



**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ÉDER APARECIDO PARIGI FILHO**

**SUPRESSÃO DE CORRENTE PARASITA EM ROLAMENTOS DE MOTOR**  
***BRUSHLESS DC* ACIONADO POR INVERSOR *PWM***

**BAURU**  
**2022**

**ÉDER APARECIDO PARIGI FILHO**

**SUPRESSÃO DE CORRENTE PARASITA EM ROLAMENTOS DE MOTOR  
*BRUSHLESS DC* ACIONADO POR INVERSOR *PWM***

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson  
Coorientador: Prof. Dr. Rudolf Ribeiro Riehl

**BAURU  
2022**

P231s Parigi Filho, Éder Aparecido  
Supressão de corrente parasita em rolamentos de motor Brushless  
DC acionado por inversor PWM / Éder Aparecido Parigi Filho. --  
Bauru, 2022  
48 f. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Engenharia, Bauru  
Orientador: Dr. José Alfredo Covolan Ulson  
Coorientador: Dr. Rudolf Ribeiro Riehl

1. Supressão de corrente parasita. 2. Motor Brushless DC. 3.  
Corrente de rolamento. 4. Inversor PWM. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de  
Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE ÉDER APARECIDO PARIGI FILHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 04 dias do mês de maio do ano de 2022, às 10:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ÉDER APARECIDO PARIGI FILHO, intitulada **SUPRESSÃO DE CORRENTE PARASITA EM ROLAMENTOS DE MOTOR BRUSHLESS DC ALIMENTADO POR INVERSOR PWM**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. GUILHERME AUGUSTO MARABEZZI CLERICE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos- UNIFIO, Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON



Dedico este trabalho com muito carinho aos meus pais e professores que fizeram parte desta etapa tão importante em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço sempre a Deus em primeiro lugar, por me permitir realizar o sonho de cursar mestrado com saúde e persistência, não me deixando desanimar nas dificuldades.

Agradeço aos Professores Dr. José Alfredo Covolan Ulson e Dr. Rudolf Ribeiro Riehl, pela oportunidade de trabalharmos juntos, me orientando com excelência em toda etapa do meu trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido para realização deste trabalho.

"A satisfação psicológica é uma espécie de energia. Eu sou movido a entusiasmo".

João Gurgel

## RESUMO

O acionamento e controle de um motor de corrente contínua sem escovas (*Brushless DC motor*), é realizado por meio da utilização de um inversor de frequência com modulação por largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*). Devido à alta frequência de chaveamento deste inversor, capacitâncias parasitas são estabelecidas ao longo do motor permitindo a circulação de correntes parasitas. Estas correntes ao circularem pelos rolamentos do motor podem causar erosão eletrostática nas pistas dos rolamentos, gerando vibrações indesejadas e reduzindo substancialmente a vida útil dos mesmos. O objetivo deste trabalho foi o estudo de abordagens para a mitigação destas correntes parasitas em motores *Brushless*, comumente designados de motores BLDC. Mais especificamente, a partir do estudo das abordagens para a mitigação disponíveis na literatura, bem como o estudo e ensaio de um motor *Brushless* de pequena potência (1,01 cv), abordagens para a mitigação das correntes parasitas foram estudadas levando em consideração suas vantagens e desvantagens num cenário industrial. Utilizando uma ponte *RLC* e ensaios em laboratório, as capacitâncias parasitas foram medidas. Buscando valores comparativos, as capacitâncias também foram determinadas usando equações eletromagnéticas a partir das dimensões mecânicas do motor BLDC. De posse das capacitâncias parasitas e da tensão de eixo medida, especificou-se uma nova capacitância interna de forma a estabelecer uma alta reatância entre o eixo e carcaça do rotor reduzindo substancialmente as amplitudes das correntes parasitas de modo comum nos rolamentos do motor. São apresentados resultados de simulações utilizando as capacitâncias medidas, com e sem a introdução desta nova capacitância entre o eixo e a carcaça do motor. Por meio do comportamento da tensão de eixo e corrente nos rolamentos, mostra-se que há a mitigação desta corrente parasita. Conclui-se que tal abordagem apresenta as seguintes contribuições: mitiga a corrente de descarga nos rolamentos de motores *Brushless* com eficiência; contribui de forma direta para o aumento da vida útil dos motores em estudo; dispensa o uso de abordagens que apresentam a necessidade de manutenção periódica como, por exemplo, as escovas no eixo e/ou graxas condutivas nos rolamentos. Como desvantagem dessa abordagem cita-se o aumento de uma etapa no processo de produção do motor.

**Palavras – chave:** Supressão de Corrente Parasita. Motor *Brushless DC*. Corrente de Rolamento. Inversor *PWM*.

## SUMMARY

The drive and control of a brushless direct current motor is performed using a frequency inverter with pulse width modulation (PWM). Due to the high switching frequency of this inverter, parasitic capacitances are established along the motor allowing eddy currents to circulate. These currents, when circulating through the motor bearings, can cause electrostatic erosion in the bearing runway, generating unwanted vibrations and substantially reducing their useful life. The objective of this work was the study of approaches for the mitigation of these eddy currents in Brushless motors, commonly called BLDC motors. More specifically, from the study and testing of a small power Brushless motor (1.01 cv), approaches to the mitigation of eddy currents were evaluated taking into account their advantages and disadvantages in an industrial setting. Using an RLC bridge and laboratory tests, stray capacitances were measured. Looking for comparative values, the capacitances were also determined using electromagnetic equations from the mechanical dimensions of the BLDC motor. In possession of the eddy capacitances and the measured shaft voltage, a new internal capacitance was achieved in order to establish a high reactance between the shaft and the rotor frame, substantially reducing the amplitudes of the common mode eddy currents in the motor bearings. Simulation results are presented using the measured capacitances, with and without the introduction of this new capacitance between the shaft and the motor frame. Through the behavior of the shaft voltage and current in the bearings, it is shown that this eddy current is mitigated. It is concluded that such an approach presents the following contributions: it mitigates the discharge current in Brushless motor bearings efficiently; contributes directly to increasing the useful life of the engines under study; eliminates the use of approaches that require periodic maintenance, such as brushes on the shaft and/or conductive greases on the bearings. As a disadvantage of this approach, the increase of one step in the engine production process can be cited.

**Keywords:** Eddy Current Suppression. Brushless DC Motor. Bearing Current. PWM Inverter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Rolamento do motor com erosão eletrostática (estrias) causada pela corrente parasita de modo comum.....	16
Figura 2.1- Circuito equivalente de alta frequência de um motor de indução.....	19
Figura 2.2 - Circuito equivalente de alta frequência simplificado de um motor de indução....	20
Figura 2.3- Correntes circulantes no motor.....	20
Figura 2.4 - Circuito equivalente de alta frequência de um servo motor <i>BLDC</i> .....	21
Figura 2.5- Estrutura do motor com suas capacitâncias.....	21
Figura 2.6- Ponte inversora de tensão trifásica.....	22
Figura 2.7- Circuito divisor de tensão capacitivo do motor de indução.....	23
Figura 2.8- Circuito divisor de tensão do motor de indução.....	24
Figura 2.9 - Circuito elétrico simplificado do rolamento de um motor.....	25
Figura 2.10 - Detalhe das malhas A, B e C por onde fluem as correntes circulantes de condução.....	26
Figura 2.11- Queimaduras superficiais na pista interna do rolamento causada pela corrente de descarga.....	27
Figura 3.1 - Vista explodida do motor <i>BLDC</i> modelo GK6040.....	30
Figura 3.2 - Rotor do motor com os rolamentos 6903RZ e 6004RZ com buchas de <i>Nylon</i> e condutores de cobre esmaltados ligados à pista externa dos rolamentos.....	31
Figura 3.3 - Bancada de ensaios, com motor <i>Brushless</i> , inversor <i>PWM</i> , osciloscópio e multímetro.....	32
Figura 3.4 - Circuito equivalente de alta frequência para o servomotor <i>BLDC</i> modelo GK6040.....	34
Figura 3.5 - Circuito equivalente com Isolante.....	35
Figura 4.1 - Circuito equivalente de alta frequência para o motor <i>BLDC</i> modelo GK6040.....	37
Figura 4.2 - Tensão de eixo com o interruptor aberto ( $V_{rms}$ : 580 mV e $V_{pp}$ : 2,2 V).....	38
Figura 4.3 - Simulação da tensão (mV) de eixo com o interruptor aberto em função do tempo (ms).....	38
Figura 4.4 - Tensão de eixo com o interruptor fechado ( $V_{rms}$ : 328 mV e $V_{pp}$ : 1,30 V).....	39
Figura 4.5 - Simulação da tensão (mV) de eixo com o interruptor fechado em função do	

tempo (ms).....	39
Figura 4.6 - Canal 1 (amarelo): Corrente circulante pelos rolamentos; Canal 2 (azul): Tensão de modo comum no eixo.....	40
Figura 4.7 - Simulação da corrente (mA) pelos rolamentos em função do tempo (ms).....	40
Figura 4.8 - Circuito equivalente de alta frequência para o motor <i>BLDC</i> com a capacitância eixo-rotor ( $C_d$ ).....	41
Figura 4.9 - Tensão de eixo (mV) pós-inserção da capacitância de 2 pF no rotor, em função do tempo (ms).....	42
Figura 4.10 - Corrente ( $\mu$ A) nos rolamentos pós inserção da capacitância de 2 pF no rotor em função do tempo (ms).....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros elétricos e mecânicos do <i>BLDC</i> modelo GK6040.....	33
Tabela 4.1 - Comparativo das capacitâncias parasitas calculadas e medidas do <i>BLDC</i> em estudo.....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$AC$	<i>Alternating Current</i>
$A_H$	Área do contato do rolamento
$C$	Capacitor
$C_b$	Capacitância de rolamento
$C_g$	Capacitância núcleo do estator para o Imã
$C_{eq}$	Capacitância equivalente
$C_{ec}$	Capacitância do estator para carcaça
$C_{er}$	Capacitância do estator para rotor
$C_r$	Capacitância do rotor
$C_{rc}$	Capacitância do rotor para carcaça
$DC$	<i>Direct Current</i>
$d_{l1}$	Espessura de lubrificante rolamento 6204 2RZ
$d_{l2}$	Espessura de lubrificante rolamento 6300 2RZ
$E_m$	Espessura do imã do rotor
$esp$	Espessura do isolante da ranhura
$\epsilon_0$	Permissividade do vácuo
$\epsilon_{rn}$	Permissividade do <i>Nylon</i>
$\epsilon_{rar}$	Permissividade relativa do ar
$\epsilon_{risol}$	Permissividade relativa do isolante
$\epsilon_{rl}$	Permissividade relativa do lubrificante
$gap$	Espessura do entreferro
$\hat{i}_b$	Razão entre a área de contato
$J_b$	Densidade da corrente elétrica
$K_{ec}$	Fator de empilhamento do estator
$K_{rc}$	Fator de empilhamento do rotor
$L$	Indutor
$\Delta L$	Comprimento da lateral do capacitor
$L_m$	Largura do imã do rotor
$L_r$	Comprimento da ranhura do rotor
$L_s$	Comprimento da ranhura do estator
$N_{bb1}$	Número de esferas do rolamento 6204 2RZ
$N_{bb2}$	Número de esferas do rolamento 6300 2RZ

$N_m$	Número de ímãs do rotor
$r_a$	Raio interno da circunferência do capacitor
$r_b$	Raio externo da circunferência do capacitor
$R_s$	Raio do estator
$W_l$	Largura da ranhura do estator
$W_h$	Altura da ranhura do estator
$V_{mc}$	<i>Voltage mode common</i>
$V_{sh}$	<i>Voltage shaft</i>
$PWM$	<i>Pulse Width Modulation</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
1.1	Considerações Iniciais.....	15
1.2	Motivação e Relevância.....	15
1.3	Objetivos do Trabalho.....	17
1.4	Organização do Texto.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	18
2.1	Considerações Iniciais.....	18
2.2	Motores <i>Brushless</i> .....	18
2.3	Modelagem do circuito equivalente em Alta Frequência para Motores Indução e <i>Brushless</i> .....	19
2.4	Tensão de Modo Comum.....	22
2.5	Tensão Induzida Eletrostaticamente no Eixo do Rotor.....	23
2.6	Tensão Induzida Eletromagneticamente no Eixo do Rotor.....	23
2.7	Circuito Divisor de Tensão Eletrostático do Motor de Indução.....	24
2.8	Capacitância do Rolamento.....	24
2.9	Modos das Correntes no Rolamento.....	25
2.9.1	Corrente de Condução ( $dv/dt$ ).....	25
2.9.2	Corrente de Descarga <i>EDM</i> .....	27
2.10	Densidade da Corrente Aparente e Vida Útil do Rolamento.....	28
2.11	Estudos de Propostas para Mitigação.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1	Considerações Iniciais de Ensaios.....	30
3.2	Procedimentos Experimentais e Bancadas de Ensaios.....	30
3.3	Identificação Paramétrica das Capacitâncias do Circuito Equivalente.....	32
3.4	Circuito Equivalente Proposto.....	34
3.5	Circuito equivalente proposto com o eixo isolado.....	34

