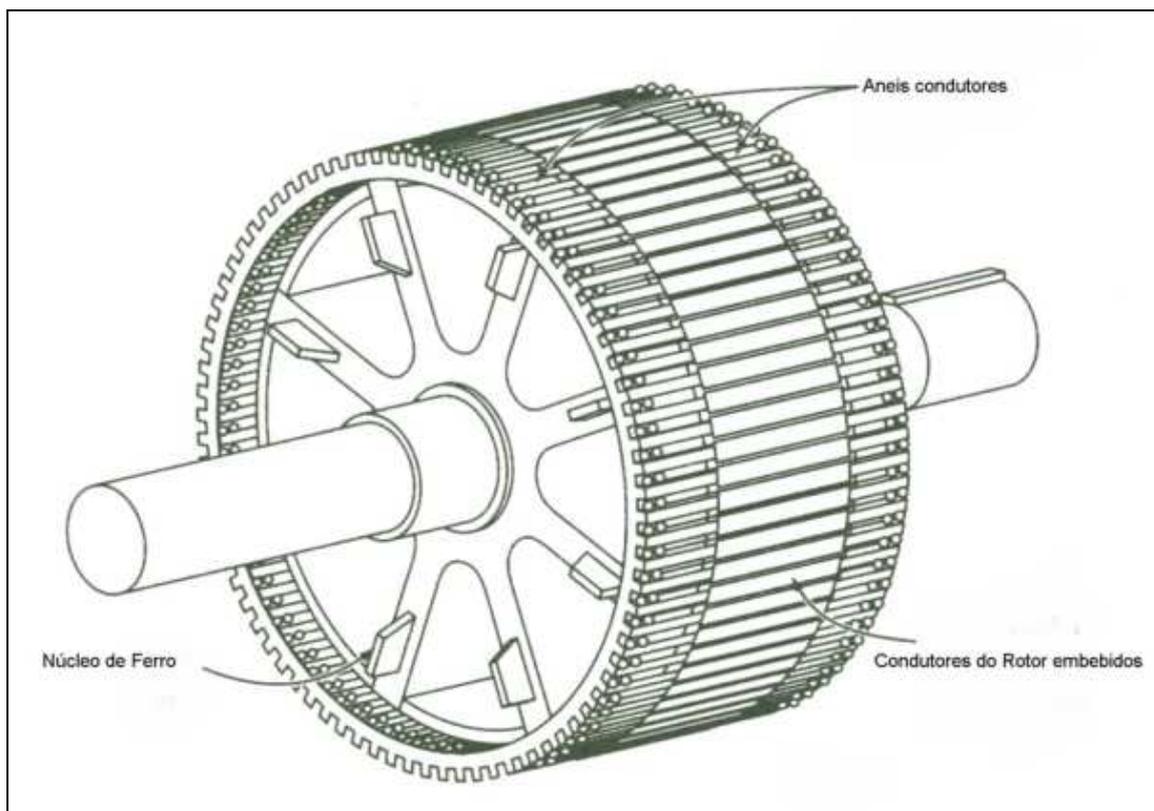


Figura 374 - Rotor com gaiola de esquiola

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAALKYAJ/maquinas-inducao>

A frequência mais sensível a essa falha é dada pela frequência da linha vezes o escorregamento, sendo essa a frequência das correntes induzidas no rotor (KLIMAN *et al.*, 1987).

Equação 28 - Equação para detecção de anel quebrado (Figura 45).

$$f_{ber} = s \cdot f_s$$

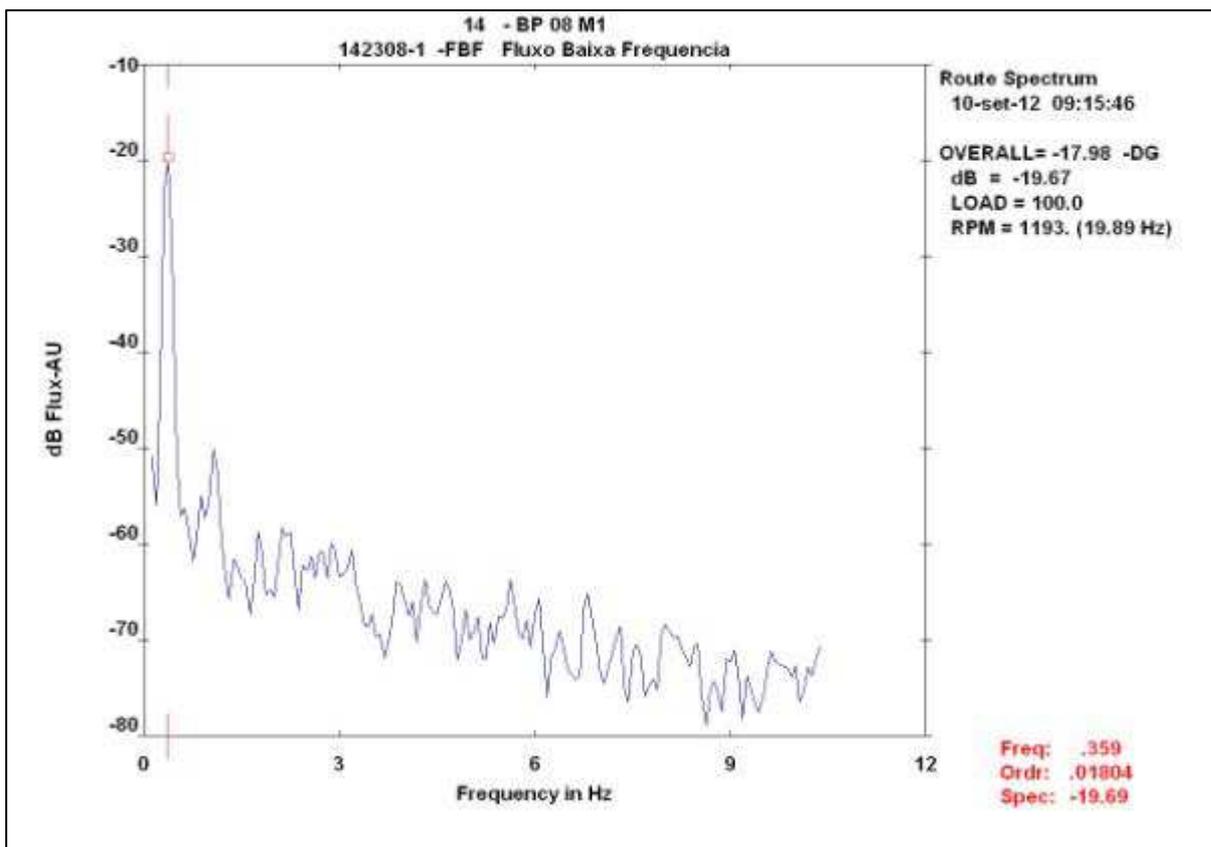


Figura 385 - Frequência de anel quebrado s.fs

Fonte: Acervo do autor

6.5 DETECÇÃO DE ASSIMETRIAS NO ESTATOR

Assimetrias no estator podem ocorrer por desbalanceamentos de tensão entre as fases, falta de fase de alimentação, bobina aberta, cabos rompidos, dentre outros. Qualquer dessas ocorrências causará alterações nas correntes estáticas. Essas se manifestarão em torques desordenados, causando ruídos, aquecimento elevado, vibração, etc. O aquecimento e a vibração fora da normalidade causarão uma degradação prematura do motor e sua maior possibilidade de entrada em falha.

Equação 29 - Assimetrias no Rotor

$$f_{SVA} = kfs \pm j(1-s)fs$$

onde k é um inteiro (1,3) e j também um inteiro primo (1,5,7,11,...).

