

**MARINHA DO BRASIL
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DE MÁQUINAS**

FELIPPE AZEVEDO DE OLIVEIRA

**FALHAS PREMATURAS EM ROLAMENTOS DE
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS ACIONADOS POR
INVERSORES DE FREQUÊNCIA A BORDO DE
EMBARCAÇÕES MERCANTES**

RIO DE JANEIRO

2015

FELIPPE AZEVEDO DE OLIVEIRA

**FALHAS PREMATURAS EM ROLAMENTOS DE
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS ACIONADOS POR
INVERSORES DE FREQUÊNCIA A BORDO DE
EMBARCAÇÕES MERCANTES**

Monografia apresentada como exigência para aprovação no curso de Aperfeiçoamento de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: MSc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

RIO DE JANEIRO

2015

FELIPPE AZEVEDO DE OLIVEIRA

**FALHAS PREMATURAS EM ROLAMENTOS DE
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS ACIONADOS POR
INVERSORES DE FREQUÊNCIA A BORDO DE
EMBARCAÇÕES MERCANTES**

Monografia apresentada como exigência para aprovação no curso de Aperfeiçoamento de Oficiais de Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador: MSc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Data da aprovação: ____/____/____

Orientador: Prof. MSc. Eng. Paulo Roberto Batista Pinto

Assinatura do
orientador

Nota Final: _____

RIO DE JANEIRO

2015

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus mais esta vitória em minha vida por ser minha força e fortaleza em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, familiares, amigos, a empresa que trabalho e mestres.

RESUMO

Este estudo visa analisar as falhas prematuras em rolamentos de motores elétricos trifásicos acionados por inversores de frequência com chaveamento tipo PWM (*Pulse Width Modulation*), suas causas, seu impacto na embarcação e como evitá-las ou preveni-las, mostrar como é possível aumentar a vida útil dos rolamentos, para não ocorrer a paralização de uma embarcação. Os rolamentos são suportes mecânicos de eixos, com a função de permitir que estes realizem os movimentos rotacionais com maior facilidade através da redução da fricção entre as peças móveis de um motor elétrico. As falhas prematuras em rolamentos de motores elétricos trifásicos acionados por inversores de frequência a bordo de embarcações mercantes, na maioria das vezes são causadas pelas descargas elétricas sofridas nestes rolamentos, ocasionando conseqüentemente a paralização da embarcação, este evento vem aumentando com a maior necessidade da utilização destes inversores, podendo deixar uma embarcação inoperante, ocasionando custos elevados a empresa.

Palavras-chave: Rolamento, Motor elétrico trifásico, Falhas, Inversor de frequência, Corrente elétrica, Manutenção, Custo.

ABSTRACT

This study aims to analyze the premature failures in three phase electric motors bearings driven by frequency inverters type PWM (Pulse Width Modulation), its causes, its impact on the vessel and how to avoid them or prevent them, show how you can increase the life useful bearing, not occur stoppage of a vessel. The bearings are mechanical supports axes, with the function to enable them to make rotational movements more easily by reducing the friction between moving parts of an electric motor. Premature failures in three-phase motors driven by bearings frequency inverter on board merchant vessels, most often caused by electrical discharges are sustained in these bearings, thus causing the stoppage of the vessel, this event is increasing with the increasing need of using these inverters. These failures can leave a dead vessel, causing high costs the company.

Keywords: bearings, three-phase electric motor, faults, frequency inverter, electric current, Maintenance Cost.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA PWM	13
2.1	A INFLUÊNCIA DO INVERSOR NO ISOLAMENTO DO MOTOR	15
2.1.1	Comprimento do cabo	15
2.1.2	Rise time	18
2.1.3	Frequência de chaveamento	19
2.1.4	Mínimo tempo entre pulsos consecutivos	19
2.2	TENSÕES DE MODO COMUM	20
2.3	CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR PARA AS CORRENTES CAPACITIVAS DE ALTA FREQUÊNCIA	21
2.4	CORRENTES DE DESCARGAS OU EDM	23
3	DETECÇÃO DE EDM	26
4	MÉTODO PARA EVITAR OU MINIMIZAR A OCORRÊNCIA DE CORRENTE ELÉTRICA	27
5	CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS	29
6	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

LISTA DE FIGURAS

1.1	Estatística de falhas de motores elétricos assíncronos.....	12
2.1	Formas de ondas de corrente e tensão em um inversor PWM	14
2.2	Processo de obtenção da tensão frequências desejadas	14
2.3	Tensão de pico nos terminais do inversor $V_{pico}=560V$	16
2.4	Tensão de pico nos terminais do inversor $V_{pico}=630V$	17
2.5	Tensão de pico nos terminais do inversor $V_{pico}=750V$	17
2.6	Tensão de pico nos terminais do inversor $V_{pico}=990V$	18
2.7	Rise time	18
2.8	Exemplo de pulsos menores que $6\mu s$	20
2.9	Tensão de modo comum	20
2.10	Representação elétrica das capacitâncias parasitas no motor.....	21
2.11	Cratera ocasionada por eletroerosão na pista interna do rolamento.....	22
2.12	Pista de rolamento danificada devido à circulação de corrente elétrica pelo mancal....	22
2.13	Estriamento (fluting) causado pela corrente elétrica no mancal	23
2.14	Partes do rolamento	24
2.15	Simulação da corrente de descarga em rolamentos	25
3.1	TKED1 Detector de descargas elétricas da SKF	26
4.1	Motor sem proteção para os mancais	27
4.2	Motor com proteção para os mancais	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PWM: *Pulse Width Modulation*

AHTS: *Anchor Handling Tug Supply*

FI-FI: *Fire Fighting*

ORE: *Oil Recovery*

MIT: *Motores de indução trifásico*

EASA: *Electrical Apparatus Service Association*

IGBT: *Insulated Gate Bipolar Transisto*

EDM: *Electric Discharge Machining*

1 INTRODUÇÃO

O aumento da prática do uso, nos últimos 15 anos, de inversores de frequência tipo PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso), em navios no Brasil para acionamento de motores elétricos trifásicos, trouxe como consequência o proporcional aumento de falhas imprevistas de rolamentos desses motores, diminuindo a vida útil dos rolamentos. Estes episódios elevaram os custos e demandas de serviços de manutenção relacionados com defeitos e quebras de rolamento nas embarcações mercantes, como nas tipo AHTS (*Anchor Handling Tug Supply*).

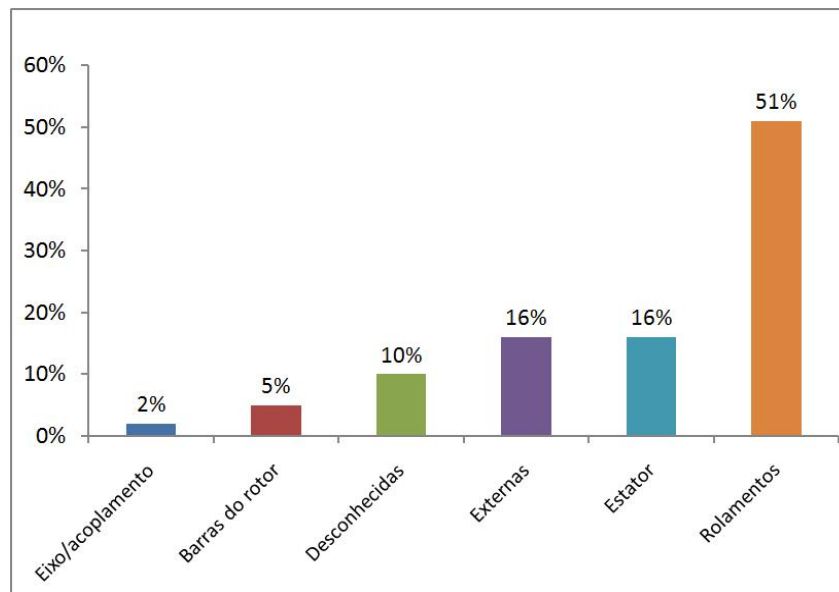
De acordo com Santos e Almeida (2007) esse tipo de embarcação é caracterizada pelo manuseio de âncoras e espias, reboque e suprimento das plataformas, eventualmente fazem o transporte de operários, atuam em resgates, combate à incêndios FI-FI (*Fire Fighting*), recuperação de óleo derramado no mar ORE (*Oil Recovery*) e assistência durante o carregamento de navios aliviadores, além do reboque de objetos ameaçadores (navios, boias, icebergs, etc.), o custo diário de sua paralização é muito grande.