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	Considerações Iniciais.....	36
4.2	Identificação das Capacitâncias Parasitas.....	36
4.3	Comportamento da Tensão de Eixo Sem a Inserção da Capacitância no Eixo.....	37
4.4	Inserção da Capacitância Adicional no Eixo a Fim de Mitigar a Corrente Parasita pelos Rolamentos.....	41
4.5	Discussão da inserção de Capacitância de Eixo–Rotor para Mitigação da Corrente de Descarga nos Rolamentos.....	43
5	CONCLUSÕES.....	44
5.1	Considerações Finais.....	44
5.2	Proposta para Trabalhos Futuros.....	44
	REFERÊNCIAS.....	45

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

### 1.1 Considerações Iniciais

Aplicações industriais que necessitam de velocidade variável empregam sistemas eletrônicos baseados em inversores cuja fonte de tensão emprega modulação por largura de pulso (*PWM – Pulse Width Modulation*) desde a década de 80. Desde então, os algoritmos de controle trifásico, juntamente com dispositivos com tempos de subida mais rápidos (<100 ns), vem permitindo maior controle da largura de banda, redução das perdas de comutação do inversor, redução do volume do filtro magnético e ciclos de comutação mais rápidos (4-20 kHz), aspectos esses que impõem redução de harmônicos indesejáveis, menor ruído acústico e, conseqüentemente, incremento no desempenho do conjunto acionador (KERKMAN; SKIBINSKI; SCHLEGEL, 2003).

### 1.2 Motivação e Relevância

Todos esses avanços da eletrônica de potência e das técnicas de controle de máquinas elétricas trouxeram novos problemas, dentre eles, destaca-se a possibilidade de dano nos rolamentos causados pela circulação de corrente elétrica (corrente parasita) em função da tensão de modo comum (*V<sub>mc</sub> – Voltage mode common*) apresentar valores diferentes de zero já que as formas de ondas de tensão aplicadas no motor através do inversor são moduladas de alta frequência e não senoidais ((LINK, 1999), (MÜETZE; BINDER, 2006)).

Nesse cenário, os motores em corrente-contínua sem escovas, comumente designados por “*Brushless DC Motors*”, que são acionados por inversores *PWM* estão sujeitos a correntes parasitas de modo comum nos seus rolamentos e nos rolamentos da carga que acionam em decorrência do acoplamento capacitivo que surgem quando a tensão em modo comum (*V<sub>mc</sub>*) é gerada pelo inversor em frequências elevadas (RIEHL, 2010). Assim, a corrente parasita que passa pelos rolamentos pode causar erosão eletrostática nas pistas do rolamento gerando vibrações indesejadas e reduzindo substancialmente a sua vida útil no motor. Na Figura 1.1 observa-se o efeito da corrente parasita na pista de um rolamento.

Figura 1.1 - Rolamento do motor com erosão eletrostática (estrias) causada pela corrente parasita de modo comum



Fonte: RIEHL, Rudolf Ribeiro e RUPPERT, Ernesto, 2012

Diversos são os trabalhos científicos publicados nos últimos anos que buscam entender as causas da tensão no eixo e encontrar soluções para eliminar ou minimizar os danos nestes rolamentos e várias abordagens mostram como proteger estes rolamentos, aumentando assim sua vida útil (ARAÚJO, 2011). As principais são:

- Isolação dos rolamentos;
- Escovas para aterrar o eixo;
- Blindagem de Faraday nos enrolamentos;
- Graxa condutiva no rolamento;
- Isolamento do eixo do rotor.

Existem diversas abordagens para a supressão (redução) da tensão de eixo em máquinas elétricas, contudo, algumas delas não podem ser empregadas sob certas condições de utilização do motor. Por exemplo, o uso de escovas no eixo da máquina não pode ser empregado em áreas classificadas (área de risco, como por exemplo: destilarias); A blindagem dos rolamentos protege os rolamentos do motor, mas não necessariamente os das cargas mecânicas. De fato, em várias circunstâncias não há opção para a supressão da tensão de eixo em máquinas elétricas rotativas ((WILLIAM; WILLWERTH, 2008), Maetani e outros (2011), Adabi e outros (2008)).

### 1.3 Objetivos do Trabalho

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento das Tensões de Modo Comum e correntes parasitas nos mancais dos rolamentos a fim de propor uma abordagem de baixo custo para a mitigação das correntes parasitas em motores de corrente contínua sem escova, comumente denominados de motores *Brushless*. Mais especificamente, a partir de um modelo equivalente em alta frequência e ensaios em laboratório, propôs-se a inserção de uma capacitância entre eixo e rotor durante o processo fabril, criando-se uma capacitância para corrigir a impedância total, visando a limitação da tensão de eixo e conseqüentemente das correntes parasitas pelos rolamentos de forma a estender a vida útil do motor. Os estudos são conduzidos em um motor *Brushless DC* de pequena potência (1,01 cv) acionado por inversor *PWM*. Por fim, serão consideradas as vantagens e desvantagens da proposta num cenário industrial.

### 1.4 Organização do Texto

O texto desta dissertação está organizado como segue:

No capítulo 2 é apresentado o resumo do estado da arte, descrevendo o motor *Brushless* e sua modelagem em alta frequência, bem como a tensão de modo comum que afeta os rolamentos, suas capacitâncias e a densidade da corrente que os afeta.

No capítulo 3 é tratada a metodologia descrevendo os ensaios para aquisição de dados, isolamento do rotor para um melhor entendimento do problema e os gráficos adquiridos.

No capítulo 4 é discutido com base em um comparativo dos resultados obtidos em ensaios conflitando com as simulações obtidas em várias condições.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas no trabalho e propostas para possíveis trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo buscou-se explicar melhor o motor *Brushless*, que mantém muitas de suas características oriundas do motor *DC* exceto pelas escovas mecânicas. Este segmento de motor vem se destacando pelo seu alto torque em qualquer momento de velocidade angular e sua eficiência energética.

Neste capítulo são demonstrados: o modelo do motor em alta frequência; a tensão de modo comum; a tensão induzida eletrostática e eletromagneticamente; a capacitância dos rolamentos; corrente de condução; corrente de descarga e densidade da corrente aparente e vida útil do rolamento.

### 2.2 Motores *Brushless*

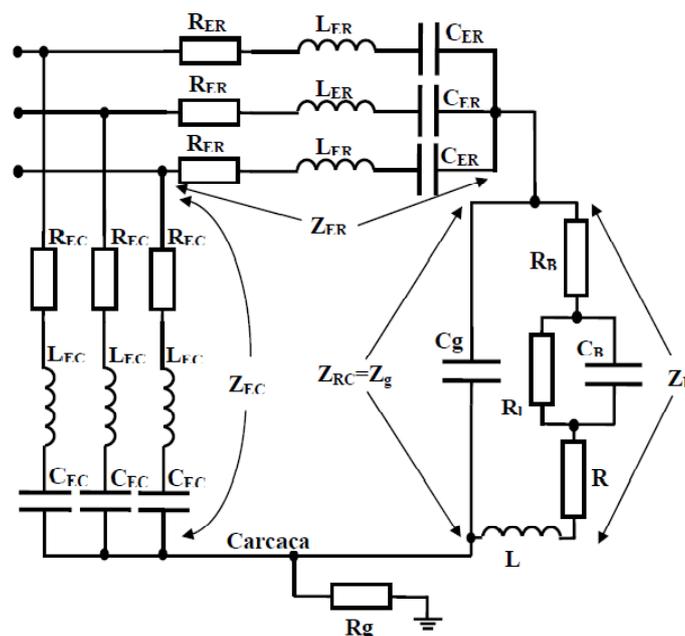
Os motores síncronos de ímãs permanentes, são divididos em 2 classes: *Brushless AC (BACM)* e *Brushless DC (BDCM)*. Os circuitos magnéticos e elétricos de ambos são iguais, com o enrolamento localizado na ranhura do estator, possuindo o rotor de ímã permanente como sistema de excitação. Sendo a forma de onda aplicada, a corrente e a distribuição do fluxo magnético o princípio básico que os diferencia (MONTEIRO, 2002).

Os motores *Brushless AC* operam com tensão alternada e trabalham sobre o campo girante, e são necessárias técnicas mais sofisticadas e relativamente caras, para controle. Porém com os *Brushless DC* é utilizada a realimentação direta da posição angular do rotor e assim a tensão da armadura é comutada entre as fases do rotor, gerando velocidade angular fruto do fenômeno de sincronização autocontrolado, ou comutação eletrônica, ou seja, o conjunto inversor eletrônico *PWM* que se orienta pelo sensor de posição Hall substitui igualmente o comutador mecânico em motores *DC* comuns (GIERAS; WING, 2002).

### 2.3 Modelagem do circuito equivalente em Alta Frequência para Motores Indução e *Brushless*

O estudo da circulação de correntes parasitas em um motor *BLDC* tem como ponto de partida o circuito equivalente de alta frequência de um motor de indução trifásico que pode ser visto na Figura 2.1. Nesse circuito os parâmetros distribuídos  $R$ ,  $L$  e  $C$  representam o acoplamento de altas frequências entre os enrolamentos do estator e do rotor. Desta forma,  $Z_{rc}$  é a impedância entre o rotor e a carcaça do motor, também chamada de impedância de entreferro  $Z_g$ ;  $Z_{er}$  é a impedância entre os enrolamentos do estator e o rotor,  $Z_{ec}$  é a impedância entre os enrolamentos do estator e a carcaça, e  $Z_b$  a impedância entre o rotor e os rolamentos.  $R_w$  e  $L_w$  representam a impedância equivalente do condutor por onde circula a corrente de rolamento e  $R_g$  a resistência do condutor conectado entre a carcaça e o terra (RIEHL; RUPPERT, 2012).

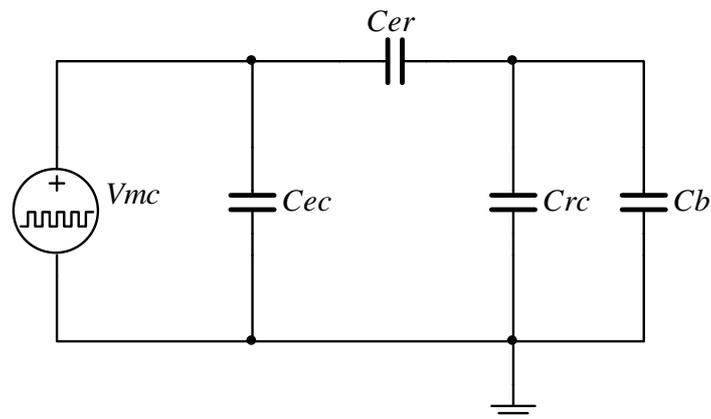
Figura 2.1- Circuito equivalente de alta frequência de um motor de indução



Fonte: RIEHL, 2010

Pode-se simplificar o circuito da Figura 2.1 impondo-se a condição que em frequências da ordem de 4 e 20 kHz, que são típicas frequências de chaveamento do inversor *PWM*, as impedâncias parasitas do motor têm suas características puramente capacitiva (RIEHL; RUPPERT, 2012). Assim, o circuito equivalente da Figura 2.1 pode ser representado somente por meio das capacitâncias parasitas de altas frequências, conforme mostrado na Figura 2.2.