Tabela 3 - Tabela para fSVA

k	1		3	
	+	-	+	-
1	fs+f2	fs-f2	3fs+f2	3fs-f2
5	fs+5f2	fs-5f2	3fs+5f2	3fs-5f2
7	fs+7f2	fs-7f2	3fs+7f2	3fs-7f2
11	fs+11f2	fs-11f2	3fs+11f2	3fs-11f2
13	fs+13f2	fs-13f2	3fs+13f2	3fs-13f2
17	fs+17f2	fs-17f2	3fs+17f2	3fs-17f2

Fonte: KOIKKO, 2003.

Testes realizados demonstraram que a componente fs+5f2 foi a mais sensível ao desbalanceamento de tensão. Substituindo f2 por (1-s)fs, podemos reescrever a equação como sendo (HENAO *et al.*, 2000):

Equação 30 - Equação mais sensível a assimetrias de tensão (Figura 46).

$$F_{sva} = fs(6-5s)$$

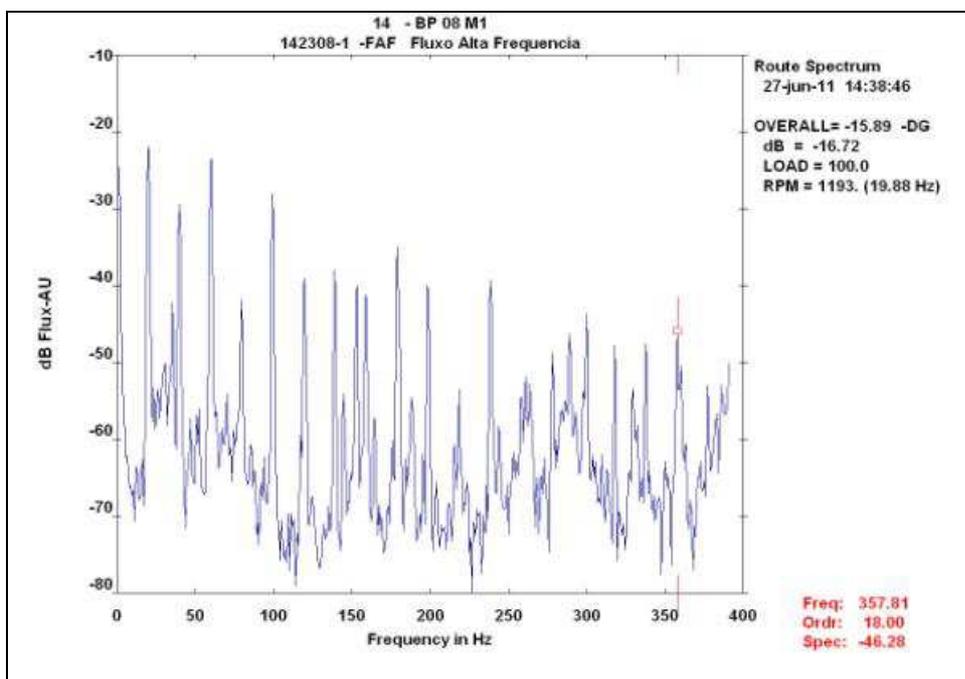


Figura 396 - Fsva mais sensível
Fonte: Acervo do autor

A frequência sensível aos desbalanceamentos de tensão é dada pela frequência da linha mais o número de pólos vezes a frequência de rotação dividida por 2, ou simplificando, a frequência da linha mais uma banda lateral superior do número de pares de pólos vezes a frequência de rotação, sendo representada pela fórmula (MANUAL DA CSI, 1997):

Equação 31 - Assimetrias de tensão

$$F_{sva} = LF + \frac{NP \times RPS}{2}$$

Sendo LF a frequência da linha, NP o número de pólos e RPS a rotação em Hz do eixo.

Substituindo LF por fs (frequency Source), NP/2 por p (pares de pólos) e RPS por fr (frequency rotation), teremos:

$$F_{sva} = fs + p \cdot fr \quad (i)$$

Fr é a frequência de rotação real do eixo, sendo essa a frequência síncrona menos a perda de velocidade pelo escorregamento, então podemos substituir fr por

$$fr = \left(\frac{fs}{p} \right) * (1 - s) \quad (ii)$$

Sendo s o percentual de escorregamento, o fator 1-s, fornece qual a porcentagem da velocidade de rotação síncrona o eixo está girando. O termo fs/p provê a rotação síncrona dada pela frequência da linha dividida pelo número de pares de pólos existentes.

Substituindo a equação (i) em (ii), teremos:

$$F_{sva} = fs + p \cdot \left(\frac{fs}{p} \right) * (1 - s) \quad (iii)$$

Simplificando (iii),

$$F_{sva} = fs + fs * (1 - s) = fs(2 - s)$$

Portanto,

Equação 32 - Assimetrias de tensão simplificada

$$F_{sva} = fs(2 - s)$$

Essa fórmula é equivalente à equação 29 com banda lateral superior, usando k e j iguais a 1.