Inversores de frequência são equipamentos utilizados para o controle da velocidade de motores de indução trifásico (MIT). Servem para gerar redução dos custos de manutenção e economia de energia elétrica sem interferir na qualidade final do sistema, diminuindo a quebra dos elementos de transmissão ocasionada pelo esforço adicional dos motores com partida direta.

A graxa é um material isolante e possui uma rigidez dielétrica a qual pode ser rompida, provocando uma corrente de descarga com alta frequência para carcaça aterrada, através do rolamento. Por consequência, a corrente de descarga gera superaquecimento e deteriora as pistas e as esferas dos rolamentos, cujos malefícios são gradativamente acumulados e conduzem à sua invalidação. Falhas em motores de indução geralmente param todo o sistema de acionamento, e para uma embarcação evitar a paralização do sistema é fundamental, pois significa maior índice de disponibilidade de operação, reduzindo custos para os armadores.

Segundo estudo estatístico da EASA (*Electrical Apparatus Service Association*) a respeito de falhas em motores elétricos, 51% destas podem ou estão diretamente relacionadas aos rolamentos. Conforme Araujo (2011) na figura 1.1, elaborada com dados extraídos do estudo EASA (2003), demonstrando ser os rolamentos, dentre um conjunto de falhas, a principal causa de falhas em motores assíncronos.

Figura 1.1: Estatística de falhas de Motores Eléctricos Assíncronos



Fonte: EASA (2003)

Estes motores eléctricos rotativos, em particular os de indução, são elementos primordiais nos processos de uma embarcação e o bom funcionamento dos mesmos é essencial para assegurar a continuidade operacional dos equipamentos e a sua qualidade.

2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA PWM

Em 1957 os laboratórios Bell inventaram os tiristores PNP, desde então, uma grande evolução ocorreu nos dispositivos semicondutores de potência. Com a evolução dos estudos em 1970 os semicondutores tornaram-se disponíveis comercialmente e obtiveram variadas aplicações.

Com isto, a eletrônica de potência avançou e desenvolveram modernos inversores de frequência. Antigamente com tiristores e hoje com transistores, o IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ou “Transistor Bipolar de Porta Isolada”, patenteados pela Toshiba. Os inversores de frequência utilizam conversão CA-C e em CA novamente.

Nos inversores de frequência atuais, a topologia PWM é a mais utilizada.

Os transistores de saída são chaveados pela modulação de largura de pulso onde obtém-se uma forma de tensão corrente alternada sintetizada e de variável frequência e, com isso, pode-se variar a velocidade do motor (FRANCHI, 2008).

Na prática, a modulação da largura de pulso PWM é originada do chaveamento dos transistores, obtendo-se então uma forma de onda de tensão parecida com a senoidal. Desta forma, o inversor de frequência controla a velocidade de um motor CA, e mantém o torque (conjugado) constante a fim de não alterar a rotação do motor quando é solicitado a carga. O inversor deve manter a razão tensão X frequência constante, para que o torque permaneça constante. Ou seja, mudando-se a frequência, deve-se também mudar a tensão, proporcionalmente.

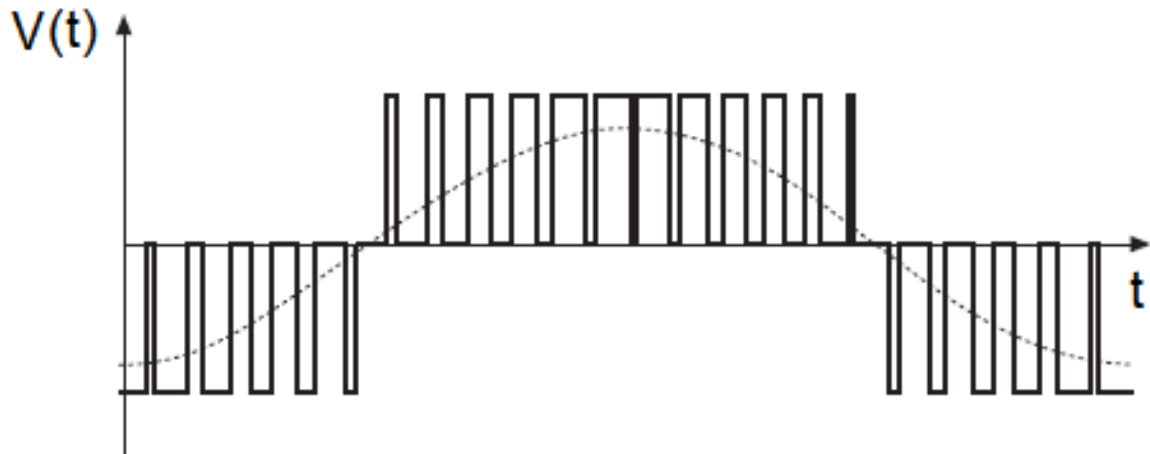
Através da modulação, o inversor altera a tensão proveniente do barramento. A unidade lógica, distribui os pulsos aos IGBT's, e ainda controla o tempo em que cada um permanece ligado.

Quando tal tensão aumenta, os pulsos são “alargados” (maior tempo em ON).

Quando diminui, os pulsos são “estreitados”.

Desta forma, controla-se a tensão eficaz entregue ao motor. A frequência de chaveamento PWM também pode ser parametrizada, e geralmente encontra-se entre 2,5 kHz e 20 kHz.

Figura 2.1 – Formas de Onda de Corrente e Tensão em um Inversor PWM

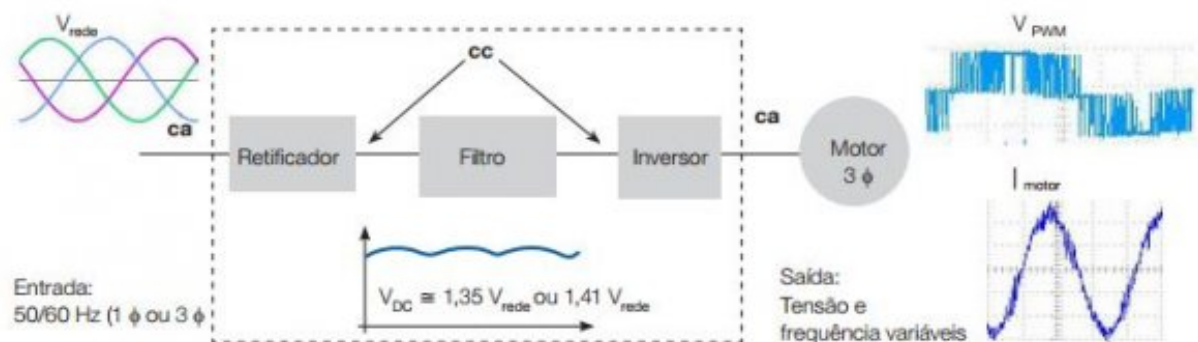


Fonte: SOLAR SMPS 2015

O processo passa por três estágios para a obtenção da tensão e frequência (Figura 2.2):

- 1- Ponte de diodos - Retificação do sinal alternado (tensão e frequência constantes) alimentados pela rede de alimentação;
- 2- Filtro ou Link DC - Regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- 3- Transistores IGBT - Inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

Figura 2.2 - Processo de Obtenção da Tensão e Frequência Desejadas.



Fonte: WEG (2015)

Utilizando-se o IGBT, os tempos de comutação reduziram-se a uma fração de micro segundos, e com isso, aumentou com significancia a frequência de chaveamento. Sendo

assim, os acoplamentos capacitivos existentes em uma estrutura de potência moderna devem ser considerados em função da alta frequência (ARAÚJO, 2011).