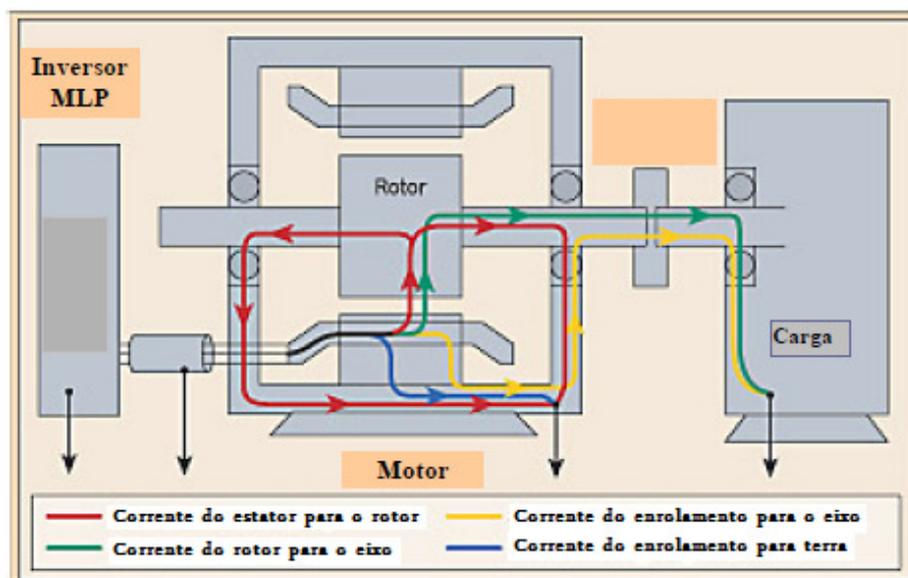
Figura 2.2 - Circuito equivalente de alta frequência simplificado de um motor de indução



Fonte: RIEHL, Rudolf Ribeiro e RUPPERT, Ernesto, 2012

Na Figura 2.2,  $V_{mc}$  é a tensão de modo comum,  $C_{ec}$  é a capacitância entre os enrolamentos estatóricos e a carcaça do motor,  $C_{er}$  é a capacitância entre os enrolamentos do estator e do rotor,  $C_{rc}$  é a capacitância entre o rotor e a carcaça e  $C_b$  é a capacitância do rolamento do mancal. Desta forma, a partir do circuito da Figura 2.2 pode-se estabelecer a circulação de correntes elétricas de modo comum, também chamada de correntes parasitas conforme mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3- Correntes circulantes no motor

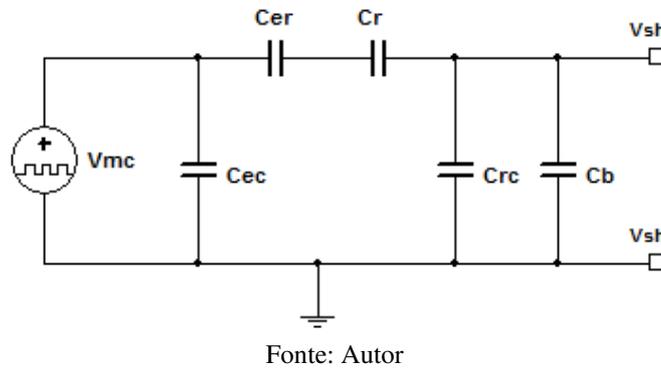


Fonte: Adaptado de RIEHL, Rudolf Ribeiro e RUPPERT, Ernesto, 2012

Em particular, nos motores *BLDC*, em que há na superfície do rotor ímãs fixados por meio de uma cola adesiva apropriada para trabalhar em altas velocidades, é estabelecida uma capacitância na periferia do rotor definida por  $C_r$ . Nesse contexto, a

Figura 2.2 pode ser adaptada resultando na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Circuito equivalente de alta frequência de um servo motor *BLDC*

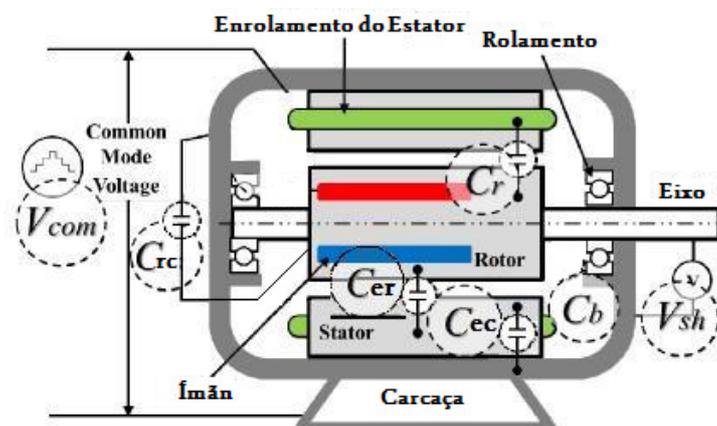


Portanto, por meio de inspeção da Figura 2.4, a tensão de eixo ( $V_{sh}$ ) é resultante de um divisor de tensão, podendo ser determinada pela equação 01.

$$V_{sh} = \frac{C_{er} + C_r}{C_{er} + C_r + C_{rc} + C_b} \cdot V_{mc} \quad (01)$$

A relação entre  $V_{sh}$  e  $V_{mc}$  é conhecida como relação de tensão de rolamento (*BVR*) e fornece informações importantes sobre o fenômeno de carga e descarga no rolamento, como por exemplo, a tensão de ruptura ( $V_{rup}$ ) para o respectivo valor da espessura da película lubrificante no rolamento abaixo da qual a ruptura dielétrica não ocorre segundo Busse e outros (1997). A Figura 2.5 ilustra as principais capacitâncias concentradas ao longo da estrutura de um motor cuja carcaça é metálica.

Figura 2.5- Estrutura do motor com suas capacitâncias



Fonte: Adaptado de KIM, Kyung Tae e Hur, Jin, 2013

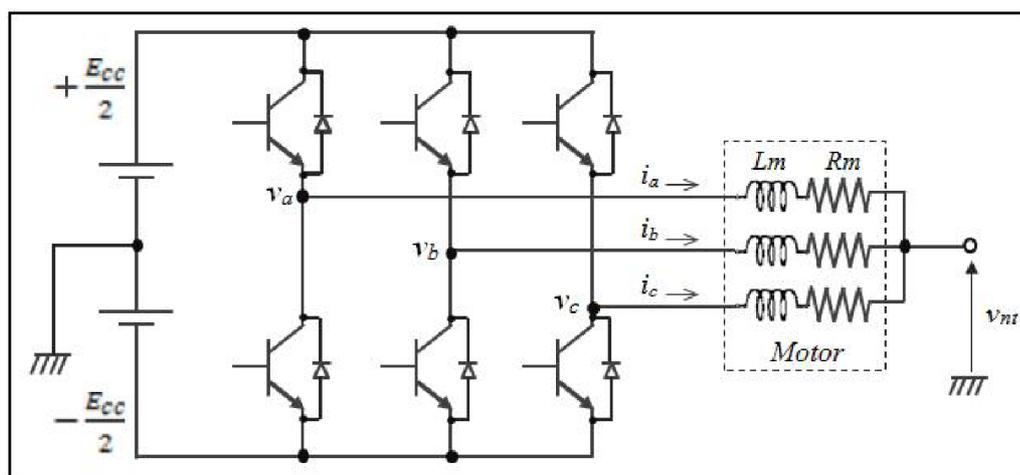
## 2.4 Tensão de Modo Comum

Durante o funcionamento de um inversor *PWM* trifásico, é gerada naturalmente a tensão de modo comum, devido ao princípio da soma da tensão das três fases em relação à terra não resultar em zero. Sempre que é somada a tensão das fases das saídas de um inversor, se obtém um valor de tensão em degraus, que variam  $1/3$  em relação à tensão do barramento *DC* do inversor *PWM* (porque o inversor recebe a tensão alternada da rede, retifica através do barramento *DC* e solta nas saídas em tensão alternada modulando em alta frequência). Devido ao campo eletromagnético induzido nas bobinas que formam um acoplamento junto das partes metálicas e espaços vagos do motor resulta-se na formação de capacitâncias entre cabos, partes do motor, inversor *PWM* e terra. A partir dessa ddp em relação a  $1/3$  da tensão de barramento há a circulação de uma corrente (corrente do modo comum) (SIEMENS A&D SD CS SERVICE COOPERATION, 2006, p. 17).

Isso acontece devido à evolução dos transistores *IGBT* e *MOSFETS* que puderam chegar a frequência de chaveamento na casa dos 20 kHz. Nesta frequência de chaveamento do Inversor, o tempo de subida de rampa de tensão é muito pequeno, causando então a tensão de modo comum (RIEHL; RUPPERT, 2012).

A Figura 2.6 ilustra uma ponte inversora trifásica de um inversor interligado a um motor.

Figura 2.6- Ponte inversora de tensão trifásica



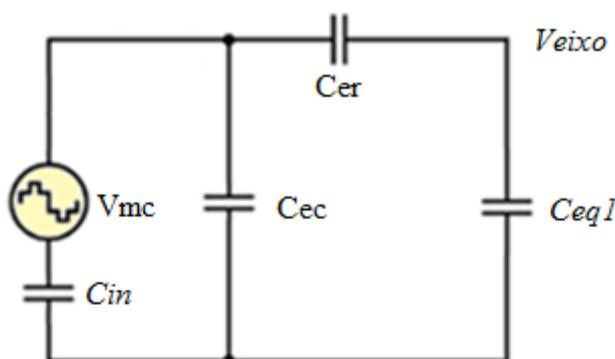
Fonte: SIEMENS A&D SD CS SERVICE COOPERATION, 2006

## 2.5 Tensão Induzida Eletrostaticamente no Eixo do Rotor

Essa tensão é induzida quando há algum erro de projeto, em que o próprio material do qual o rotor foi confeccionado se carrega de tensão eletrostática ao atritar com o ar, ou por algum material interligado com o eixo diretamente, como por exemplo: uma correia de borracha ou uma polia de borracha, que ao se atritar entre materiais, se carrega eletrostaticamente e o transfere ao eixo do rotor (KIM; HUR, 2013).

Também existem as tensões induzidas eletrostaticamente no eixo a partir dos acoplamentos entre os enrolamentos trifásicos do motor e o núcleo do rotor, onde cada alteração de  $V_{mc}$  distribui as cargas elétricas entre  $C_{ec}$ ,  $C_{er}$ , e  $C_{eq1}$  que é a junção das capacitâncias  $C_g$ ,  $C_b$  e  $C_{b1}$  interligadas paralelamente, conforme a Figura 2.7, concluindo-se que  $C_{ec}$  não influencia na capacitância do eixo, porém, a amplitude de  $V_{mc}$  combinada às capacitâncias  $C_{er}$  e  $C_{eq1}$  assumem valores aproximadamente paralelos a  $C_{er}$ . Portanto a capacitância  $C_{er}$  depende de  $C_{ec}$  e  $C_{eq1}$  associadas a amplitude de  $V_{mc}$  (ALMEIDA,2011).

Figura 2.7- Circuito divisor de tensão capacitivo do motor de indução



Fonte: Adaptado de ALMEIDA, Welington Passos, 2011

## 2.6 Tensão Induzida Eletromagneticamente no Eixo do Rotor

Esta é a tensão que tem origem através do campo magnético girante que acompanha o eixo do campo estacionário do estator, e a combinação do campo magnético entre rotor e estator e o campo magnético residual, onde gera uma tensão no eixo que pode causar desde vibrações até instabilidade de rotação do motor. (KIM; HUR, 2013).

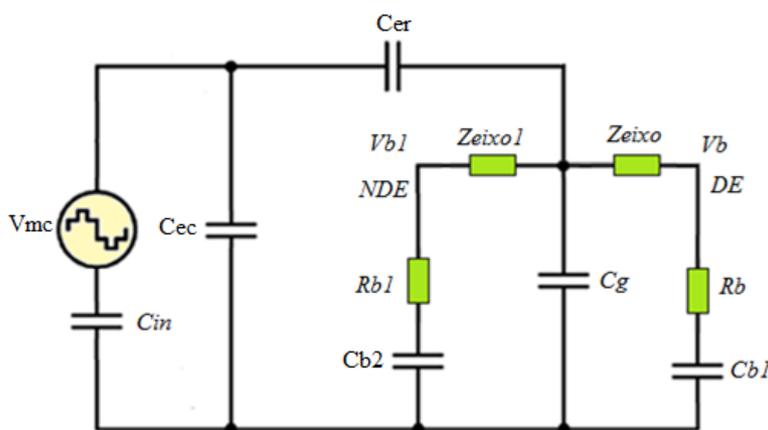
Segundo Almeida (2011, p.26), a assimetria das fases e o elevado  $dv/dt$  gerado pelo inversor *PWM* originam duas tensões: Induzida por corrente não-circulante e

induzida por correntes diferenciais.