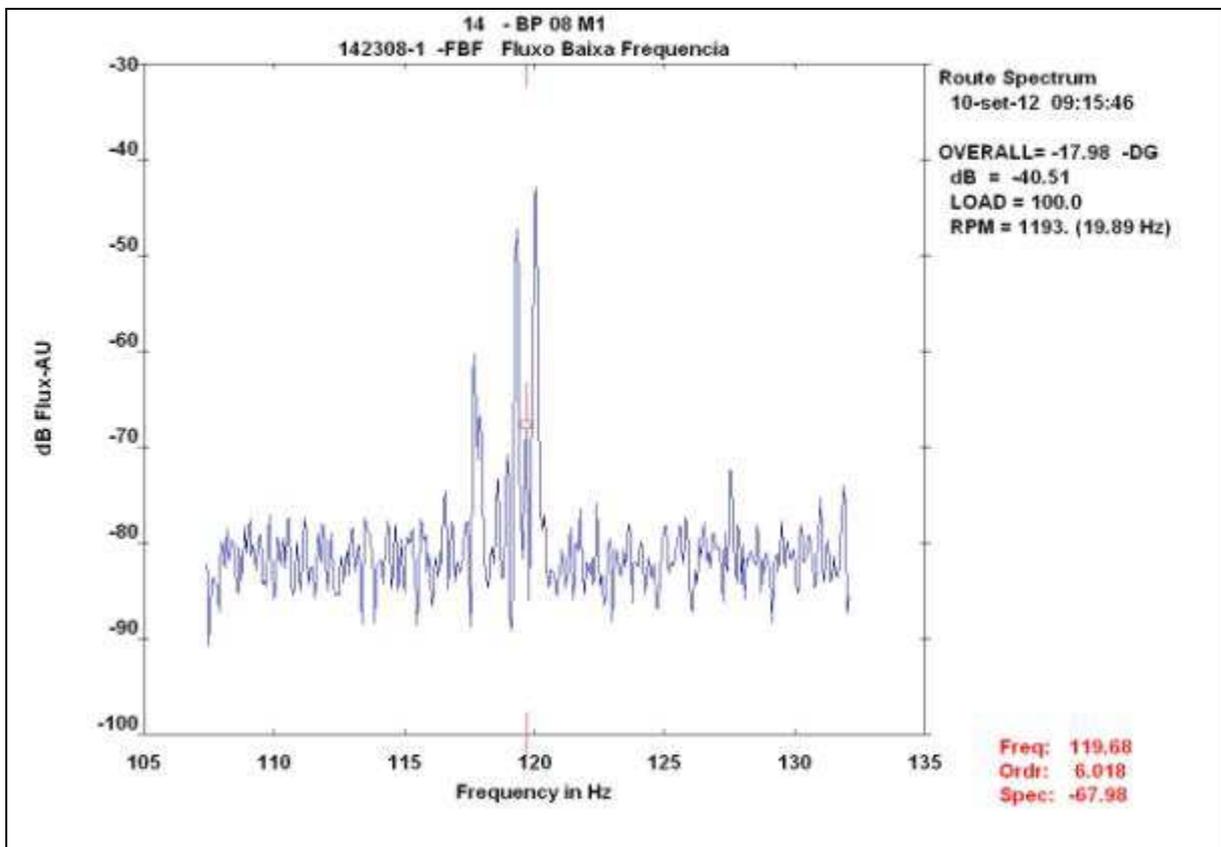


Figura 407 - Equação simplificada de assimetria de tensão

Fonte: Acervo do autor

$$F_{sva} = 60(2 - 0,006) = 119,64 \text{ Hz (Figura 47)}$$

7 ESTUDO DE CASO

Será apresentado um caso real de detecção de falha em um motor elétrico de média tensão utilizando-se a técnica de fluxo magnético. O caso ocorreu em uma empresa de mineração e a falha foi certificada após a desmontagem na oficina da empresa.

7.1 CONTEXTO DA APLICAÇÃO

A aplicação conta com um motor da marca BBC com os seguintes valores nominais: 4,16 kV, 610 cv (449 kW), 6 pólos (pares de pólos $p=3$) e 1191 rpm (19,85 Hz), 64 barras no rotor e 54 ranhuras no estator. Esse motor é acoplado a uma bomba centrífuga com função de bombear água para o setor produtivo na usina de beneficiamento de minério. Esse motor não possuía acompanhamento periódico pela técnica de fluxo magnético e, portanto, não possuía medições de referência padrão, chamada de “Assinatura” do equipamento. Essa é usada para ser comparada às futuras medições do equipamento e com isso obtendo-se diagnósticos de possíveis falhas que possam surgir.

7.2 METODOLOGIA APLICADA

Esse equipamento recebe periodicamente medições e o acompanhamento das técnicas de termografia e análise de vibração. Devido a algumas alterações nos parâmetros medidos por essas técnicas tais como elevação da amplitude de $2xf_s$ (120Hz) na análise de vibração e elevação da temperatura dos mancais de rolamento e do corpo do motor nas medições termográficas, foi necessária uma avaliação do comportamento elétrico do motor por meio do uso da técnica de fluxo magnético.

Para suprir a falta de leituras anteriores desse motor, foram tomadas como referências para comparativo a bomba reserva de mesmas especificações e outros dois motores, escolhidos da mesma marca (BBC), mesmo número de pólos, barras no rotor, ranhuras no estator e rotação, apenas com potência diferente. Isso forneceu subsídios para uma boa comparação e certificação das frequências determinísticas de falha no momento da decisão de intervenção.

7.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ESPECTROS DOS MOTORES

7.3.1 BANDAS LATERAIS DE S.FS NA FREQUÊNCIA DE ROTAÇÃO

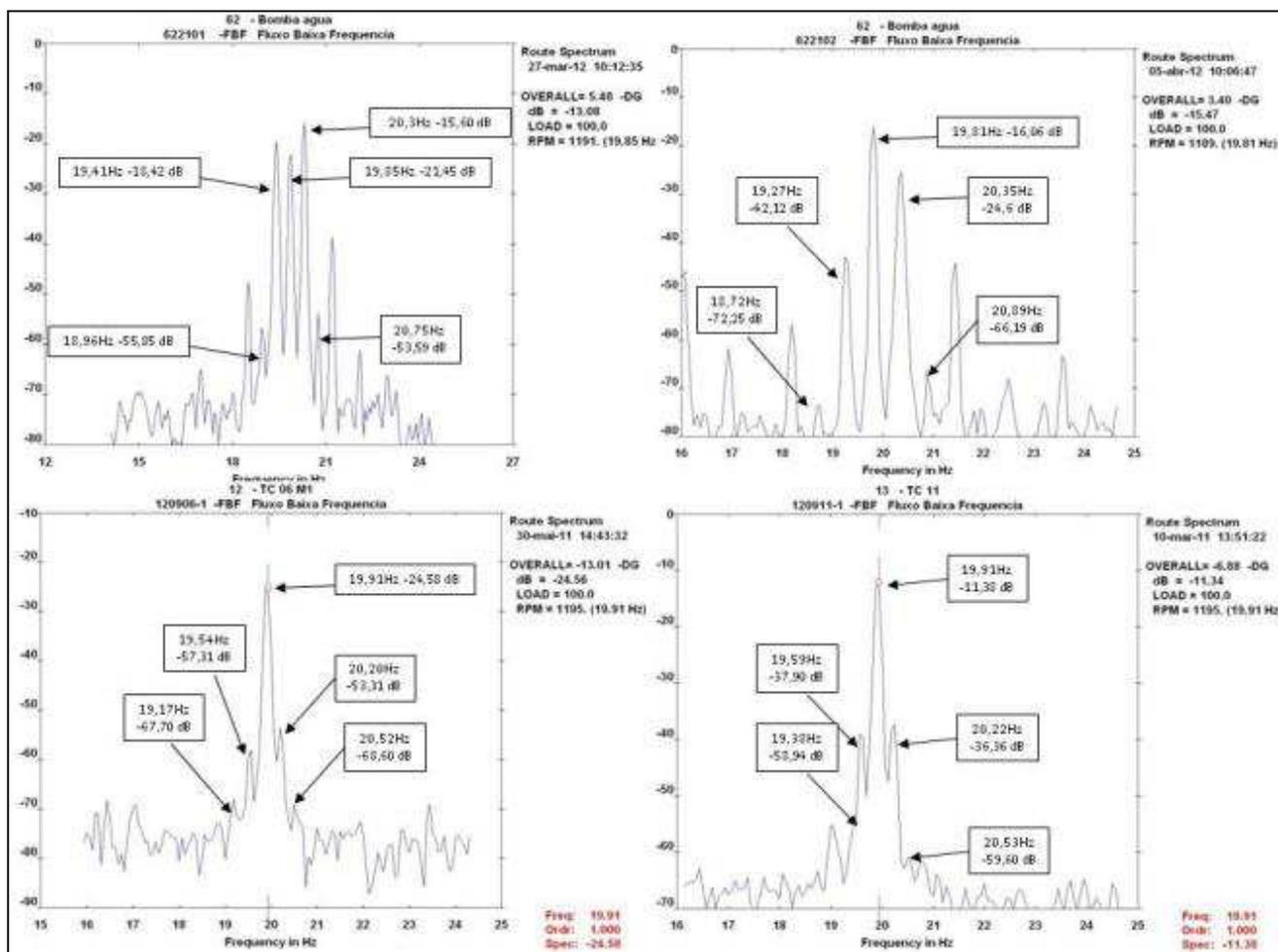


Figura 418 - Bandas laterais de s.fs da frequência de rotação

Fonte: Acervo do Autor

Realizando a análise desses quatro espectros (Figura 48) em torno da frequência de rotação dos motores, pode-se verificar que as bandas laterais de $s.fs$ em torno da rotação em todos os espectros, exceto o defeituoso, possuem amplitudes menores do que a amplitude da rotação. Caso o motor possuísse um histórico maior de leituras anteriores ao surgimento da falha, essas bandas laterais poderiam ser acompanhadas e seus crescimentos seriam modificações no espectro indicativas de um surgimento de falhas. Contudo, esse motor defeituoso foi medido já com a falha implantada, portanto os espectros tomados de outros motores passaram a ser as referências de boas condições. Dessa forma, entende-se que o aumento da energia da frequência da corrente que flui pelo rotor, dada por $s.fs$, indica que alguma anomalia está causando essa elevação de amplitude dessas bandas laterais.