Os inversores PWM possuem diversas vantagens: Em plena carga e velocidade pode alcançar uma eficiência superior a 90%; Na velocidade de plena operação do inversor apresenta um bom fator de potência; para evitar sobrecargas provenientes da aceleração de cargas de elevada inércia, o inversor pode adaptar a sua operação; tem a capacidade de ser testado e operado desconectado do motor, etc.

2.1 A INFLUÊNCIA DO INVERSOR NO ISOLAMENTO DO MOTOR

Os altos valores de taxa de variação de tensão no tempo – dv/dt , e as altas frequências de chaveamento, levam a provável incidência de picos de tensão, acentuado pelo comprimento do cabo que interliga o inversor ao motor ocasionando fadiga de repetição e consequente falha no sistema isolante do motor. Com o uso do PWM, devido as suas características de controle e modulação, os pulsos podem gerar repetidamente sobretensões (overshoot) nos terminais do motor. A vida útil do motor é reduzida por esses trens de pulsos, degradando seu sistema de isolamento. Os pulsos retangulares do inversor, excitam o motor e o cabo formando um circuito ressonante. Dependendo dos valores de C, L e R (Capacitância, Impedância e Resistência) , a tensão de pico atinge números acima da tensão da fonte, resulta em uma overshoot, ou seja, um resposta do circuito para essa excitação. Os principais fatores para determinar seu valor são rise time do pulso de tensão, menor tempo entre pulsos, comprimento do cabo e frequência de chaveamento.

As altas frequências produzidas pelo inversor, diminuem as impedâncias capacitivas, através dos rolamentos do motor são criadas correntes pelo caminho existente no eixo para a carcaça e terra.

2.1.1 Comprimento do Cabo

O comprimento do cabo e o rise time são os principais fatores para a ocorrência de picos de tensão nos terminais do motor quando alimentado por um inversor. Pois o comprimento do cabo podemos considerar como uma linha de transmissão, onde as

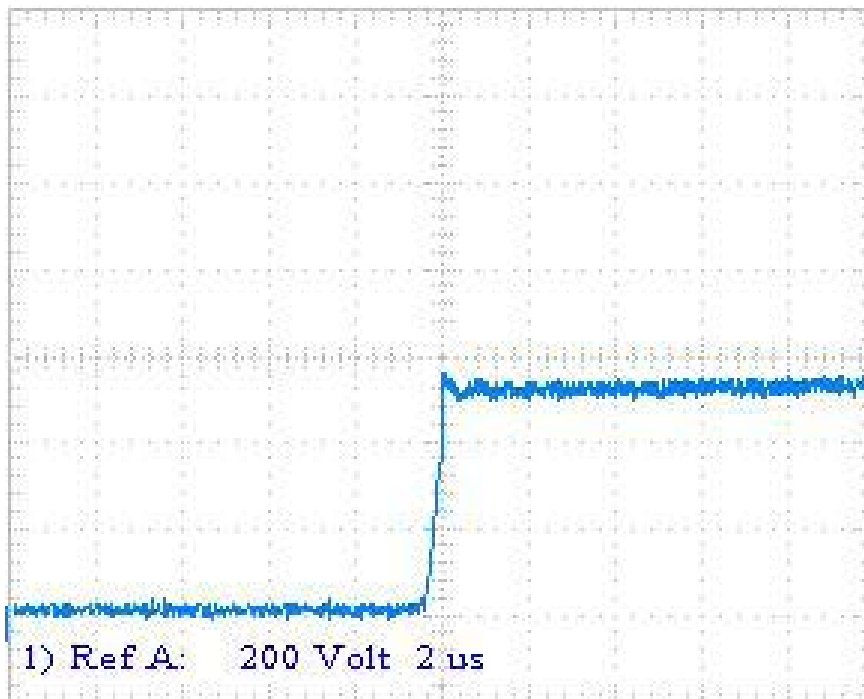
distribuições das impedâncias em secções de indutâncias/capacitâncias interligadas em série/paralelo. O inversor fornece energia ao cabeamento carregando essas capacitância e indutância a cada pulso.

O cabo se comporta como uma linha de transmissão constituído por impedâncias distribuídas.

O sinal através do cabo é parcialmente refletido ao chegar no motor, ocasionando sobretensão, pois na entrada do motor a impedância de alta frequência é maior do que a impedância do cabo. O valor do overshoot nos terminais do motor normalmente aumentam nos comprimentos de cabo elevados. Com os atuais IGBTs os overshoots surgem a partir de 3m de cabo aproximadamente, e podem alcançar o dobro do valor da tensão da fonte para comprimentos de cabo de 15m e valores maiores para comprimentos acima de 120m, segundo NEMA Application Guide for AC ASD Systems. As figuras abaixo demonstram tensões de saída do inversor sem o cabo e nos terminais do motor. Podemos observar que os níveis de overshoot são dependentes do tipo de cabo.

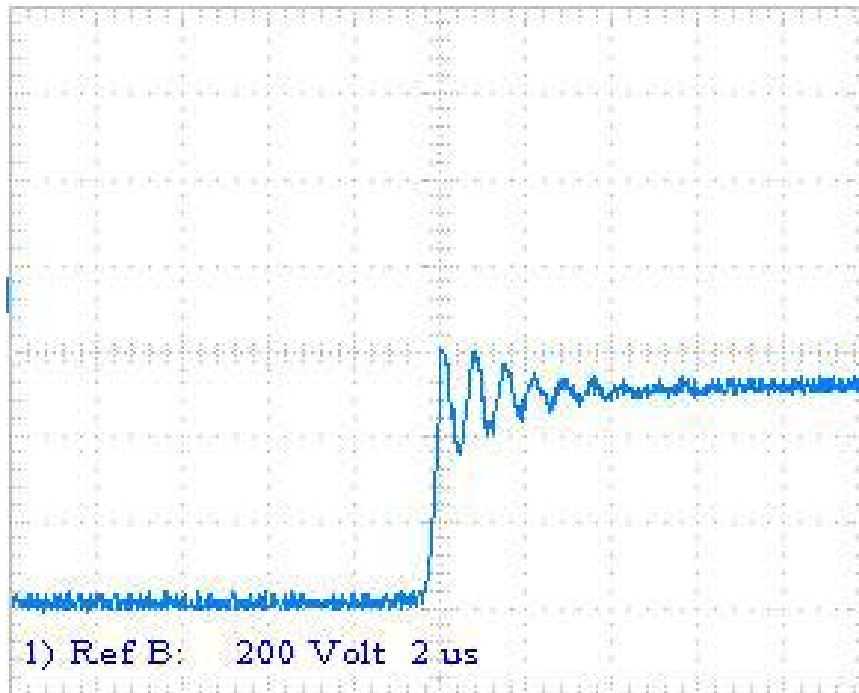
Figura 2.3 - Tensão de Pico nos Terminais do Inversor

$$V_{\text{pico}}=560 \text{ V.}$$



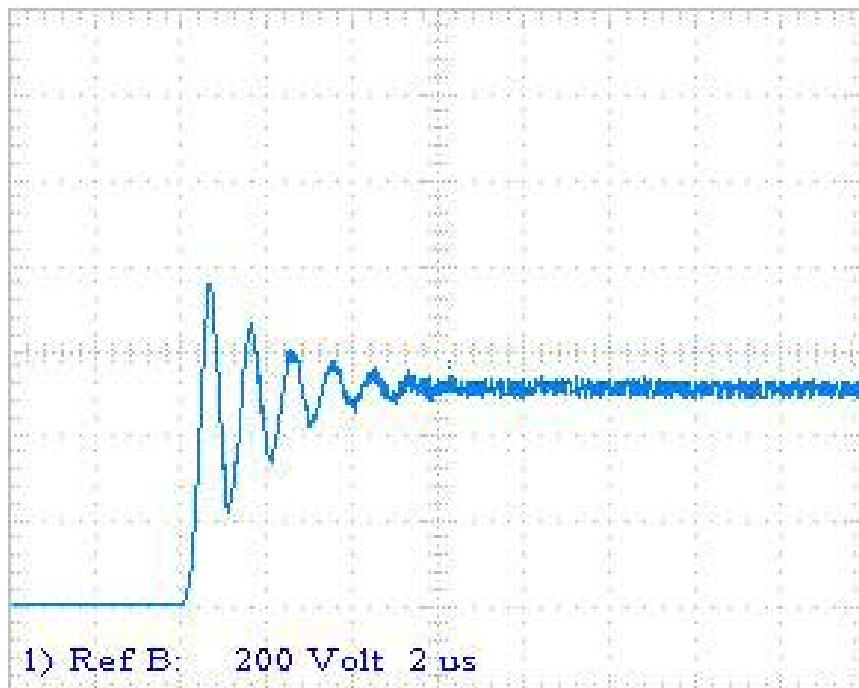
Fonte: WEG (2015)

Figura 2.4 - Tensão de Pico nos Terminais do Inversor
 $V_{pico}=630V$.