## 2.7 Circuito Divisor de Tensão Eletrostático do Motor de Indução

Skibinski; Shami e Akagi, citado por Almeida, Welington Passos (2011, p.23) afirma que o circuito da Figura 2.8 é baseado na tensão  $V_{mc}$ , neste circuito tem-se as capacitâncias de rolamento  $C_{b1}$  e  $C_{b2}$  e as impedâncias de semi-eixo  $Z_{eixo}$  e  $Z_{eixo1}$ . Analisando este circuito é possível verificar que toda a tensão sobre o eixo depende da intensidade da tensão  $V_{mc}$  e do divisor capacitivo formado por  $C_{ec}$ ,  $C_{er}$ ,  $C_{b1}$ ,  $C_g$  e  $C_{b2}$ , podendo estabelecer uma simetria entre as impedâncias do semi-eixo e do rolamento.

Figura 2.8- Circuito divisor de tensão do motor de indução



Fonte: Adaptado de ALMEIDA, Welington Passos, 2011

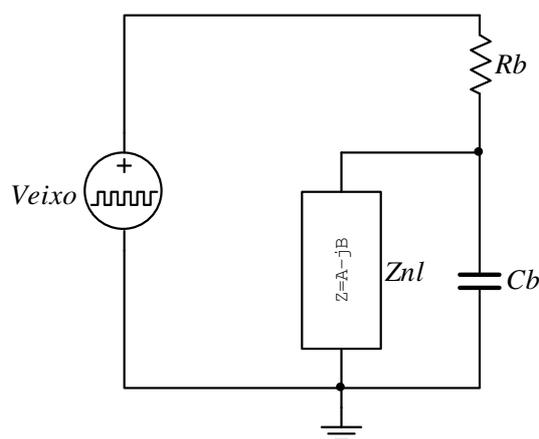
## 2.8 Capacitância do Rolamento

O modelo elétrico mais aprimorado do rolamento é representado por uma resistência denominada  $R_b$  de 10 Ohms, a qual se encontra conectada em série com a capacitância  $C_b$  e uma impedância não-linear, denominada  $Z_{nl}$  (Figura 2.9) (MUETZE; BIDER, 2007). Essa impedância é ligada em paralelo com a capacitância  $C_b$ , com a finalidade de simular a variação instantânea da impedância do rolamento.

Esta impedância passa da característica capacitiva para resistiva, repentinamente, quando ocorre uma ruptura dielétrica da película de lubrificação, descarregando instantaneamente a energia armazenada no capacitor  $C_b$  do rolamento. Portanto, a impedância  $Z_{nl}$  descreve o comportamento não-linear que retrata as

descargas elétricas parciais entre pistas e esferas nas modelagens dos rolamentos. No momento da ruptura dielétrica, a impedância do rolamento é reduzida a um simples valor ôhmico de resistência ( $R_b$ ), cujo efeito se iguala ao de um contato quase-metálico entre as superfícies das esferas e pistas (BINDER; MUETZE, 2008).

Figura 2.9- Circuito elétrico simplificado do rolamento de um motor



Fonte: Autor

## 2.9 Modos das Correntes no Rolamento

As propriedades elétricas do rolamento têm grande influência no comportamento das correntes parasitas e são muito complexas, devido às alterações aleatórias de sua condutividade, que podem variar de boa a péssima, dependendo da velocidade do eixo, carga do rolamento, temperatura e viscosidade da graxa lubrificante, fatos que explicam a grande faixa de valores obtidos nas medições segundo Busse e outros (1997). De acordo com essa variação de condutividade, as correntes que fluem pelos rolamentos podem ser classificadas em dois modos distintos:

- Condução ou  $dv/dt$ ;
- Descarga ou *EDM (Electric Discharge Machining)*.

Cabe ressaltar que esses modos da corrente de rolamento podem ocorrer simultaneamente ou não.

### 2.9.1 Corrente de Condução ( $dv/dt$ )

A corrente de condução ou de  $dv/dt$  é caracterizada por fluir pelos rolamentos,

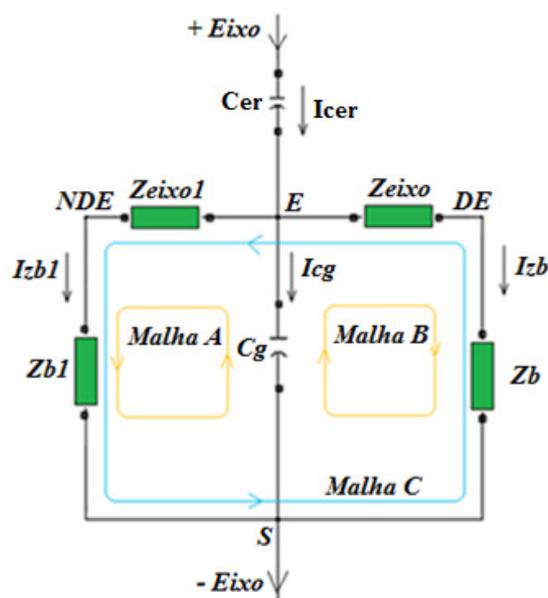
sempre em sincronismo com as variações da tensão  $V_{mc}$ , ocorrendo independentemente da velocidade do eixo do motor. Esta corrente se origina do acoplamento do enrolamento trifásico para o núcleo do rotor, através das capacitâncias  $C_{er}$  e  $C_r$ , que são as responsáveis pelo estabelecimento da tensão de eixo.

Segundo Almeida (2011), as correntes de condução podem ser divididas em dois tipos de associações:

1. Não-circulantes de condução, quando circulam da carcaça em sentido a terra, para retornar ao potencial negativo de  $V_{mc}$ ;
2. Circulantes de condução, quando percorrem um circuito fechado formado por eixo, rolamento e núcleo do estator.

As correntes não-circulantes de condução sempre ocorrem em qualquer valor de impedância, dependendo unicamente do valor de  $V_{mc}$ . Já as correntes que circulam pelo rolamento possuem um defasamento de  $180^\circ$  na forma de onda. A ddp entre as pontas do eixo se anulam a medida que todas as impedâncias forem simétricas, ou seja  $Z_{eixo}$  igual  $Z_{eixo1}$  e  $Z_b$  igual  $Z_{b1}$ , zerando a circulação de corrente. Caso contrário, havendo assimetria entre as impedâncias nas pontas de eixo haverá as correntes de condução entre eixo podendo circular em qualquer circuito fechado em sentido horário ou anti-horário variando de acordo com o carregamento do eixo (ALMEIDA, 2011).

Figura 2.10 - Detalhe das malhas A, B e C por onde fluem as correntes circulantes de condução.



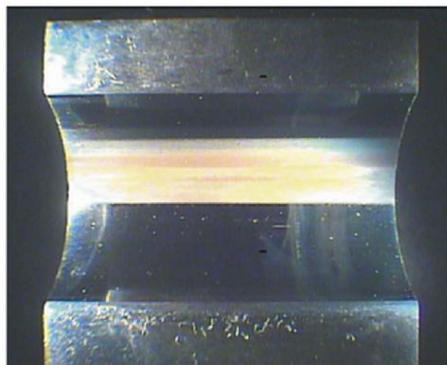
Fonte: Adaptado de ALMEIDA, Welington Passos, 2011

### 2.9.2 Corrente de Descarga EDM

A corrente de descarga está relacionada ao momento de ruptura dielétrica da graxa de lubrificação do rolamento, que só suporta tensões abaixo da tensão de ruptura  $V_{rup}$ , considerando situações específicas de trabalho do motor, como por exemplo: temperatura, carga e velocidade do eixo (BINDER; MUETZE, 2008). O fenômeno de curto circuito intermediário entre  $Cb1$  e/ou  $Cb2$  geralmente ocorre repentinamente, e independe totalmente da transição de  $V_{mc}$  em suas bordas, relacionando-se apenas a amplitude de  $V_{mc}$ , e o nível em que o eixo está de carga (MUETZE; BIDER, 2007). Assim, a ocorrência destes curtos-circuitos levam ao surgimento das correntes de descarga que degradam o rolamento com o efeito visualizado na Figura 1.1.

Chen e Fitzgerald citado por Almeida (2011, p.30) afirmam que dependendo da transição da tensão  $V_{mc}$ , se a mesma coincidir com a corrente de descarga, e aliando a espessura da película lubrificante ou dos quase contatos entre as partes metálicas entre pista e esferas, após a descarga elétrica, os rolamentos passam a caracterizar uma impedância muito alta, que por sua vez gera uma condição perfeitamente favorável ao carregamento do eixo novamente. Porém em baixas velocidades é possível ocorrer em menor proporção a corrente de descarga, devido a redução da uniformidade do filme lubrificante, oriundo de um contato quase que direto entre as partes metálicas das pistas e esfera, aumentando assim a capacitância de rolamento e reduzindo a tensão de eixo, impossibilitando a o surgimento da tensão  $V_{rup}$ . Mesmo assim, se vier a ocorrer alguma corrente de descarga, esta tem seu grau de impacto muito reduzido, devido a redução de amplitude da corrente. Estrias (Figura 1.1), queimaduras (Figura 2.11) e marcas no rolamento são danos oriundos da corrente de descarga EDM.

Figura 2.11- Queimaduras superficiais na pista interna do rolamento causada pela corrente de descarga



Fonte: MUETZE, A. et al, 2004

## 2.10 Densidade da Corrente Aparente e Vida Útil do Rolamento

Segundo Almeida (2011), antigamente a corrente elétrica em motores de grande porte alimentados direto pela concessionária deterioravam os rolamentos. Para analisar este fenômeno se utiliza o cálculo da densidade da corrente elétrica denominada de  $J_b$ , definido pela razão entre a área de contato  $\hat{i}_b$  e a área do contato do rolamento  $A_H$ .

$$J_b = \hat{i}_b \cdot A_H \quad (02)$$

De acordo com Haus (1964), a densidade de 0,7 A/mm<sup>2</sup> permite que o rolamento tenha uma vida útil de 50 mil horas, já com 1,4 A/mm<sup>2</sup>, só permite 500 horas. No entanto Krumpolc (1990) considera que a corrente de 0,1 A/mm<sup>2</sup> não afeta a vida útil do rolamento. Já Kulda (1965) atesta que valores superiores a 2 A/mm<sup>2</sup>, findam o rolamento em apenas 5 horas.

Segundo Endo (1978), em seus testes, estabeleceu que a densidade de 1,0 A/mm<sup>2</sup> seria um valor crítico, e que a densidade em 1,8 A/mm<sup>2</sup> danifica o rolamento em 2 horas. 3 horas a menos do que o recomendado por Kulda. Contudo, Endo ainda afirma que 0,15 e 1,39 A/mm<sup>2</sup> não deixam marcas no rolamento.

Segundo Muetze (2004) em *DC* ou *AC* nas frequências baixas de 50 a 60 Hz, correntes abaixo de 0,1 A/mm<sup>2</sup> não influenciam a vida útil do rolamento. Já a partir de 0,7 A/mm<sup>2</sup> há uma significativa redução da vida útil do rolamento. Muetze completa que a densidade de corrente *EDM* muda seus patamares em relação às correntes de modo comum citadas anteriormente, assim  $J_b < 0,8$  A/mm<sup>2</sup> não afetam o rolamento, mas acima de 0,8 A/mm<sup>2</sup> afetam consideravelmente a vida útil do rolamento.

Todas estas referências fazem alusão a motores de grande porte (até 15 cv). Para motores *Brushless* de pequeno porte acionados por inversores *PWM*, não se encontram referências em relação à densidade de corrente elétrica. Ficando a carga da delimitação por tensão especificamente neste trabalho, pois é necessário haver tensão para se obter uma corrente proporcional a ela.