7.3.2 BANDAS LATERAIS DE $s.fs$ E $2xs.fs$ EM TORNO DA FREQUÊNCIA DA LINHA

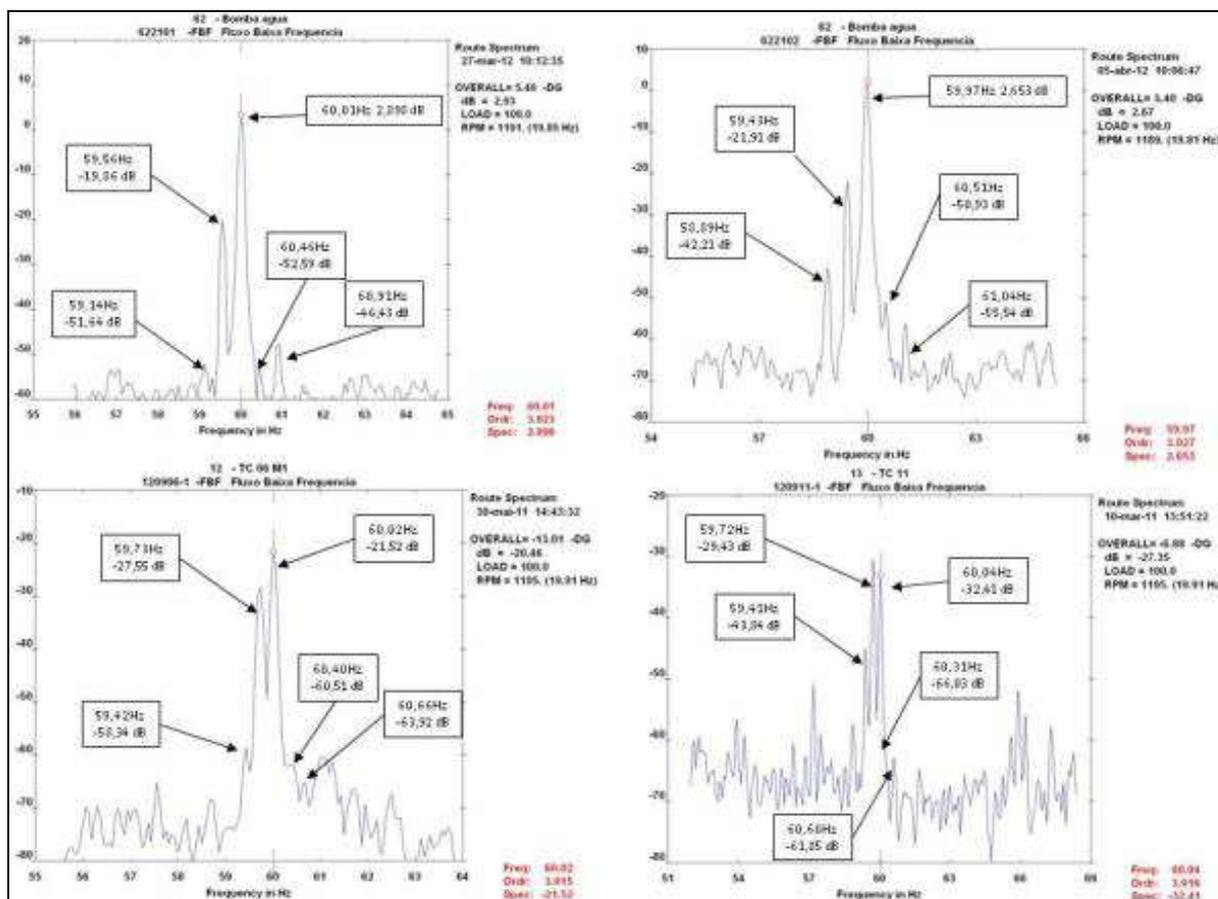


Figura 429 - Bandas laterais de $s.fs$ da frequência da linha

Fonte: Acervo do autor

A análise de espectro de corrente é uma técnica mais conhecida e com mais estudos do que a análise dos espectros de fluxo magnético. Para o espectro de corrente, já existem tabelas normativas de valores indicativos de falhas no rotor, onde é medida a diferença de amplitudes entre as bandas laterais de $s.fs$ e a frequência da linha. Sendo que, quanto menor essa diferença entre os picos das bandas laterais de $s.fs$ e da frequência da linha, maior o número de barras quebradas e pior a condição do rotor. A tabela 4 mostra os valores indicativos da condição das barras: A fig. 49 mostra os espectros de fluxo magnético comparados.

Tabela 4 - Diferença de Picos

Diferença entre os picos da fs e da banda lateral de $2xs.fs$		
A[dB] $fs-2xs.fs$	Avaliação da Condição	Ação Recomendada
>50 dB	Excelente	nenhuma
44 a 50 dB	Boa	nenhuma
39 a 44 dB	moderada	continuar inspeção e analisar tendência
35 a 39 dB	desenvolvendo trinca em uma barra ou juntas com alta resistência	reduzir o intervalo de inspeção e analisar a tendência
30 a 35 dB	provavelmente duas barras trincadas e/ou quebradas ou juntas de altas resistências	fazer análise espectral para confirmar a fonte do problema
25 a 30 dB	muitas barras trincadas e/ou quebradas, várias trincas os anéis de curto e falhas severas em toda gaiola	desmontar o rotor para inspeção

< 25 dB	Severa	desmontar para inspeção e substituir o rotor
---------	--------	--

Fonte: Liberty Technologies, 1996.

Para a análise de corrente, os valores são absolutos e medidos diretamente nos cabos de alimentação do motor. Devido ao acoplamento magnético completo, todas as manifestações eletromagnéticas se apresentam no fluxo medido em qualquer ponto e da mesma forma essas informações são levadas através da corrente. Medindo a corrente e analisando seu espectro, pode-se obter informações da condição interna do motor, independente de sua geometria e com isso podem-se estabelecer valores que são referenciais para a análise da condição do rotor, isso se mostra na tabela 4 da Liberty Technologies.

Contudo, na análise de fluxo magnético, uma tabela só seria possível de ser elaborada para motores iguais e sendo medidos sempre no mesmo ponto. Isso torna a elaboração de uma tabela algo mais complicado de ser realizado, pois qualquer mudança no tamanho e formato da carcaça, no ponto de medição, na distância entre a espira e a carcaça do motor, quando está colocada na tampa defletora desse, fará com que a amostra do fluxo se modifique e a torne distinta para cada tipo de motor.

Uma tabela poderia ser feita para modelos de motores específicos, partindo de um motor em bom estado, forçando-se em condições laboratoriais suas falhas no rotor e mapeando as alterações nos picos. Para o motor em questão, como não havia um espectro de bom estado conhecido para que fosse adotado como referencial, foi feita uma análise comparativa com outros motores de características similares. A Tabela 5 a seguir mostra a diferença entre os picos da frequência da linha e as bandas laterais de $s.fs$ e $2xs.fs$.