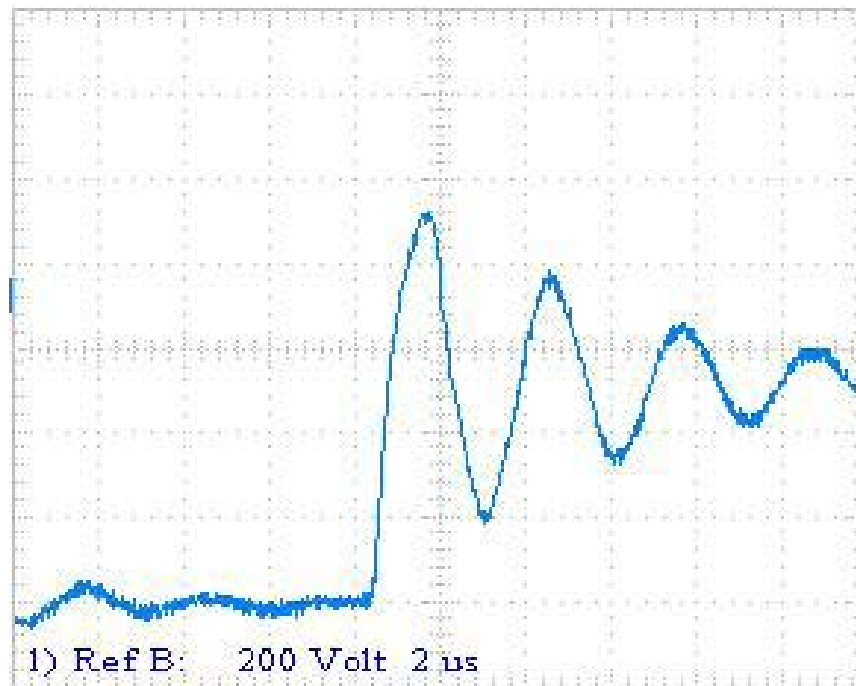
Fonte: WEG (2015)

Figura 2.5 - Tensão de Pico nos Terminais do Inversor
 $V_{pico}=750V$.



Fonte: WEG (2015)

Figura 2.6 - Tensão de Pico nos Terminais do Inversor
 $V_{pico}=990V$.

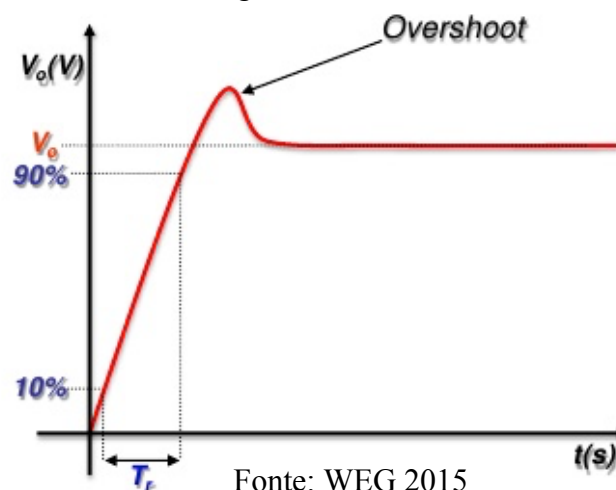


Fonte: WEG (2015)

2.1.2 Rise Time

Rise time ou "tempo de subida" é o tempo gasto que a tensão PWM para variar o seu valor de 10% até 90%. Devido à grande velocidade de chaveamento, que acontece na ordem de $0,3\mu s$, tem-se o crescimento da onda de tensão extremamente rápido e com o avanço da eletrônica de potência, os tempos dessa transição tendem a diminuir.

Figura 2.7: Rise Time



Fonte: WEG 2015

2.1.3 Frequência de Chaveamento

A frequência de chaveamento é uma derivação do rise time, e também do menor tempo entre pulsos consecutivos. A série de Fourier da tensão fornecida para o motor é melhorada com o aumento da frequência de chaveamento, aperfeiçoando seu desempenho em temperatura e ruído paralelamente em que a corrente aproxima-se de uma perfeita senóide. No entanto, quanto maior ela for, mais acelerada será a degradação do sistema isolante. De acordo com a WEG, estudos indicam que não é uma relação simples entre a dependência do tempo de vida útil do isolamento e a função da frequência de chaveamento, entretanto, a prática mostra dados diferentes: para frequências de chaveamento ≤ 5 kHz, a falha no isolamento é diretamente proporcional a mesma, frequências de chaveamento > 5 kHz a falha no isolamento é diretamente proporcional ao quadrado da mesma.

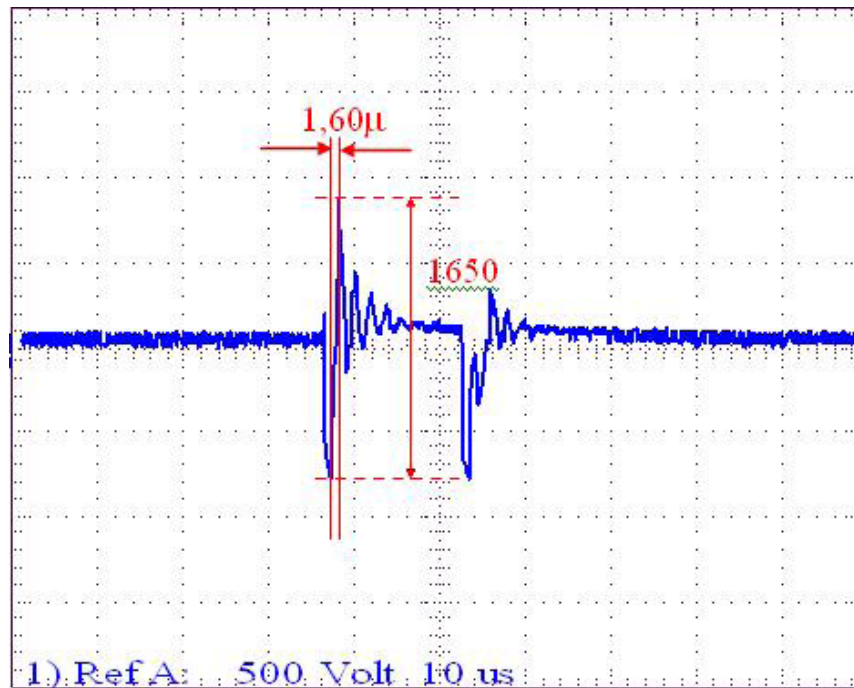
2.1.4 Mínimo Tempo entre Pulsos Consecutivos

A tensão que aparece entre as espiras varia pelo fato de uma sucessão de picos em forma de ondas fornecidas pelo inversor do motor varia em tempo e amplitude. Essa tensão depende das características do enrolamento do motor e do tempo entre pulsos que a formam. Essa tensão média quando aplicada sobre o motor é controlada pela largura dos pulsos e pelo tempo entre eles. Quando o tempo entre os pulsos é mínimo, o overshoot se torna pior. Isso acontece quando eleva-se as tensões na saída e durante regimes transitórios, como aceleração e desaceleração do motor. Quando o tempo entre pulsos for mais baixo que 3 vezes o período ressonante do cabo (0,2 a $2\mu\text{s}$ para cabos industriais), aumentará o overshoot. A forma de saber se essa condição existe é medindo os pulsos diretamente ou contatando o fabricante do inversor.