## 2.11 Estudos de Propostas para Mitigação

Conforme dito anteriormente, diversos trabalhos científicos publicados

conforme levantado por Araujo (2011) nos últimos anos buscaram entender as causas da tensão no eixo e encontrar soluções para eliminar ou minimizar os danos aos rolamentos. As principais abordagens e suas descrições estão a seguir:

- Isolação dos rolamentos: Esse método se utiliza de uma pista interna do rolamento (a qual tem contato com o eixo) de material metálico, para permitir a dilatação e inserção no eixo. Para isolar o rolamento utiliza-se a pista externa (o qual tem contato com a carcaça do motor) e sofre compressão, esta é constituída de material cerâmico, não permitindo a passagem da corrente elétrica. Outra maneira de se isolar o rolamento é inserindo esferas cerâmicas entre a pista interna e externa do mesmo, proporcionando assim uma isolação e durabilidade maior (ARAÚJO, 2011).

- Escovas para aterrar o eixo: Esse método consiste na fabricação de um porta escovas a fim de se afixar uma escova de carvão ao eixo dianteiro do rotor, posicionando a mesma entre a tampa e a polia, mantendo contato da escova ao eixo o tempo todo, sob pressão de uma mola. A finalidade dessa escova é desviar do rolamento a ddp gerada entre o eixo e a carcaça para o terra através de um fio (RIEHL; RUPPERT, 2012).

- Blindagem de Faraday nos enrolamentos: Este método consiste na inserção de uma gaiola de Faraday ao entreferro da máquina, mais especificamente alocada entre o estator e o rotor, eliminando assim a ddp induzida sob o eixo por meio de um acoplamento eletrostático. Este modelo é de alta eficácia, porém também se trata de uma implantação de alto custo, não viabilizando seu uso na prática, a tal ponto de não ser aplicado comercialmente na indústria (ARAÚJO, 2011).

- Graxa condutiva no rolamento: Esse método parte do princípio da utilização de uma graxa com partículas metálicas que visam facilitar a passagem da corrente elétrica evitando assim a corrosão por estrias ou pixel (corrosão por descarga pontual) através do acúmulo de tensão e ruptura abrupta do isolamento. Porém esta graxa gera um aquecimento por si só, que ao longo da vida útil vai se carbonizando prejudicando assim a sua auto-lubrificação (ARAÚJO, 2011).

- Isolamento do eixo do rotor: Este método consiste na isolação dos dois rolamentos por meio de uma bucha de *Nylon*, afim de interceptar a condução da carcaça. Porém esse método é inviável pois o aquecimento do motor pode deformar a bucha e se a carga acionada tiver contato direto com o eixo essa tensão de modo comum irá prejudicar o rolamento da carga acionada (RIEHL, 2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

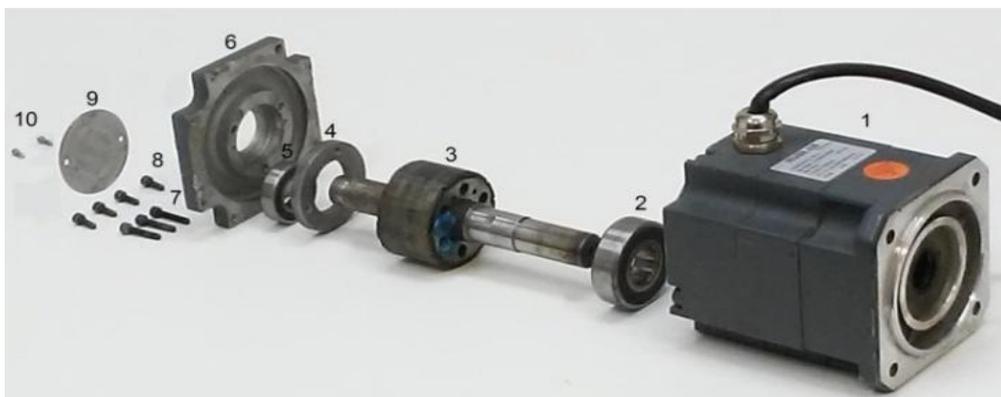
#### 3.1 Considerações Iniciais de Ensaio

A realização de ensaios para a identificação das capacitâncias parasitas, medição de tensões de modo comum e correntes parasitas exigiram modificações estruturais no motor como a inserção de um material isolante sobre os rolamentos a fim de medir a corrente elétrica que flui pelos mesmos e incorporar uma escova junto ao eixo do motor a fim de possibilitar medir a tensão de modo comum no eixo. Além destas, medições das dimensões internas para uso nas equações de cálculo das capacitâncias foram realizadas usando um paquímetro. Os equipamentos utilizados para as medições, multímetro, gerador de sinais e osciloscópio digital, foram devidamente aferidos e calibrados.

#### 3.2 Procedimentos Experimentais e Bancadas de Ensaio

De maneira a identificar as capacitâncias com medições feitas em laboratório, foi empregado um motor *Brushless* com potência de 0,75 kW, modelo GK6040, fabricado pela Golden-age Motores Tecnologia Corp. Ltda. para o estudo de caso. O Motor foi acionado por um inversor *PWM* com frequência de chaveamento de 10 kHz do fabricante Motoppar Indústria e Comércio de Automatizadores Ltda. . Na figura 3.1 tem-se a vista explodida do referido motor com a indicação de seus principais componentes.

Figura 3.1 - Vista explodida do motor *BLDC* modelo GK6040



Legenda: 1) Estator, 2) Rolamento frontal, 3) Rotor, 4) Anel de fixação, 5) Rolamento traseiro, 6) Tampa traseira, 7) Parafusos do bloco, 8) Parafusos da tampa, 9) Tampa de inspeção, 10) Parafusos da tampa de inspeção. Fonte: Autor

Adotando como base os ensaios existentes ((RIEHL; RUPPERT, 2012), (ARAÚJO, 2011), (BUSSE e outro (1997)) houve a necessidade de uma melhor mensuração da tensão sobre o eixo antes da ruptura da graxa dos rolamentos, bem como a passagem de sua corrente parasita. Assim, optou-se por isolar o eixo como visualizado na Figura 3.2, porém o motor AG6040 da Figura 3.1 não possui material para se realizar usinagem na carcaça com objetivo de adaptar um isolamento. A solução encontrada foi realizar a substituição dos rolamentos originais (modelo 6003RZ - 17x35x10 mm e 6204RZ - 20x47x14 mm) por outros (modelo 6903RZ - 17x30x7 mm e 6004RZ - 20x42x12 mm) possuindo menor diâmetro externo.

Figura 3.2 - Rotor do motor com os rolamentos 6903RZ e 6004RZ com buchas de *Nylon* e condutores de cobre esmaltados ligados à pista externa dos rolamentos

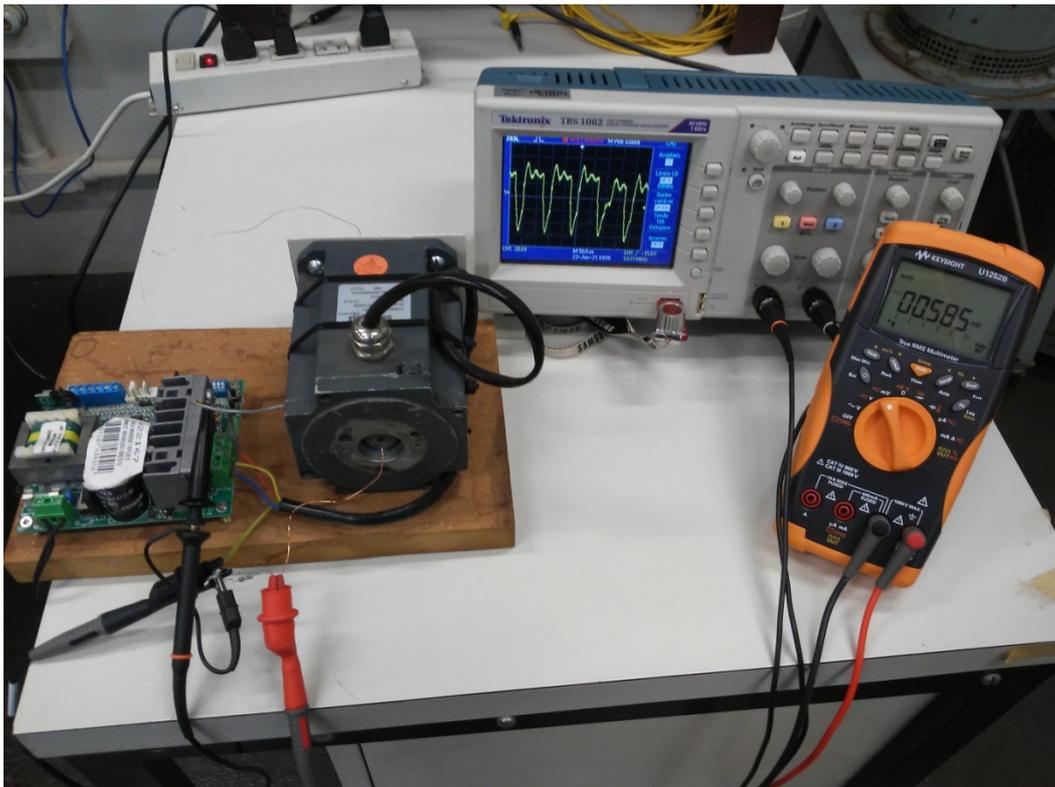


Fonte: Autor

Esta diferença entre os diâmetros externos possibilitou a instalação de duas buchas de *Nylon* que atuam como isolamento. Não foram realizadas outras modificações, tanto no eixo quanto na carcaça do motor. Por fim, para realizar as medições de corrente pelos rolamentos, utilizou-se condutores de cobre esmaltados interligados às pistas externas dos rolamentos, como se observa na Figura 3.2. Estes condutores foram levados a um interruptor a fim de levar os rolamentos ao potencial de terra (carcaça) quando necessário e assim medir a corrente parasita que circula pelos mesmos.

Assim, visando maior exatidão na identificação das capacitâncias parasitas, medições das mesmas foram realizadas empregando o método do gerador de sinais (HP 33120A) e osciloscópio digital (Tektronix TDS 1001) na frequência de 10 kHz e multímetro Keysight U1252B como mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Bancada de ensaios, com motor *Brushless*, inversor *PWM*, osciloscópio e multímetro



Fonte: Autor

Com o aparato experimental totalmente montado partiu-se então para a identificação das capacitâncias e de um circuito equivalente propriamente dito.

### 3.3 Identificação Paramétrica das Capacitâncias do Circuito Equivalente

A identificação das capacitâncias para o circuito da Figura 2.4 pode ser feita por expressões com base na teoria eletromagnética ou por meio de medições realizadas em laboratório. Segundo ((WILLIAM; WILLWERTH, 2008), (JOUANNE; ZHANG, 1999) e (MUETZE; BINDER, 2007)) é possível determinar as capacitâncias de forma aproximada empregando as equações 03 a 07, cujas definições dos parâmetros e variáveis são mostradas na tabela 3.1.

$$C_{ec} = \frac{K_{ec} \cdot N_s \cdot \epsilon_{risol} \cdot \epsilon_0 \cdot (W_d + 2 * W_s) \cdot L_s}{esp} \quad (03)$$

$$C_{er} = \frac{K_{rc} \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{risol} \cdot N_s \cdot Ab_r \cdot L_r}{gap} \quad (04)$$

$$C_r = \frac{\varepsilon_0 \cdot \pi \cdot N_m \cdot L_m \cdot L_r}{R_m} \quad (05)$$

$$C_{rc} = \frac{K_{rc} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rar} \cdot \pi \cdot L_r}{\ln \frac{R_s}{R_r}} \quad (06)$$

$$C_b = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rl} \cdot 4\pi \cdot N_{bb}}{\frac{1}{r_{bb}} - \frac{1}{r_{bb} + d_l}} \quad (07)$$