Tabela 5 – Comparativo entre os deltas de todos os motores

		(-2xs.fs)	(-s.fs)	Fs (Hz)	(s.fs)	(2xs.fs)
62.21.01	(Hz)	59,14	59,56	60,01	60,46	60,91
	(dB)	-51,64	-19,86	2,898	-52,59	-46,43
Delta entre fs bandas laterais ^e	(dB)	54,538	22,758		55,488	49,328
	<hr/>					
62.21.02	(Hz)	58,89	59,43	59,97	60,51	61,04
	(dB)	-42,21	-21,91	2,653	-50,93	-55,54
Delta entre fs bandas laterais ^e	(dB)	44,863	24,563		53,583	58,193
	<hr/>					
12.09.06	(Hz)	59,42	59,73	60,02	60,40	60,66
	(dB)	-58,34	-27,55	-21,52	-60,51	-63,92
Delta entre fs bandas laterais ^e	(dB)	36,82	6,03		38,99	42,4
	<hr/>					
12.09.11	(Hz)	59,41	59,72	60,04	60,31	60,60
	(dB)	-43,84	-29,43	-32,41	-66,03	-61,85
Delta entre fs bandas laterais ^e	(dB)	11,43	-2,98		33,62	29,44
	<hr/>					

Fonte: Acervo do autor

Caso usássemos na análise de fluxo magnético a tabela da Liberty Technologies, dos valores de delta entre fs e $-2xs.fs$, para análise de espectro de corrente, poderíamos afirmar caso fossem valores válidos também para essa técnica, que o motor 62.21.01 está em excelente condição (>50 dB), o motor 62.21.02 estaria em boa condição (entre 44 a 50 dB), o motor 12.09.06 tem possibilidade de estar desenvolvendo trincas (entre 35 e 39 dB) e por fim o motor 12.09.11 estaria em condições severas (<25 dB).

No entanto, como já citado, essa tabela aplica-se apenas à análise de corrente, onde os valores independem das características construtivas do motor, o que, pelo contrário, afeta diretamente a análise de fluxo magnético. Contudo as discrepâncias nas bandas laterais de $s.fs$ em torno da rotação foram um fator determinante para detectar esse tipo de falha. Essa falha não está catalogada nas equações já

apresentadas nesse trabalho, pois não se enquadra fisicamente em nenhum dos casos.

7.4 DESCRIÇÃO DA FALHA

Na estrutura construtiva dos estatores dos motores BBC, existem entre as ranhuras (caminho pelo qual percorrem as espiras de uma bobina), barras isolantes de uma mistura de fibra de vidro com uma trama interna de arames de aço para resistência mecânica. Popularmente conhecidas como “taliscas”, têm por finalidade travar mecanicamente o grupo de espiras que percorre o interior do canal da ranhura e isolar uma ranhura da outra.

Com os anos de uso, os efeitos térmicos, vibração, umidade e envelhecimento, essas taliscas tendem a se soltar do interior das ranhuras. Com a sua liberação, essas entram em contato com o rotor e causam uma forma de curto-circuito, afetando diretamente no seu desempenho, pois correntes de fuga irregulares e assimétricas são direcionadas ao rotor pela talisca e assim funcionamento se compromete. A figura 50 mostra o motor analisado com foco nas ranhuras, taliscas e grupo de bobinas do estator.

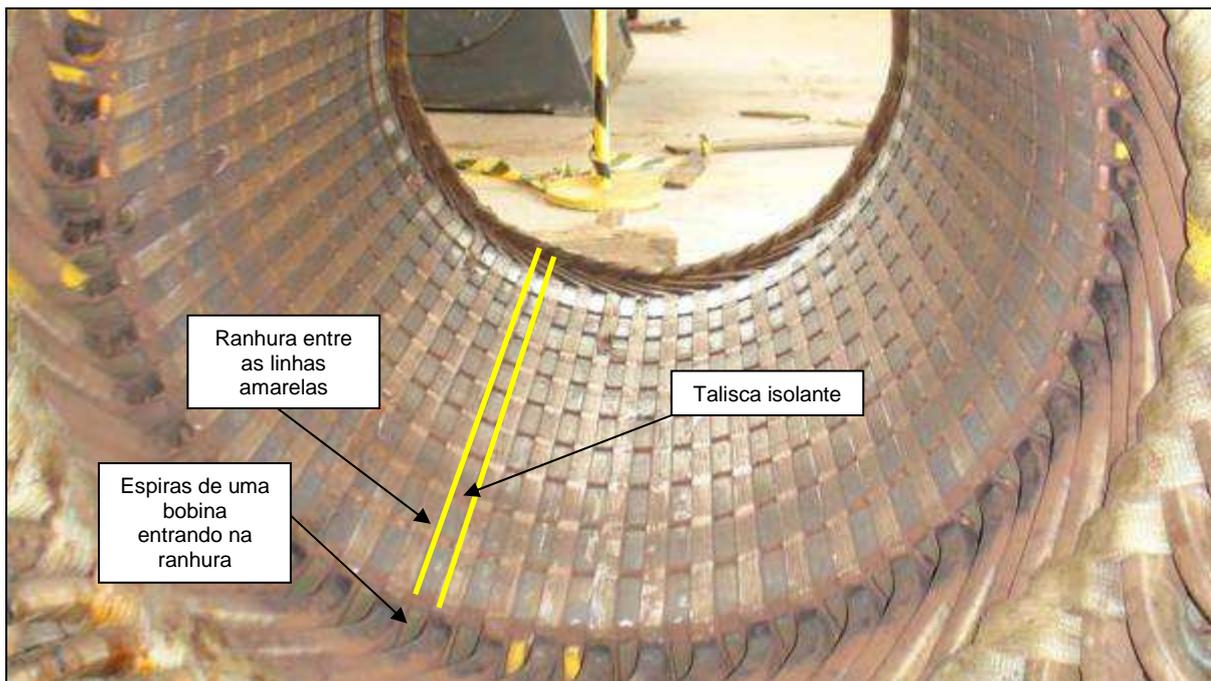


Figura 50 - Vista do estator
Fonte: Acervo do autor

O motor com numeração 62.21.01, estava apresentando ruído anormal, excitação da frequência de $2xfs$ (120 Hz) na análise de vibração, que indica anomalia de origem elétrica manifestando-se de forma mecânica, aquecimento anormal em toda a carcaça e desarmando por sobrecarga durante o seu funcionamento. Baseado na análise de fluxo magnético e na identificação por comparação das discrepâncias citadas entre as bandas laterais de $s.fs$ em torno da frequência de rotação, foi solicitada a substituição do motor e a abertura do motor com falha para inspeção interna.

Realizada a inspeção foram detectadas taliscas que se soltaram e fecharam curto-circuito entre rotor e estator, além de algumas partes que ficaram totalmente livres girando e causando pequenos curtos em vários pontos. A seguir são expostas as imagens dos pontos falhos registrados fotograficamente:

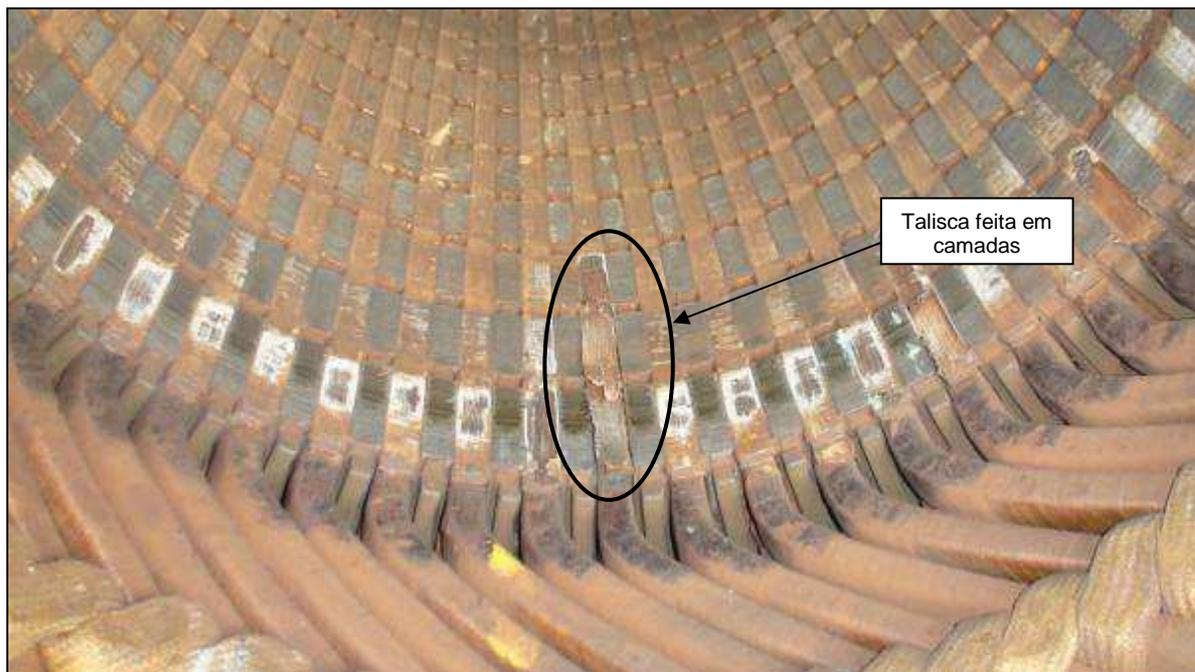


Figura 51 - Visão 1 da falha detectada
Fonte: Acervo do autor

A imagem 51 demonstra que a talisca é constituída por camadas, e essas podem se soltar como nesse caso e se tornarem ressaltos, tocando no rotor, com isso o curto-circuito acontece entre estator e parte girante.

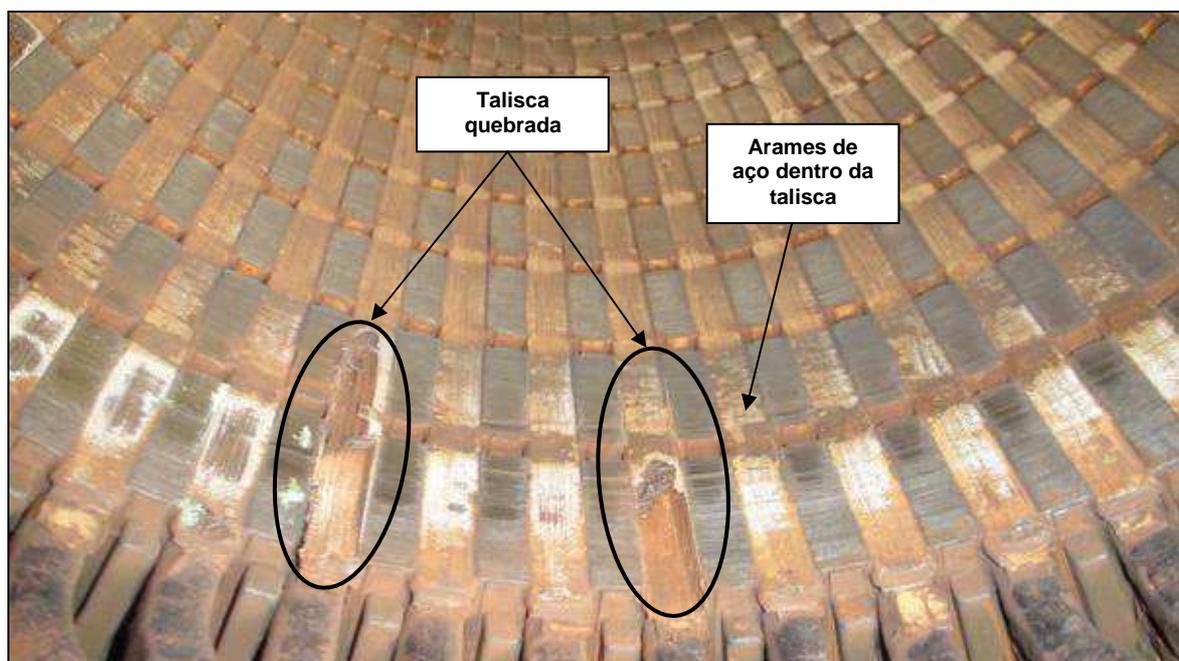


Figura 52 - Visão 2 da falha detectada
Fonte: Acervo do autor

A figura 52 mostra partes removidas das taliscas e parte interna de arames de aço, responsáveis pelos curto-circuitos entre rotor e estator. A imagem também mostra manchas brancas oriundas de um processo de abrasão por lixamento, certamente de partes de taliscas que se soltaram e ficaram agarradas entre rotor e estator.



Figura 53 - Visão 3 da falha detectada
Fonte: Acervo do autor

A visão aproximada da construção das taliscas e sua degradação é mostrada na figura 53. Essas possuem uma geometria de encaixe dentro da ranhura ou canaleta de passagem das espiras e são fixadas com cola para uma maior resistência à movimentação.



Figura 444 - Visão 4 da falha detectada

Fonte: Acervo do autor

A figura 54 mostra outro trecho no início do quadrante lateral do estator faltando uma parte da talisca.



Figura 55 - Visão 5 da falha detectada

Fonte: Acervo do autor

Vários pontos nas ranhuras foram afetados com a perda de partes das taliscas. A figura 55 mostra mais uma parte removida na parte mediana do quadrante lateral esquerdo do estator.



Figura 456 - Visão 6 da falha detectada
Fonte: Acervo do autor

Uma visão detalhada do processo de separação das camadas de uma talisca é mostrada na figura 56. Como o entreferro (espaço livre entre rotor e estator) é muito pequeno, qualquer elevação em nível de uma dessas camadas da talisca repleta de arames de aço, é o suficiente para o surgimento de um contato com o rotor e o fechamento de um circuito que permite a passagem de corrente espúrias, sendo essas responsáveis por perdas eletromagnéticas, alteração do fluxo magnético resultante, elevações de temperatura, perda de torque, dentre outras anormalidades que foram percebidas nas inspeções sensitivas realizadas para esse estudo de caso.



Figura 467 - Visão 7 da falha detectada
Fonte: Acervo do autor

A figura 57 mostra taliscas danificadas também no quadrante superior do estator.



Figura 478 - Rotor exposto
Fonte: Acervo do autor

A figura 58 traz uma visão do rotor desmontado. Foi analisada minuciosamente cada uma das barras que formam a gaiola de esquilo no rotor. Nenhuma trinca foi

detectada e isso se confirma na análise rotórica feita pelas bandas laterais inferiores de 2xs.fs.