De acordo com manual WEG, quando o tempo entre pulsos consecutivos for menor do que $6\mu\text{s}$, pode-se assumir que a diferença de potencial entre espiras, principalmente quando a 1ª e a última espira de um enrolamento randômico estiverem lado a lado, é o valor pico a pico entre pulsos. O fato ocorre devido à rapidez de propagação do pulso, pois enquanto na 1ª espira o valor de tensão é o valor pico a pico, na última espira a tensão é muito baixa, provavelmente, zero.

Abaixo na figura 2.4 é mostrado um exemplo de tempo entre pulsos consecutivos menores do que $6\mu\text{s}$, em que efetivamente ocorreram queimas de motores por curto entre espiras.

Figura 2.8: Exemplo de Pulsos Menores que $6\mu\text{s}$

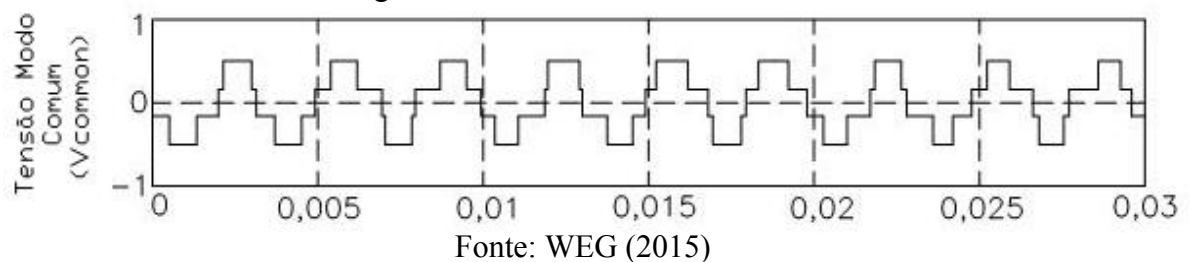


Fonte: WEG (2015)

2.2 TENSÕES DE MODO COMUM

Segundo manual WEG 2015, a tensão PWM trifásica de saída de um inversor eletrônico de frequência, diferentemente da tensão trifásica senoidal, não é equilibrada, ou seja, em função da topologia do estágio inversor, a soma vetorial instantânea das tensões nas três fases não é igual a zero, mas igual a um potencial elétrico de alta frequência relativo a um ponto comum de referência, usualmente o terra ou o barramento negativo do link DC, daí a denominação modo comum.

Figura 2.9: Tensão de modo Comum



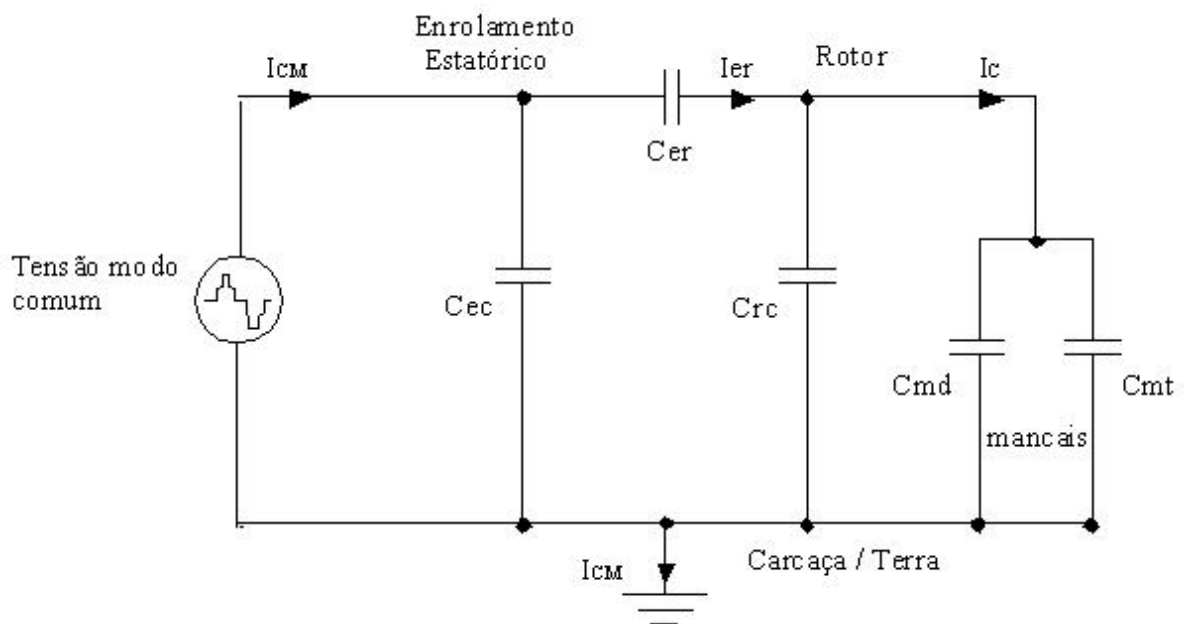
Fonte: WEG (2015)

Correntes de modo comum indesejadas podem resultar dessa tensão modo comum de alta frequência e, havendo capacitâncias parasitas do motor para a terra, a corrente tenderá a fluir para a terra através dessas capacitâncias parasitas, atravessando rotor, eixo e mancal para a tampa aterrada, aquecendo o rolamento e diminuindo sua vida útil.

2.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR PARA AS CORRENTES CAPACITIVAS DE ALTA FREQUÊNCIA

Os caminhos por onde é percorrido pelas correntes de modo comum podemos observar em um modelo do circuito equivalente do motor para frequências elevadas, onde são representados por capacitância os rolamentos. O rotor é suportado pelos rolamentos, onde existe um filme de graxa não-condutivo. Não há contato da pista externa do rolamento e o rotor quando temos velocidades elevadas devido à distribuição plana do filme de graxa. Em relação a terra, o potencial do rotor pode aumentar até atingir um nível com capacidade de romper o filme da graxa, ocorrendo isso se tem o faiscamento e a corrente da descarga passa através dos rolamentos. Quando o filme de graxa é rompido no momento, a corrente circula, isso se denomina “componente de descarga capacitiva”. Temos também a “corrente de condução”, que é a corrente circulante permanente pela espira.

Figura 2.10: Representação Elétrica das Capacitâncias Parasitas no Motor.



Fonte: WEG (2005)

C_{er} : capacitor formado entre o enrolamento estatórico e as chapas do rotor. (Dielétrico = entreferro+isolante de ranhura+isolamento dos fios)

C_{rc} : capacitor formado entre as chapas do rotor e do estator. (Dielétrico = entreferro)

C_{ec} : capacitor formado entre enrolamento estatórico e carcaça. (Dielétrico = isolamento de ranhura + o isolamento dos fios)

C_{md} e C_{mt} : capacitâncias dos mancais dianteiro e traseiro, formadas pelas pistas de rolagem dos anéis internos e externos, tendo as esferas (ou rolos) metálicas no interior. (Dielétrico = espaços entre as pistas de rolagem e as esferas + graxa do rolamento)

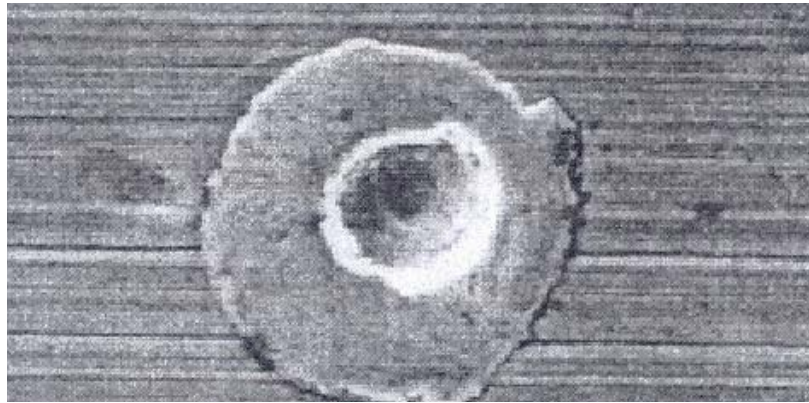
ICM : corrente total de modo comum:

I_{er} : corrente de descarga capacitiva do estator para o rotor

I_c : corrente de descarga capacitiva pelos mancais.