Tabela 3.1 - Parâmetros elétricos e mecânicos do *BLDC* modelo GK6040

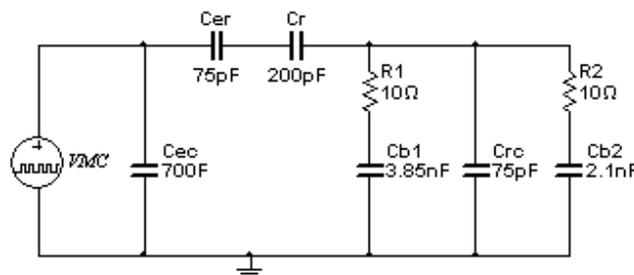
Simbolo	Parâmetro	Valor	Unidade
$\varepsilon_0$	Permissividade do vácuo	$8,85 \times 10^{-12}$	F /m
$\varepsilon_{rn}$	Permissividade do <i>Nylon</i>	3,2	
$r_b$	Raio externo da circunferência do capacitor		m
$r_a$	Raio interno da circunferência do capacitor		m
$L$	Comprimento da lateral do capacitor.		m
$\varepsilon_{rar}$	Permissividade relativa do ar	1,0004	
$\varepsilon_{risol}$	Permissividade relativa do isolante	2,1	
$\varepsilon_{rl}$	Permissividade relativa do lubrificante	2,6	
$R_s$	Raio do estator	27,3	[mm]
$R_r$	Raio do rotor	26,6	[mm]
$W_l$	Largura da ranhura do estator	5,1	[mm]
$W_h$	Altura da ranhura do estator	6,0	[mm]
$L_s$	Comprimento da ranhura do estator	38,0	[mm]
$L_r$	Comprimento da ranhura do rotor	33,0	[mm]
$esp$	Espessura do isolante da ranhura	0,30	[mm]
$N_s$	Número de ranhuras do estator	18	[mm]
$gap$	Espessura do entreferro	0,70	[mm]
$L_m$	Largura do ímã do rotor	11,1	[mm]
$E_m$	Espessura do ímã do rotor	2,80	[mm]
$N_m$	Número de ímãs do rotor	13	
$K_{ec}$	Fator de empilhamento do estator	1,0	
$K_{rc}$	Fator de empilhamento do rotor	1,0	
$N_{bb1}$	Número de esferas do rolamento 6204 2RZ	08	
$r_{bb1}$	Raio da esfera do rolamento 6204 2RZ	4,0	[mm]
$d_{l1}$	Espessura de lubrificante rolamento 6204 2RZ	15	[ $\mu$ m]
$N_{bb2}$	Número de esferas do rolamento 6300 2RZ	08	
$r_{bb2}$	Raio da esfera do rolamento 6300 2RZ	2,0	[mm]
$d_{l2}$	Espessura de lubrificante rolamento 6300 2RZ	05	[ $\mu$ m]

Fonte: Autor

### 3.4 Circuito Equivalente Proposto

De posse das capacitâncias parasitas medidas na tabela 3.4, pode-se parametrizar o circuito da Figura 2.4 modificado pelo circuito elétrico equivalente do rolamento (Figura 2.9) e assim tem-se o circuito equivalente do ensaio da Figura 3.3. Neste circuito, a impedância não linear  $Z_{nl}$  foi substituída por um interruptor para simular uma disrupção através do rolamento. A fim de verificar a validade do ensaio, simulações foram realizadas utilizando o software *MultiSim* da National Instruments e os resultados são mostrados na Figura 3.4. Nota-se boa conformidade na tensão de eixo com o valor medido e apresentado.

Figura 3.4 - Circuito equivalente de alta frequência para o servomotor *BLDC* modelo GK6040



Fonte: Autor

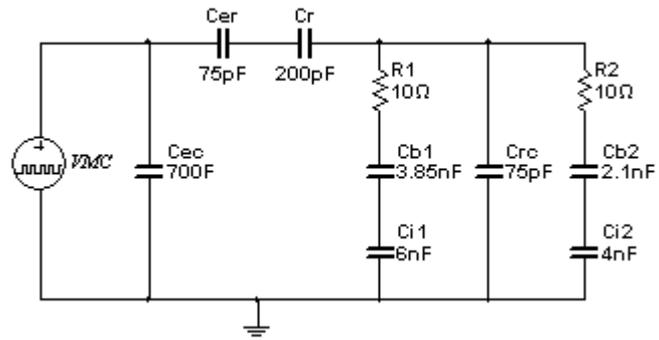
### 3.5 Circuito equivalente proposto com o eixo isolado

Devido à espessura dos isolantes e seus formatos, analisou-se a equação do capacitor tubular e verificou-se ótima similaridade dimensional, assim, utilizou-se a expressão abaixo para representar o mesmo (FERREIRA, 2017).

$$C_i = \frac{2\pi \cdot \epsilon_{rn} \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \quad (08)$$

Assim, a partir da diferença dimensional entre os rolamentos dianteiro e traseiro, têm-se valores distintos de capacitâncias isolantes  $C_{i1}$  e  $C_{i2}$  (cujo dielétrico é o *Nylon*). Embora suas reatâncias resistivas sejam muito altas, e a corrente que os atravessa seja insignificante, a corrente ainda foi considerada nas análises, com objetivo de se obter a máxima precisão. Para melhor entendimento, o circuito abaixo (Figura 3.5) ilustra a posição e os valores dos mesmos.

Figura 3.5 – Circuito equivalente com Isolante



Fonte: Autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são abordados todos os resultados obtidos nas simulações e nas medições do motor *Brushless* GK-6040 da Golden-Age acionado pelo inversor *PWM*, na frequência de chaveamento de 10 kHz, bem como a inserção de uma nova capacitância junto ao eixo do rotor a fim de minimizar a tensão de eixo e a corrente parasita nos rolamentos.

### 4.2 Identificação das Capacitâncias Parasitas

A tabela 4.1 mostra os valores calculados e medidas das capacitâncias parasitas do motor em estudo de acordo com o proposto no capítulo 3.

Tabela 4.1 – Comparativo das capacitâncias parasitas calculadas e medidas do *BLDC* em estudo

Capacitância	Calculada	Medida
$C_{ec}$	678,3 pF	711,1 pF
$C_{er}$	55,2 pF	75,2 pF
$C_r$	168,6 pF	201,0 pF
$C_{rc}$	70,6 pF	76,4 pF
$C_{b1}$	2,5 nF	3,8 nF
$C_{b2}$	1,85 nF	2,1 nF
$C_{i1}$	80,7 pF	6,1 nF
$C_{i2}$	79,1 pF	4,5 nF

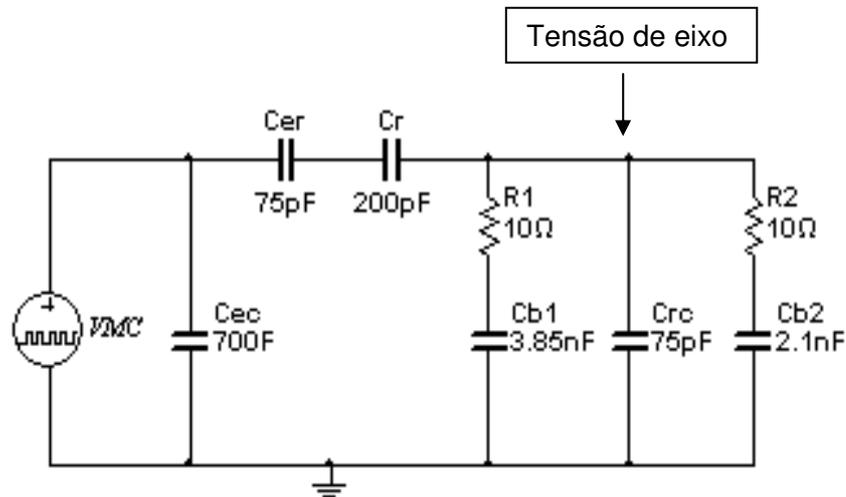
Fonte: Autor

As discrepâncias entre os valores calculados e medidos decorrem das hipóteses simplificadoras impostas na dedução das expressões para o cálculo das capacitâncias e imprecisões nas medidas dimensionais do motor. Como exemplo pode-se citar o espraiamento do campo elétrico e a capacitância das cabeças das bobinas estatóricas que não são contempladas pelas expressões de 03 a 07.

De posse das capacitâncias parasitas da tabela 4.1, pode-se parametrizar o circuito da Figura 2.4 modificado pelo circuito elétrico equivalente do rolamento

(Figura 2.9) e assim tem-se o circuito equivalente mostrado anteriormente na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Circuito equivalente de alta frequência para o motor *BLDC* modelo GK6040



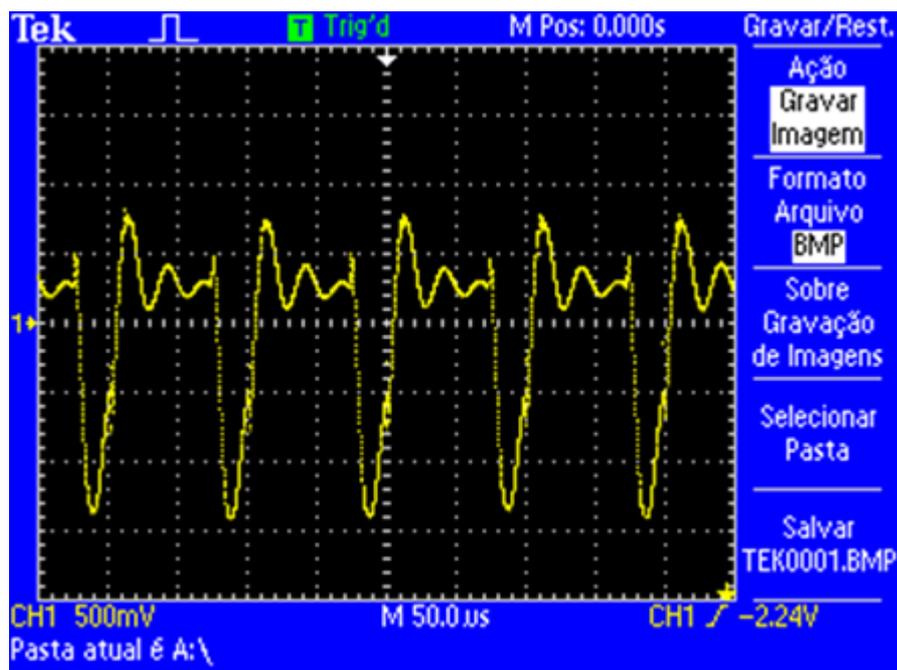
Fonte: Autor

### 4.3 Comportamento da Tensão de Eixo Sem a Inserção da Capacitância no Eixo

A partir do circuito equivalente da figura 4.1 pôde-se simular a tensão de eixo com os rolamentos ligados a carcaça e isolado da carcaça do motor por meio da atuação no respectivo interruptor. Com o interruptor aberto, mediu-se a tensão de eixo que pode ser vista na figura 4.2. A versão simulada nas mesmas condições pode ser vista na figura 4.3. Verifica-se boa aproximação da forma de onda simulada com a medida, indicando fidelidade do circuito elétrico equivalente da figura 4.1.

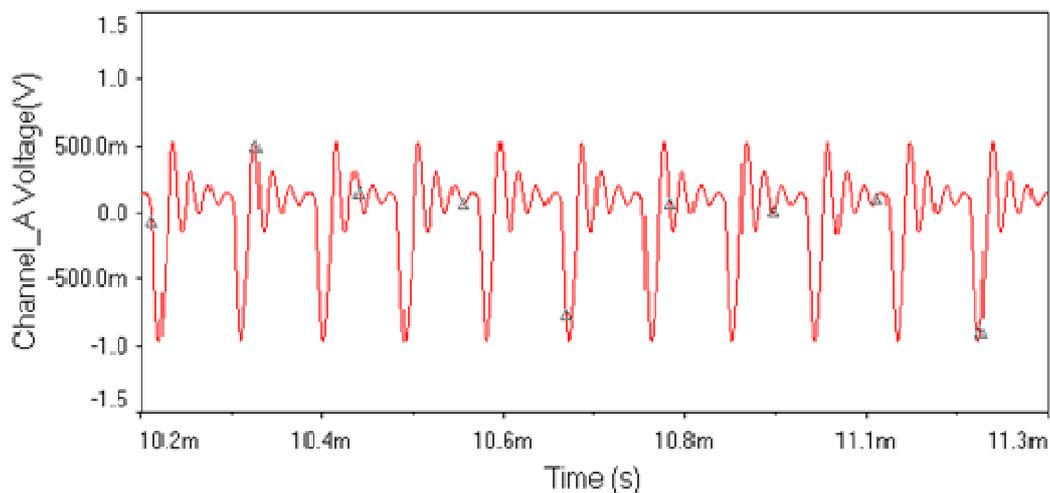
Observam-se na figura 4.2 valores de tensão de eixo da ordem de até  $2,2V_{pp}$ , bem superior aos  $350mV_{pp}$  recomendados (SIEMENS A&D SD CS SERVICE COOPERATION, 2006), para que não ocorra deterioração dos rolamentos.