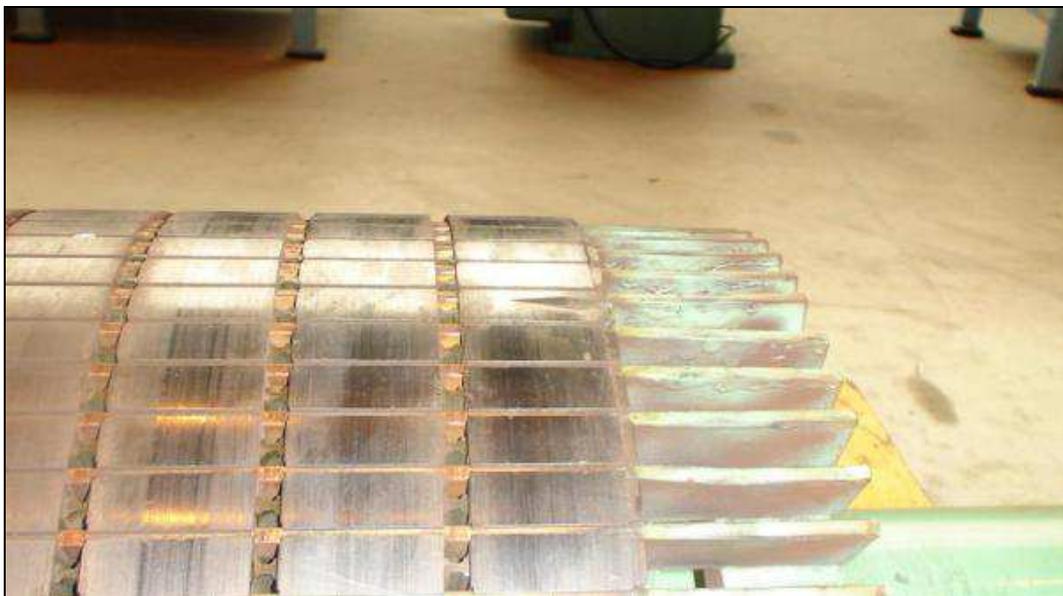


Figura 489 - Sinal de atrito no rotor
Fonte: Acervo do autor

Devido ao desprendimento de algumas partes de taliscas e a elevação de outras, ficou claramente demonstrado que isso gerou contato com o rotor e deixou marcas de atrito e/ou polimento no rotor. Isso pode ser visto na figura 59, onde as partes de extremidade do rotor que ficam na mesma posição das taliscas que se elevaram, se tornaram polidas devido a esse contato.

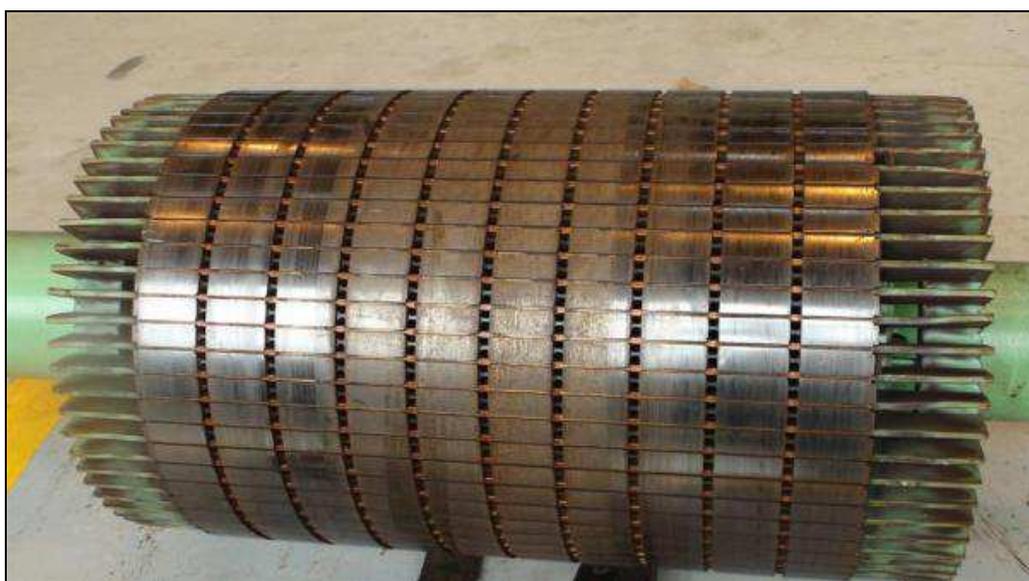


Figura 60 - Sinal de atrito no rotor - vista 2
Fonte: Acervo do autor

Na figura 60 têm-se a visão dos dois extremos do rotor com sinais de atrito feitos pelas taliscas elevadas.



Figura 61 - Sinal de atrito no rotor - vista 3
Fonte: Acervo do autor

A figura 61 traz a vista superior do rotor mostrando a forma como as barras são afixadas entre os blocos magnéticos que visam intensificar os vetores de força através da criação de um núcleo similar ao de um transformador.

7.5 TERMOGRAFIA DO MOTOR

Durante a pesquisa inicial do comportamento falho do motor, foi realizada a inspeção termográfica (imagem térmica onde as cores representam as diferentes temperaturas) e por meio dessa, foi visualizado um comportamento térmico externo fora dos padrões da normalidade desse motor. A figura 62 a seguir mostra o motor analisado nesse estudo:



Figura 62 - Motor da bomba 62.21.01 - Medição de Fluxo magnético
Fonte: Acervo do autor

7.5.1 TERMOGRAMA DO MOTOR

O termograma é a imagem térmica de um corpo aquecido. Esse, através de cores distintas, consegue expor com fidelidade a temperatura que cada parte se encontra. De posse disso, percebem-se pontos de aquecimento irregular, que não se apresentam em motores com condições normais de funcionamento.