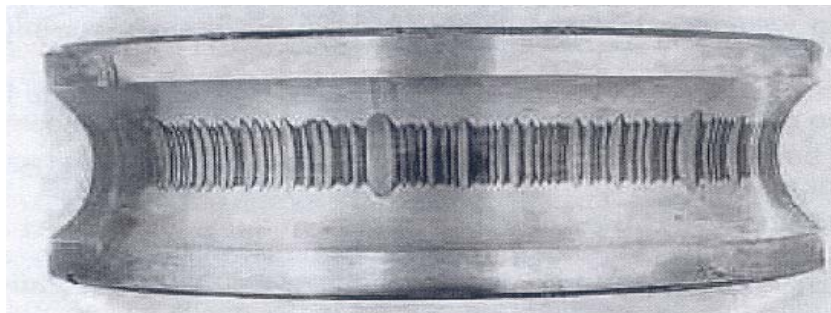
Essas descargas desgastam as esferas e a pista do rolamento, dando origem a pequenos furos, que começam a se sobrepor e, caso haja correntes de descarga por longo tempo, sulcos (crateras) serão formados. A erosão acarreta redução da vida útil dos rolamentos e pode provocar falha da máquina.

Figura 2.11: Cratera ocasionada por eletroerosão na pista interna do rolamento.



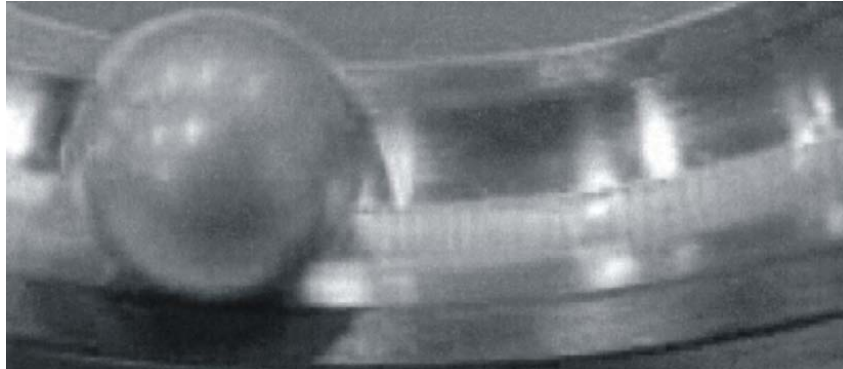
Fonte: SKF (2015)

Figura 2.12: Pista de rolamento danificada devido à circulação de corrente elétrica pelo mancal.



Fonte: SKF (2015)

Figura 2.13: Estriamento (fluting) causado pela corrente elétrica no mancal

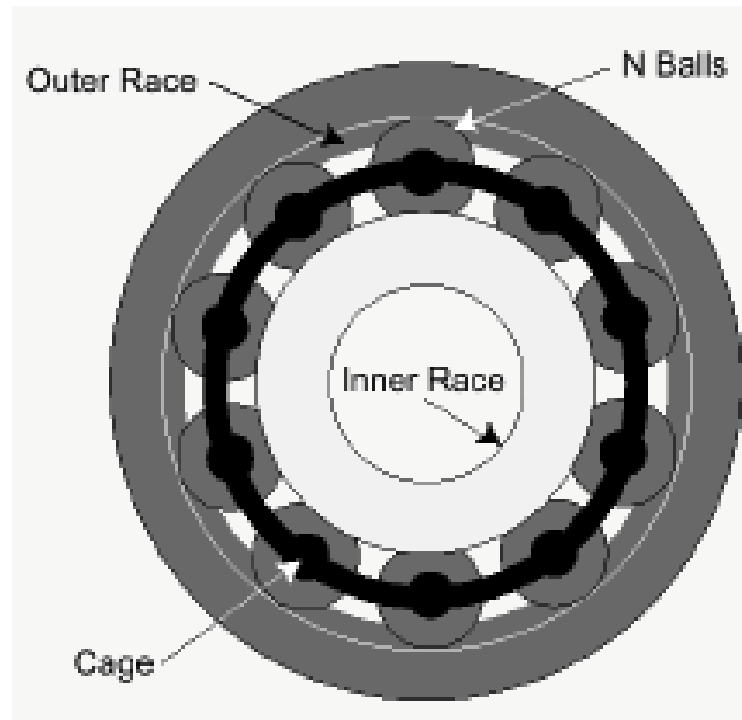


Fonte: SKF (2015)

2.4 CORRENTES DE DESCARGA OU EDM

Constantemente quando um rolamento gira em alta velocidade, ocorrem as EDM's. A capacitância do rolamento diminui e aumenta o nível de tensão acumulado no eixo, a medida que a velocidade aumenta, visivelmente a partir de 90RPM, onde torna-se simétrica a linha de centro do eixo (ALMEIDA, 2011). Uma camada de aproximadamente 2 a 3 microns se forma, como uma película lubrificante, onde as esferas dos rolamentos e dos anéis flutuam (ARAÚJO, 2011). Desta maneira, os mancais agem como um circuito aberto, ou de alta impedância. Por outro lado, se existir contato entre as esferas ou anéis, ou se com a presença de campos elétricos em função da tensão do eixo levar a uma falha na lubrificação, o mesmo pode vir a apresentar baixa impedância.

Figura2.14: Partes do rolamento



Fonte: MIT (2015)

As EDMs são produzidas pelo acúmulo de correntes no capacitor de acoplamento que forma-se através estator e rotor CSR, período em que os rolamentos agem como um circuito aberto. Isso forma uma tensão no eixo por meio de indução eletrostática (o condutor se eletriza pela simples proximidade a outro já eletrizado). Essa tensão, quando alcança um certo nível, força a película de graxa das esferas do rolamento ao rompimento dielétrico, formando um caminho súbito de curto-circuito, originando uma corrente de descarga, que vai para o terra descarregada através do rolamento.

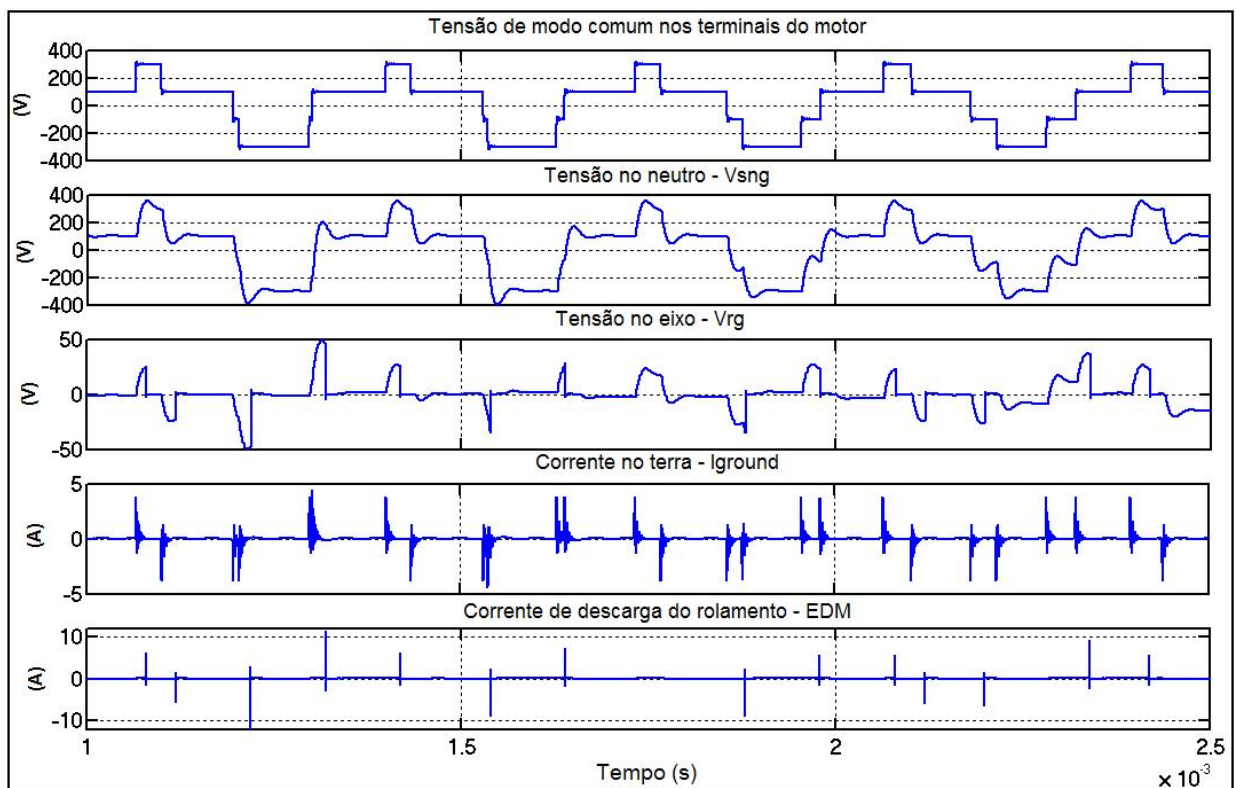
Esses picos de corrente geralmente aparecem após a tensão no eixo estar presente por um breve período de tempo e a presença desta, indica um estado de alta impedância do rolamento. Ao ocorrer um pico de corrente, a tensão do eixo cai para zero. Isto quer dizer que acontece um repentino curto-circuito no interior do rolamento (ARAÚJO, 2011). O valor da tensão de parada V_{th} pode oscilar de 5 até 30V, de acordo com o funcionamento do motor (ALMEIDA, 2011). Dois fatores de operação podem aumentar a amplitude da EDM, a temperatura do rolamento e a velocidade do motor (MUETZE, 2003).