Figura 4.2 - Tensão de eixo com o interruptor aberto ( $V_{rms}$ : 580 mV e  $V_{pp}$ : 2,2 V)



Fonte: Autor

Figura 4.3 - Simulação da tensão (mV) de eixo com o interruptor aberto em função do tempo (ms)

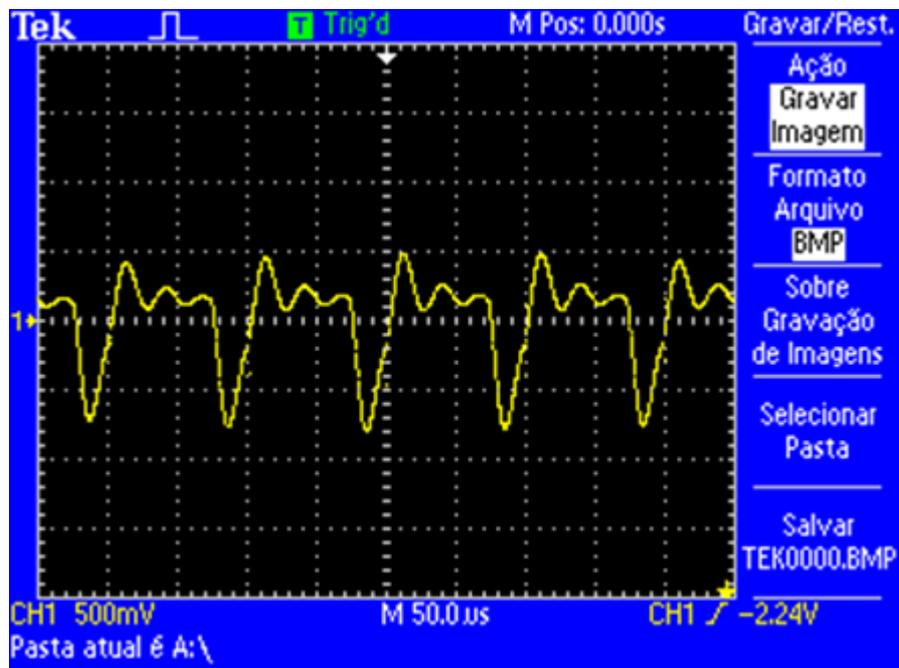


Fonte: Autor

Nas figuras 4.4 e 4.5 tem-se a medição da tensão de eixo e simulação da mesma com o interruptor fechado, ou seja, com os rolamentos em contato com a carcaça do motor. Novamente, observa-se que a simulação se assemelha muito aos resultados obtidos nas medições, havendo poucas diferenças significativas. Essas pequenas diferenças decorrem da simplicidade do modelo, o qual não leva em conta todas as

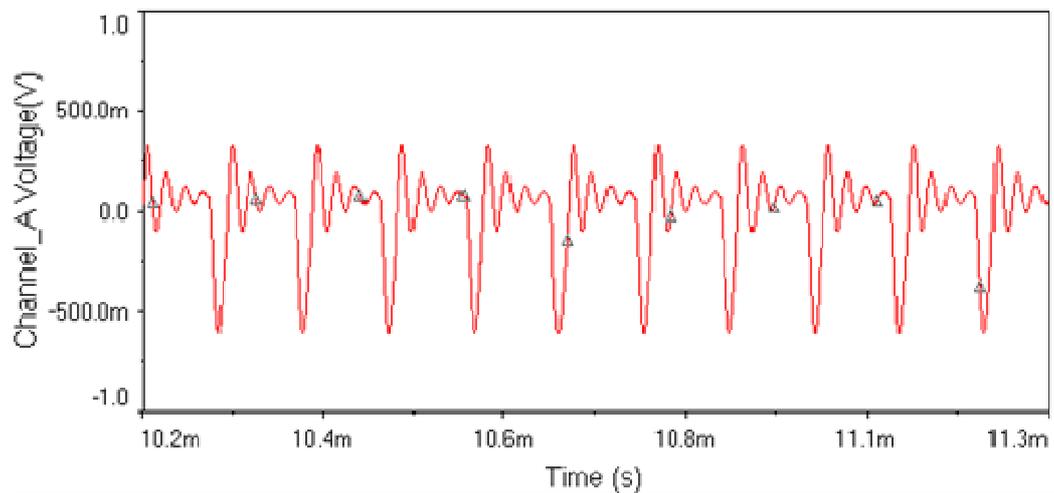
nuances do campo elétrico.

Figura 4.4 - Tensão de eixo com o interruptor fechado ( $V_{rms}$ : 328 mV e  $V_{pp}$ : 1,30 V)



Fonte: Autor

Figura 4.5 - Simulação da tensão (mV) de eixo com o interruptor fechado em função do tempo (ms)

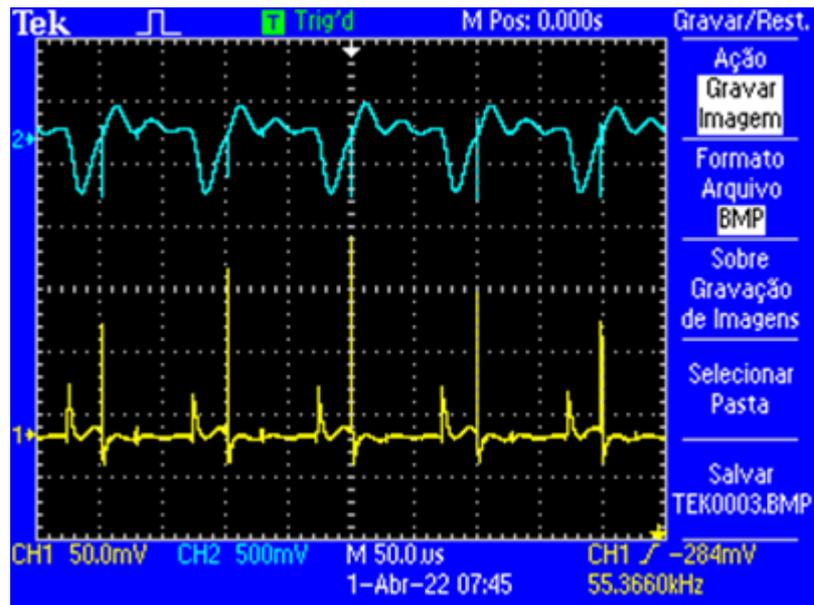


Fonte: Autor

A corrente parasita que circula pelo rolamento (interruptor fechado) pôde ser medida utilizando um resistor *shunt* de 10 ohms e pode ser vista no canal de cor amarela da Figura 4.6. Uma vez que o resistor *Shunt* é de 10 ohms, a medição de corrente

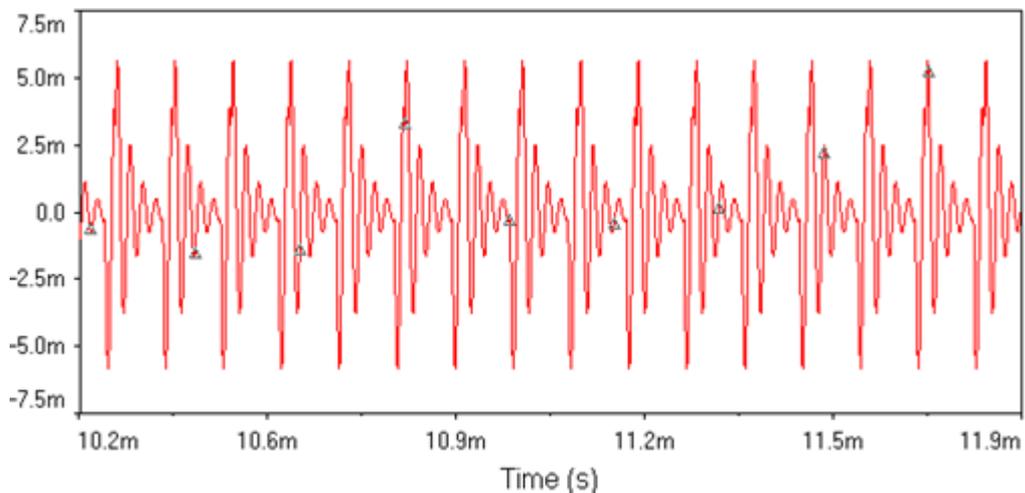
adquirida deve ser dividida por 10 na Figura 4.6, lendo-se em uma escala de 5 mV/divisão. Observa-se que o pico de corrente elétrica que circula pelo rolamento ocorre durante a passagem da tensão de eixo por 0 V e pode chegar ao valor de pico de 12 mA. Na Figura 4.7 tem-se a corrente de descarga pelos rolamentos obtida a partir da simulação do circuito elétrico equivalente.

Figura 4.6 - Canal 1 (amarelo): Corrente circulante pelos rolamentos; Canal 2 (azul): Tensão de modo comum no eixo



Fonte: Autor

Figura 4.7 - Simulação da corrente (mA) pelos rolamentos em função do tempo (ms)

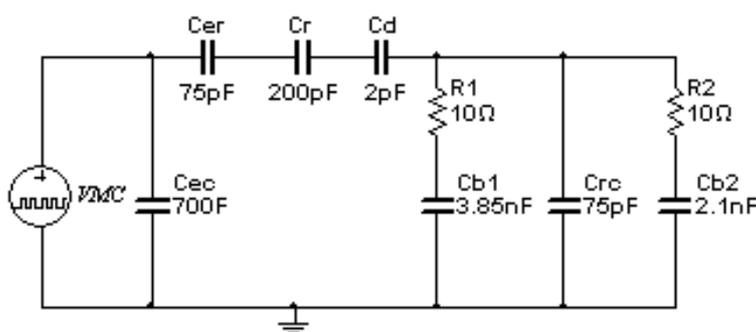


Fonte: Autor

#### 4.4 Inserção da Capacitância Adicional no Eixo a Fim de Mitigar a Corrente Parasita pelos Rolamentos

Uma análise cuidadosa do circuito elétrico equivalente sugere a inserção de mais uma capacitância em série a fim de dividir tensão de modo comum e assim reduzir a tensão de eixo, impondo uma redução na corrente pelos rolamentos. Neste cenário, propôs-se a inserção de uma capacitância entre o eixo do motor e o rotor ou entre o rotor e os ímãs permanentes da ordem de 2 pF. Na Figura 4.8 tem-se a capacitância adicional ( $C_d$ ) de 2 pF inserida no rotor no ato da fabricação.