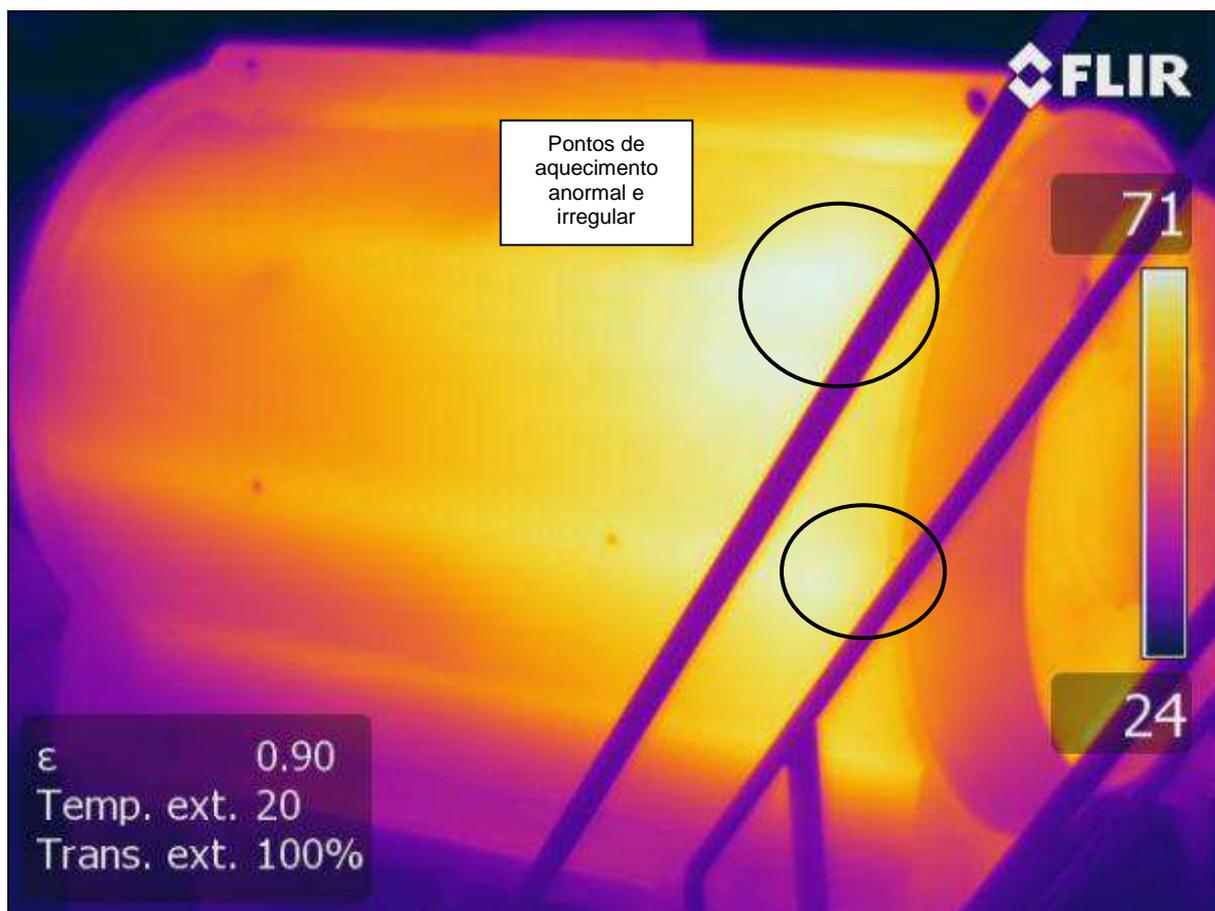


Figura 63 - Termografia da bomba 62.21.01

Fonte: Acervo do autor

A figura 63 mostra pontos de aquecimento manifestados externamente, oriundos dos contatos internos entre rotor e estator, por meio das taliscas elevadas que fornecem correntes de curto e pontos de aquecimento anormais.

8 RESULTADOS

Dentre todos os comparativos realizados nos espectros de baixa e alta frequência, pôde-se detectar que o aspecto de maior discrepância com os espectros de referência se deu nas bandas laterais de $s.fs$ em torno da frequência de rotação dos motores. A análise da condição rotórica não apresentou anormalidades e a inspeção com o motor aberto certificou que não existia nenhum tipo de falha presente no rotor.

Não foram detectados sinais de curto-circuito entre espiras, ou quaisquer outras falhas catalogadas, nem pelas equações que as regem, nem pela inspeção interna. Como a falha ocorrida não é um defeito padrão conhecido e matematicamente equacionado para determinação das frequências determinísticas, mais testes precisam ser realizados para a comprovar que essa manifestação no espectro se deve ao tipo de falha detectada.

Trata-se de um fechamento de circuito e circulação de corrente entre o pacote magnético do estator com o bloco magnético rotórico, via materiais condutores que existem internamente nas taliscas, que se desprenderam e uniram os dois blocos. O que foi detectado como anomalia e que não se fez presente nos demais espectros foram somente as bandas laterais de $s.fs$ em torno da frequência de rotação sendo, portanto, o único indicador de anormalidade para o motor estudado.

Por dedução percebe-se que a característica espectral que se alterou tem boa relação com a característica da falha, pois as bandas laterais de $s.fs$ que referem-se à frequência das correntes induzidas no rotor, se tornando dominantes e modulando sobre a frequência de rotação do rotor que estava em curto-circuito com o estator. Em um motor em condições normais de funcionamento, as únicas correntes que existem no rotor são induzidas neste pelo estator; contudo, no caso do motor falho, além dessa indução ainda existia um curto-circuito, que pode ou não intensificar essas bandas laterais de $s.fs$ em torno da frequência da linha.

9 CONCLUSÃO

Esse trabalho visou comprovar a eficiência da técnica não invasiva de análise de fluxo magnético na detecção de falhas em motores elétricos de média tensão aplicados na indústria. O caso escolhido trouxe como diferencial dessa pesquisa, uma falha não catalogada e sem premissas matemáticas conhecidas. Novos testes e mais estudos precisam ser feitos para a certificar que essa manifestação no espectro se referi a esse tipo de falha. Pode-se realizar a simulação desse defeito provocando essa falha em condições laboratoriais ou continuando no acompanhamento desse tipo de motor, em uma grande escala até que uma falha similar ocorra e as manifestações nos espectros sejam analisadas. Isso pode reforçar essa característica de frequências determinísticas para o referido defeito ou descartar tal manifestação como crítica e indicativa de falha.

O estudo da aplicação da técnica de fluxo magnético ainda está aberto para muitas pesquisas, especialmente de motores de grande porte que possuem características construtivas complexas e estão sujeitos ao surgimento de vários tipos de defeitos ainda não mapeados. A falta de um histórico vasto de amostras do fluxo magnético ao longo de um período considerável de tempo causou a necessidade de busca de outros equipamentos similares para que se fizesse uma comparação entre eles. Tal metodologia não é a mais sensata pois, mesmo motores idênticos demonstraram pequenas diferenças de manifestação eletromagnética. No entanto para um equipamento não monitorado devido à sua criticidade como esse em estudo, o melhor que se pôde fazer foi a comparação com motores equivalentes, rastreamento por anormalidades em toda faixa de frequência amostrada e a abertura desse motor para a certificação da existência de algum tipo de falha.

Também fica como posterior pesquisa, o mapeamento das manifestações de falhas no rotor normatizadas para tipos distintos de carcaças, formando-se assim um tabelamento para análises com fluxo magnético. A técnica de fluxo magnético mostrou-se eficaz. Contudo um mapeamento maior de novas falhas e um tabelamento de valores para progressões de falhas precisa estar bem estabelecido

para que dúvidas não surjam no diagnóstico de uma falha e na recomendação correta para intervenção.

10 REFERÊNCIAS

ALGER, *Induction Machines*. Gordon and Breach Science Publishers, New York, 518 p., 1970.

BRITO, J. N., BACCARINI, L.M. R., PEDERIVA, R. *Análisis de vibración y análisis de corriente, herramientas de mantenimiento predictivo aplicadas en La detección de problemas em motores eléctricos, Actas Del IV Congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Santiago Del Chile, Chile, 1999 .

CSi, *Motor View Software Manual do Software MotorView* - CSI. Computational Systems Incorporated, 1997.

ELKASSABGY, N.M. , EASTHMAN, A. R., *Detection of broken bars in the Cage rotor on induction machine*. IEEE Transaction of industry application, v18 (1), PP 165-170, 1992.

HENAO, H. *et al.*, *Detection of voltage source dissymmetry in an induction motor using the measurements of axial leakage flux*. Proc. ICEM 2000, Helsinki, 2: p. 1110-1114.

JOKSIMOVIC, G. M., PENMAN, J., *The detection of inter-turn short circuits in the stator winding of operating motors*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, p. 1078-1084, October 2000.

KLIMAN, G. B. *et al.*, *Rotor fault detector for induction motors*. US Patent nº. 4 761 703, 1987.

KOKKO, Voitto, *Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors by axial magnetic flux measurements*,. Oulu: University of Oulu, 2003.

LAMIM FILHO, P. C. M., *Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético*. Dissertação (Mestrado), 105 p. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

LAMIM FILHO, P. C. M., BRITO, *Apostila do treinamento de Diagnóstico de falhas em motores elétricos: Análise de corrente e Fluxo Magnético*, Dynamic Services, p. 75, 2010.

LAMIM FILHO, P. C. M., BRITO, J. N., PEDERIVA, R. , *Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético*. III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém – PA, 2004.

MELERO, M.,G., CAPOLINO, G., A.,FERNANDEZ, H., H., SOLARES, J., *The ability of online testes to detect interturn short-circuits in squirrel cage*. Proc. ICEM, Helsink, p. 771-775, 2000.

NANDI, S., TOLIYAT, H. A., *Novel frequency domain based technique to detect incipient stator inter-turn faults in induction machines*, Electric Machines & Power Electronics Laboratory Dep. Of Electrical Engineering, Texas A&M University, 2000.

VAS, P. *Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*. Clarendon Press, Oxford, p. 360, 1993.