Por causa da queda da força centrípeta, o filme lubrificante é diminuído, ocasionando contatos quase-metálicos entre esferas e pistas, isso reduz a ocorrência de EDM em velocidades baixas. Assim eleva-se a capacitância dos rolamentos e a queda da tensão de eixo,

não excedendo o valor de parada dielétrica V_{th} . Sendo assim, ainda que aconteça uma corrente de descarga, o estrago do rolamento não será tão grande, por causa da pequena amplitude da corrente (ALMEIDA, 2011).

Estudos de ARAÚJO (2011) revelam que as EDM não acontecem obrigatoriamente ao mesmo tempo das bordas dos pulsos de tensão de modo comum V_{cm} , sendo relacionada, simplesmente, ao período de maior amplitude da tensão, bem como ao nível de carregamento do eixo, como pode ser observado na figura 2.15.

Figura 2.15: Simulação da Corrente de Descarga em Rolamentos.



Fonte: ARAÚJO (2011)

3 DETECÇÃO DE EDM

Uma manutenção preventiva pode evitar que os rolamentos dos motores elétricos, possam ser prejudicados, após alguns meses de funcionamento, pela erosão elétrica.

Por questões de custo, as empresas costumam realizar análises de vibração e tratar as falhas de rolamento como origem mecânica. Como consequência, é feita a substituição desnecessária de componentes e a convivência com defeitos frequentes (ARAÚJO, 2011). É essencial conhecimento técnico específico para coletar e analisar o espectro, afinal realizando-se a análise de vibração, a erosão elétrica no rolamento só é aparente em grau avançado.

A tensão pode ser medida, através de uma sonda especial, ligando o osciloscópio, corretamente parametrizado, ao eixo do motor. A utilização do osciloscópio e o fino ajuste que este requer, tem a necessidade de conhecimento técnico específico de instrumentação, além de caro e pouco prático para ser utilizado em campo. Ainda assim, em motores que não possuem o eixo livre não é possível usar de sua função.

A caneta de descargas elétricas TKED1, da empresa SKF, vem ajudando a detectar ocorrências de descargas elétricas inicialmente, não deixando que os estragos nos rolamentos se agravem. Ela conta todas as alterações de mudanças do campo magnético no local, com a ajuda de uma antena magnética loop. Com este equipamento obtém-se um baixo custo por não haver contato físico nem necessidade de conhecimento técnico específico.

Figura 3.1: TKED1 Detector de Descargas Elétricas da SKF

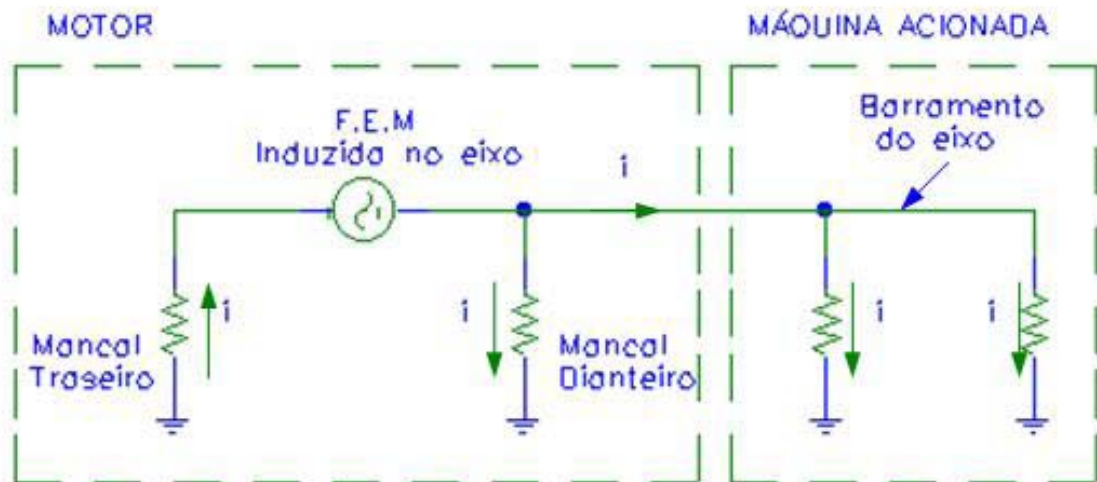


Fonte: SKF (2015)

4 MÉTODOS PARA EVITAR OU MINIMIZAR A OCORRÊNCIA DE CORRENTE ELÉTRICA

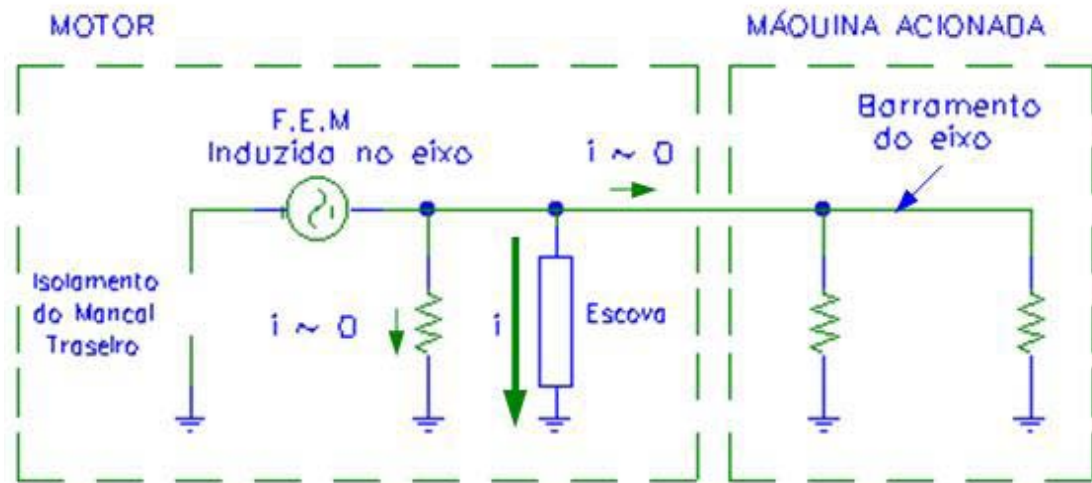
Deve-se impedir a circulação de corrente através dos mancais levando-se em conta as componentes de condução (induzidas no eixo) e as componentes de descarga capacitiva (resultantes da tensão modo comum). Para eliminar as correntes circulantes na espira característica basta isolar os mancais do motor. Para eliminar as componentes de origem capacitiva, porém, seria necessário isolar também os mancais da máquina acionada, para evitar a migração de cargas elétricas do motor para o rotor da máquina acionada através dos eixos eletricamente ligados nos casos de acoplamentos não-isolados. Outro meio de eliminar a componente de origem capacitiva consiste em curto-circuitar o rotor e a carcaça do motor com escova deslizante de grafite. Assim a circulação da componente indutiva na espira característica é eliminada isolando-se apenas um dos mancais do motor, enquanto a componente capacitiva e a transferência das cargas capacitivas do motor para a máquina acionada são eliminadas pelo curto-circuitamento através da escova.