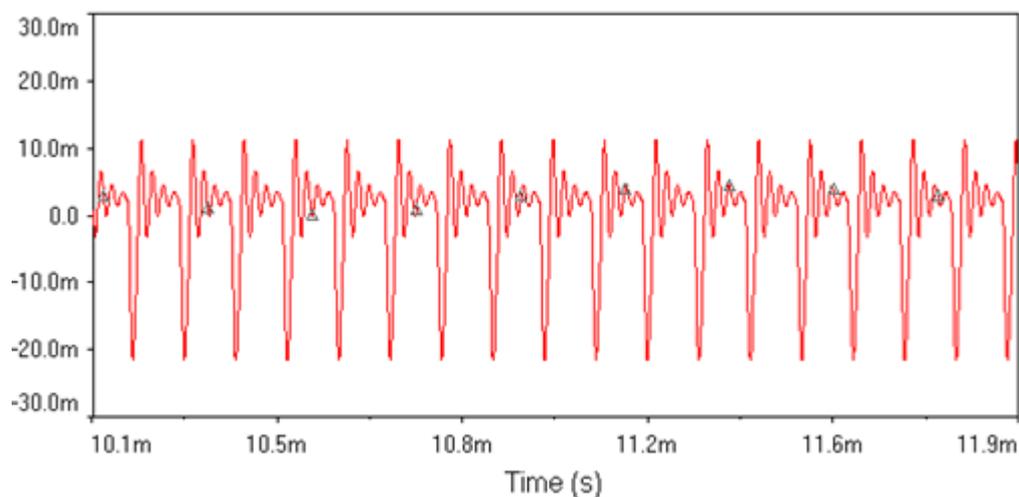
Figura 4.8 - Circuito equivalente de alta frequência para o motor *BLDC* com a capacitância eixo-rotor ( $C_d$ )



Fonte: Autor

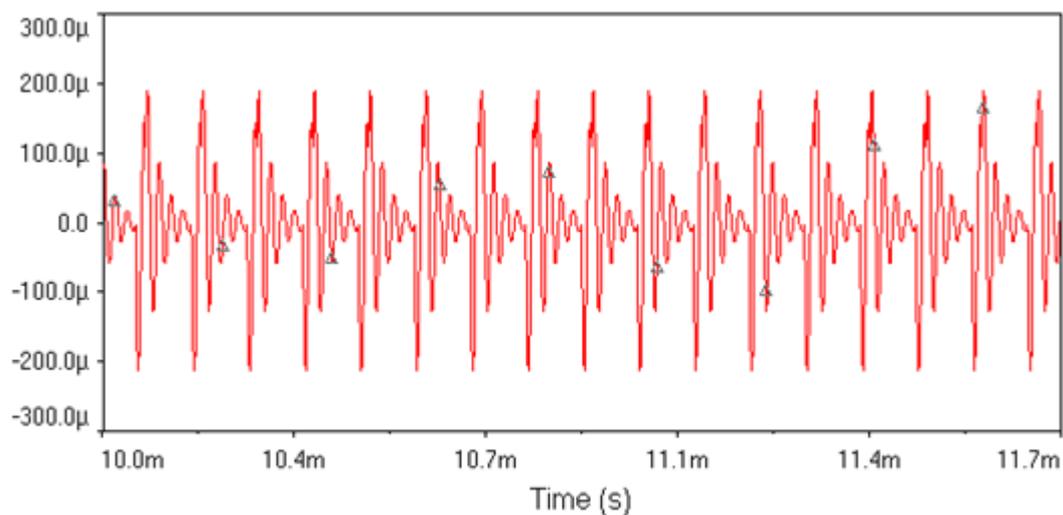
Nota-se que com a inserção da capacitância adicional  $C_d$  a tensão de eixo e consequentemente a corrente pelos rolamentos diminuem drasticamente. A tensão de eixo reduz para 30 mVpp (Figura 4.9), dez vezes menor que a tensão limite que causa problemas ao rolamento estimado por Muetze e outros (2004). Da mesma forma, na Figura 4.10 verifica-se que a corrente que passa pelos rolamentos reduziu-se a nível de microamperes, contribuindo para o aumento da vida útil do motor (rolamentos).

Figura 4.9 - Tensão de eixo (mV) pós-inserção da capacitância de 2 pF no rotor, em função do tempo (ms)



Fonte: Autor

Figura 4.10 - Corrente ( $\mu$ A) nos rolamentos pós inserção da capacitância de 2 pF no rotor em função do tempo (ms)



Fonte: Autor

As correntes de descarga do motor BLDC em estudo não podem ser comparadas com os resultados já validados pela literatura, devido ao seu porte muito menor em relação aos motores citados na sessão 2.10. Cabe lembrar que sua tensão de alimentação é muito menor se comparada aos motores de indução de maior porte.

Uma forma mais justa de avaliar os ensaios realizados é utilizando o padrão de 350 mVpp limite citado por (BINDER; MUETZE, 2008) e (SIEMENS A&D SD CS SERVICE COOPERATION, 2006). Partindo deste pressuposto, propôs-se então inserir uma capacitância no eixo do rotor a fim de diminuir a tensão de eixo de 1,3 Vpp. Caso contrário, no longo prazo este motor terá a vida útil do seus rolamentos reduzida. Entretanto, a inserção de mais uma capacitância impõe mais uma etapa no processo da fabricação deste motor, podendo aumentar o seu custo.

#### **4.5 Discussão da inserção de Capacitância de Eixo–Rotor para Mitigação da Corrente de Descarga nos Rolamentos**

A fim de reduzir a tensão entre o eixo e carcaça e assim mitigar a corrente de descarga, diversas abordagens foram propostas por diversos pesquisadores e foram apresentadas no Capítulo 1. O uso de escovas no eixo com a finalidade de curto-circuitar a tensão de eixo com a carcaça ou, inserir capacitores em paralelo com as capacitâncias parasitas entre o eixo-carcaça é factível em motores de potência elevada cuja manutenção é facilitada. Entretanto, em motores *Brushless*, além de serem de pequena dimensão, foram concebidos para não terem manutenção periódica frequente e, portanto, o uso de escovas não é a prática adotada. A blindagem dos enrolamentos do estator apresenta bom desempenho na mitigação da tensão de eixo, contudo seu custo é proibitivo em se tratando de motores comerciais (ARAÚJO, 2011). O emprego de graxa condutiva tem a desvantagem de que, com o passar do tempo sua eficiência fica comprometida pelas impurezas decorrentes do desgaste do rolamento. O isolamento dos rolamentos resolve o problema da deterioração dos rolamentos do motor, mas não garante que não ocorram danos aos rolamentos das cargas mecânicas acopladas ao eixo do motor *BLDC* (ARAÚJO, 2011). Desta forma, a proposta apresentada e validada contribui para o leque de opções para a supressão (ou mitigação) da corrente de descarga em rolamentos de motores elétricos acionados por inversores.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Considerações Finais

Com o objetivo de reduzir a tensão entre o eixo e carcaça e assim mitigar a corrente de descarga através dos rolamentos, diversas abordagens foram apresentadas e analisadas. Mais especificamente, a abordagem que propõe a inserção de uma capacitância entre o eixo e o núcleo do rotor, a fim de gerar uma reatância de alto valor e assim reduzir a tensão entre eixo e carcaça. Um motor *BLDC* foi empregado para o estudo e seu circuito equivalente em alta frequência foi identificado por meio de equações eletromagnéticas e de medições laboratoriais. Pode concluir-se que tal abordagem apresenta as seguintes contribuições:

- Mitiga a corrente de descarga nos rolamentos de motores *BLDC* com grande eficiência;
- Contribui de forma direta para o aumento da vida útil dos motores *BLDC*;
- Dispensa o uso de abordagens que apresentam a necessidade de manutenção periódica como, por exemplo, as escovas no eixo e/ou graxas condutivas nos rolamentos.
- Como desvantagem dessa abordagem pode citar-se o aumento de uma etapa no processo de produção do motor.

### 5.2 Proposta para Trabalhos Futuros

Fica proposto a interesse de trabalhos futuros o estudo de um inversor que elimine a corrente de modo comum, com suas senoides de tensão entre as três fases resultando em 0°.

Outro trabalho pode ser um material para ser utilizado como dielétrico na criação da capacitância de eixo do motor *BLDC*.

## REFERÊNCIAS

ADABI J. et al. “**Bearing damage analysis by calculation of capacitive coupling between inner and outer races of a ball bearing,**” Presented in Conf. Power Electronics and Motion Control, p. 903–907, set. 2008.

ALMEIDA, Welington Passos. **Contribuições ao estudo das tensões de eixo e correntes de modo comum em motores de indução acionados por conversores PWM.** 2011. 170f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/205M.PDF>>. Acesso em: 31 dez. 2020.

ARAÚJO, R. S.. **Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Alimentados por Inversores: Análise e Proposta de Solução.** 2011. 141f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte. Disponível em: <[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/HPAA-8NTQXG/1/dissertacao\\_romero\\_1\\_.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/HPAA-8NTQXG/1/dissertacao_romero_1_.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2020.

BINDER, A.; MUETZE, A. **Scaling effects of inverter-induced bearing currents in AC machines.** IEEE Transactions on industry applications, v. 44, n. 3, p. 769-776, Mai/Jun. 2008. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/4270866>>. Acesso em: 5 jun. 2020.

BUSSE, D. et al. **Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives.** IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, v. 12, n. 2, Mar. 1997. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/558735>>. Acesso em: 13 out. 2020.

ENDO, H. **Analysis of current density at dc motor bearing.** Shinko Electric-Ltda., 21 Janeiro 1978.

FERREIRA, Fabricio Batista. **Caracterização numérica e experimental de materiais dielétricos sólidos através dos parâmetros de espalhamento.** 2017. 69f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação e Engenharia

Elétrica, João Pessoa. Disponível em:  
 <<https://repositorio.ifpb.edu.br/jspui/bitstream/177683/335/1/38-Fabricio%20Ferreira%20Batista%20-CARACTERIZA%C3%87%C3%83O%20NUM%C3%89RICA%20E%20EXPERIMENTAL%20DE%20MATERIAIS%20DIEL%C3%89TRICOS%20S%C3%93LIDOS%20ATRAV%C3%89S%20DOS%20PAR%C3%82METROS%20DE%20ESPALHAMENTO.pdf>> Acesso em: 29 Mar. 2022.

GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent Magnet Motor Technology**. First Edition. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. 589p.

HAUS, O. **Shaft voltage and bearing currents-causes, effects and remedies**. ETZ-A, p. 105-112, 1964.

JOUANNE, Annette Von; ZHANG, Haoran. “**A Dual-Bridge Inverter Approach to Eliminating Common-Mode Voltage and Bearing and Leakage Currents**”, IEEE Trans on Power Electronics, v. 14, n. 1, p. 43-48, Jan. 1999. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=737591>>. Acesso em: 08 Out. 2020.

KERKMAN, R.; SKIBINSKI, G.; SCHLEGEL, D. **Unintended consequence of low rise time IGBTs**, In: The International Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC), Madison, WI, Jun. 2003.

KIM, Kyung Tae; HUR, Jin. **Reduction of shaft voltage by the flux-path design in IPM-type BLDC motor**, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Busan, p. 803-806, Oct.2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6713158>>. Acesso em: 22 de Out. 2020.

KRUMPOLC, E. **Bearing currents and shaft voltages in electric machines**. Electrotechnik, v. 45, p. 88-91, Abril 1990.

KULDA, V. **Bearing currents in electrical machines**. Czechtech Journal "The

Electrical Engineer", p. 323-326, 1965.

LINK, P. J. **Minimizing electric bearing currents in ASD systems**, IEEE Ind. Appl. Mag., v. 5, n. 4, p. 55–66, Jul./Aug. 1999. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=771367>>. Acesso em 02 de ago 2020.

MAETANI, T. et al. **Comparing brushless dc motors**, IEEE Trans. Ind. Appl., v. 21, n. 6, p. 29-35, Nov/dez. 2015.

MAETANI, T. et al. **“Approaches to suppressing shaft voltage in brushless DC motor driven by PWM inverter”**, presented in 2011 Int. Conf. Eleger. Mach. Syst. (ICEMS), p. 1–6, ago. 2011.

MONTEIRO, J. R. B. A. **Transformação DQ Não Senoidal para Máquinas Síncronas com Imã Permanente no Rotor**. 108 f. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MUETZE, A. et al. **Experimental evaluation of the endangerment of ball bearings due to inverter-induced bearing currents**. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, 3 a 7 October 2004. p. 1989-1995.

MUETZE, A.; BINDER, A. **Don't lose your bearings—Mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive systems**, IEEE Ind. Appl. Mag., v. 12, n. 4, p. 22–31, Jul./Aug. 2006.

MUETZE, Annette; BIDER, Andreas. **Calculation of Circulating Bearing Currents in Machines of Inverter-Based Drive Systems**, IEEE Trans. Ind. Electron., v. 54, n. 2, p. 932-938, Apr. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4135424>>. Acesso em: 8 abr. 2020.

RIEHL, Rudolf Ribeiro; RUPPERT, Ernesto. **“Método experimental para determinação das capacitâncias parasitas do motor de indução trifásico acionado**

**por inversor MPL**”, Revista Controle & Automação, v. 23, n. 2, p. 153-163, 2012.

RIEHL, Rudolf Ribeiro. **Uma metodologia para determinação das capacitâncias parasitas de motores de indução trifásicos de rotor em gaiola**. 2010. [s.n.]. Tese de Doutorado, Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Unicamp, Campinas, SP.

SIEMENS A&D SD CS SERVICE COOPERATION. **“Informações gerais de serviço para motores padrão de baixa tensão”**. Technical report. 2006.

WILLIAM, H. Oh; WILLWERTH, Adam. **“Shaft grounding— A solution to motor bearing currents**, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Published in ASHRAE Transactions, v. 114, n. 2, 2008.