Figura 4.1: Motor sem proteção para os mancais



Fonte: WEG (2015)

Figura 4.2: Motor com proteção para os mancais



Fonte: WEG (2015)

5 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS

Considerações normativas sobre as correntes que circulam pelos mancais dos motores acionados por inversores de frequência segundo manual WEG (2015):

NEMA MG1 Part 31 – com alimentação senoidal (rede), a presença de tensão no eixo /corrente nos mancais ocorre geralmente em motores da carcaça 500 e maiores. No entanto, em aplicações com inversores de frequência as correntes pelos mancais têm ocorrido ocasionalmente em motores de carcaças menores. A interrupção dessas correntes requer o isolamento de ambos os rolamentos. Alternativamente, escovas de aterramento no eixo podem ser usadas para desviar a corrente sobre os rolamentos. Deve ser observado que o isolamento dos rolamentos não irá prevenir danos do equipamento conectado ao eixo do motor.

NEMA Application Guide for AC ASD Systems – as componentes de corrente pelos mancais devido à tensão de modo comum (alimentação com inversor) podem causar problemas em motores com tamanhos de carcaça menores que a carcaça 500 (provavelmente nas carcaças 400 e maiores). A solução para o problema é mancal isolado e/ou escova de aterramento no eixo.

IEC 60034-17 – para carcaças acima da 315 recomenda-se usar na saída do inversor filtro para redução da componente de sequência zero das tensões de modo comum de fase, reduzir o dV/dt ou isolar o(s) rolamento(s). A necessidade de isolamento de ambos os rolamentos é rara. No caso da análise de todo o sistema de acionamento (inversor + motor + máquina acionada) isolar o acoplamento entre o motor e a máquina acionada. O sistema de aterramento normalmente utiliza escovas de aterramento.

IEC 60034-25 – não especifica uma carcaça a partir da qual seria necessário proteger os mancais. No item que aborda os efeitos de assimetria magnética dos motores, como causa de tensão no eixo e corrente pelos mancais, é citado que as correntes pelos mancais ocorrem mais comumente em motores maiores que 400 kW. Para as outras causas, não são citados os tamanhos de carcaça. O tipo de solução para evitar as correntes pelos mancais, apresentado neste documento, depende da componente de corrente que se queira evitar. As soluções alternam-se entre mancais isolados e/ou escova de aterramento no eixo.

CSA 22.2 No100 Item 12 – escovas de aterramento no eixo deverão ser utilizadas em motores com carcaças maiores do que a IEC 280 (NEMA 440).

Gambica/REMA Technical Guide – para motores de carcaças menores do que a IEC 280 os efeitos da corrente pelos mancais são mínimos. Nestes casos, nenhum tipo de proteção

é necessário. Para motores com carcaças maiores do que a IEC 280, os efeitos das correntes pelos mancais já são significativos e certas proteções são necessárias: motor com mancal traseiro isolado e aterramento do eixo, evitando curto-circuitar o lado do mancal/rolamento isolado.

6 CONCLUSÃO

De acordo com presente trabalho e baseado em minha experiência de campo em embarcações tipo AHTS. Este tipo de embarcação é cada vez mais utilizada devido ao avanço para exploração de petróleo em águas profundas, pois requer uma maior potência, guinchos especiais, sarilhos com maior capacidade de armazenamento e sistema de posicionamento dinâmico. Diante disto, as empresas offshore estão construindo tais embarcações para suprir esta necessidade. Com o investimento na qualificação do material humano, e nos equipamentos cada vez mais modernos, vem se tornando mais necessário o uso de motores elétricos trifásicos acionados por inversores de frequência tipo PWM, e com essa prática aumenta a ocorrência de falhas prematuras em seus respectivos rolamentos.

Sendo assim conclui-se que é mais viável e econômico a prevenção de monitoramento para impedir as correntes de descargas dos inversores tipo PWM nos rolamentos, podendo ser utilizado como uma das opções mais baratas, o instrumento de detector de descargas elétricas da SKF modelo TKED1, pois este equipamento obtém-se um baixo custo por não haver contato físico nem a necessidade de conhecimento técnico específico.

Não ocorrendo o monitoramento preventivo para eliminação dessas correntes de descargas em uma embarcação tipo AHTS, com a quebra de um desses motores elétricos trifásicos, pode causar uma parada de operação e ocasionar multas contratuais com o cliente Petrobrás e outros, cujo o custo da sua diária deste tipo de embarcação pode alcançar a casa de US\$ 100.000,00. Uma sucessão desses erros levará a falência da empresa contratada, o que deve e pode ser evitado com a correta manutenção, conforme sugerido nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Engenharia Naval e Oceânica – COOPE/Politécnica/UFRJ. **AHTS - Anchor Handling and Tug Supply**. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/Fabio2X/relat1/Principal.htm> Acesso em: 01 maio de 2015.

EASA (2003). **The effect of repair/rewinding on motor efficiency. Technical report, Electrical Apparatus Service Association – EASA.**

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2008.

HARRIS, T. A. Friction and wear of rolling-element bearings. **In: ASM Handbook, 18: Friction, lubrication, and wear technology**. Ohio, 1992. v.18 p.499-514

WEG Motores. **Manual Motores Elétricos Guia de Instalação**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>> Acesso em: 01 maio de 2015.

_____. Automação. **Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM**. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>> Acesso em: 01 maio de 2015.

_____. **Apostila do mini-curso Motores de Indução de Gaiola Alimentados por Inversores de Frequência** – Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto – Motores.

_____. **Relatórios Técnicos do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto** – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Motores.

_____. **Notas Técnicas do Departamento de Desenvolvimento de Produtos** – WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Automação.

SKF. **Ciclo de Vida dos Rolamentos da SKF**. Disponível em: <<http://www.skf.com/br/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/selection-of-bearing-size/selecting-bearing-size-using-the-life-equations/life-calculation-with-variable-operating-conditions/index.html>>. Acesso em: 01 maio de 2015.

_____. **Tabela de Possíveis Falhas de Rolamentos**. Disponível em: <<http://www.rolimao.com.br/manutencao/Tabela-de-Possiveis-Falhas-SKF.pdf>>. Acesso em: 01 maio de 2015.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em Administração**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1998.

NEMA MG1 Part 30 - **Application considerations for constant speed motors used on a sinusoidal bus with harmonic content and general purpose motors used with adjustable-frequency controls or both** (2006).

_____ **MG1 Part 31 - Definite-purpose inverter-fed polyphase motor** (2006).

_____ - **Application Guide for AC Adjustable Speed Drive Systems** (2001).

IEC 60034-17 - **Cage induction motors when fed from converters** – application guide (2006).

_____ 60034-25 - **Guide for the design and performance of cage induction motors specifically designed for converter supply** (2007).

GAMBICA/REMA Technical Guides for Variable Speed Drives and Motors.

_____ **Technical Reports for Variable Speed Drives and Motors.**

PCIC - Minimização de Perdas em Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência – Solução Fluxo Ótimo – Waldiberto L. Pires e Hugo G. G. Mello – PCIC BR 2006.

IEEE - Low-Voltage PWM Inverter-Fed Motor Insulation Issues – Michael J. Melfi – IEEE Transactions on Industry Applications, vol.42.