

ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DA CORRENTE EFICAZ EM MOTORES BLDC OPERANDO SOB FALTA DE FASE VISANDO AMENIZAR O DESGASTE DO MOTOR

Cesar Liberato*, Tiago Dezuo*, José de Oliveira*, Ademir Nied*

*Universidade do Estado de Santa Catarina (UESC) - Departamento de Engenharia Elétrica - Joinville - SC - Brasil
e-mail: cesarliberato@gmail.com, tiago.dezuo@udesc.br, jose.oliveira@udesc.br, ademir.nied@udesc.br

Resumo – Esse trabalho apresenta uma estratégia de redução de corrente eficaz das fases saudáveis para motores *brushless DC* (BLDC) operando em falha de abertura de fase, evitando a degradação do motor e permitindo o desligamento seguro. Após o diagnóstico de uma falha de fase aberta, através de um algoritmo capaz de detectar e identificar falhas e retornos de fases do motor BLDC em tempo real, uma ação corretiva dividida em três etapas é proposta. Primeiro, o modo de operação tradicional *Six-Step* com condução em 120° elétricos é alterado para um novo modo de operação que utiliza as duas fases saudáveis em condução de 180° elétricos para reduzir a perda de torque em falha. Segundo, é imposta uma forma trapezoidal para a referência de corrente em sincronismo com as tensões induzidas entre as fases saudáveis visando reduzir o nível de corrente e, conseqüentemente, melhorar a eficiência do motor. E terceiro, reduz-se a banda passante da malha de velocidade para reduzir a influência das oscilações de velocidade em falha no controlador. Os resultados experimentais apresentados mostram que o modo de operação com a estratégia de redução de corrente proposta possibilita uma redução aproximada de 25% na corrente eficaz e de 40% na variação de temperatura do motor, em comparação ao modo de operação usual do motor BLDC em falha de fase sem a estratégia proposta.

Palavras-chave – Controle Tolerante a Falhas, Detecção de Falta, Motor BLDC, Redução de Corrente e Retorno de Fase.

STRATEGY TO REDUCE EFFECTIVE CURRENT OF BLDC MOTORS UNDER OPEN-PHASE FAULT IN ORDER TO DECREASE MOTOR DAMAGE

Abstract – This paper presents a strategy to reduce the current of the healthy phases for brushless DC motors (BLDC) in open-phase fault, avoiding the degradation of the motor and allowing the safe shutdown. After an open-phase fault diagnosis, through an algorithm capable of detecting and identifying faults and phase returns of the BLDC motor in real time, a corrective action divided in three-steps is proposed. First, the traditional 120° Six-Step operating method is changed for a switching

strategy using the two healthy phases in 180° driving to reduce the loss of torque at failure. Second, a trapezoidal shape is imposed for the current reference in synchronism with the induced voltages between the healthy phases in order to reduce motor current level and hence improve the motor efficiency. And third, the bandwidth of the speed control loop is reduced to mitigate the influence of speed oscillations due to the failure on the controller. The experimental results show that the operation method with the proposed strategy to reduce current motor allows a reduction of approximately 25% in the effective (RMS) current and of 40% in the motor temperature variation compared to the usual operating method under phase failure without the proposed strategy.

Keywords – BLDC Motor, Fault-Tolerant Control, Phase Fault Detection, Phase Return Detection.

NOMENCLATURA

V_a, V_b, V_c	Tensões nos terminais a, b e c .
I_a, I_b, I_c	Correntes nas fases a, b e c .
E_a, E_b, E_c	Tensões induzidas nas fases a, b e c .
R_s	Resistência de fase.
L	Indutância própria de fase.
T_e	Torque elétrico total.
T_l	Torque de carga.
P	Número de polos.
k	Constante de fluxo.
ω	Velocidade angular do rotor.
B	Coefficiente de atrito viscoso.
J	Momento de inércia.
V_{DC}	Tensão DC no barramento do inversor.
θ_r	Posição mecânica do rotor.

I. INTRODUÇÃO

Os motores síncronos *brushless DC* (BLDC) podem ser encontrados em aplicações robóticas, aeroespaciais, veículos elétricos, processos de manufatura, acionamento de servomotores, dentre outras aplicações onde se requer alta propulsão e rendimento graças à maior densidade de potência e torque por Ampère que podem ser alcançados com esses motores [1], [2].

O emprego de sistemas de acionamentos robustos e confiáveis nos motores BLDC em muitas dessas aplicações é essencial. Por exemplo, um sistema de acionamento e controle tolerante a falhas em motores BLDC utilizados em drones pode evitar grandes perdas materiais e reduzir também o risco

Artigo submetido em 17/05/2018. Primeira revisão em 18/07/2018. Aceito para publicação em 23/10/2018 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2018.4.0008>

de acidentes durante uma emergência de falta de fase através de uma aterrissagem segura [3].

Entre as possíveis falhas em motores BLDC é possível citar: fase em aberto; fase em curto; irregularidades no entreferro; problema na excentricidade do motor; rolamentos; dentre outras [4]. As falhas de fase aberta representam de 30% a 35% das situações que prejudicam o funcionamento normal do motor e são causadas normalmente por defeito nos conectores do motor, falha nos transistores do inversor, rompimento do cabo, dentre outros motivos [5]. Em tal situação o motor passa a operar apenas com duas fases. Diante do exposto, há grande motivação para o desenvolvimento de soluções com o objetivo de tornar o acionamento do motor BLDC tolerante a falhas de circuito aberto para manter a operação em níveis seguros por tempo suficiente para o desligamento da carga sem danos.

Para o desenvolvimento de um controle tolerante a falhas para o motor BLDC, são necessárias: (i) a detecção e identificação (diagnóstico completo) da falha e (ii) estratégias de acionamento para reparação completa ou parcial do sistema [6]. Recentemente, um dos enfoques de pesquisa na área de tolerância a falhas em motores tem sido a implementação de redundâncias (e.g. inversores com braços extras) [7] [8]. Entretanto, tais técnicas trazem desvantagens, como a complexidade do projeto, alto custo de manutenção e implementação, elevado volume, dentre outras.

Em [9] tem-se um estudo do torque em motores BLDC quando em falta de fase e é apresentado um modo de operação para motores BLDC operando em falta de fase. O estudo do torque de motores BLDC em falta de uma das fases mostra que há uma redução de um terço na potência de saída quando operado em malha aberta [9]. O modo de operação apresentado em [9] utiliza as fases saudáveis do motor em condução de 180° elétricos para corrigir a falta de torque da fase em falta. Um desafio verificado ao implementar o modo de operação em motores BLDC trifásicos sem redundância é que, operando com apenas duas fases, tem-se torque e velocidade oscilatórios devido à ausência de fluxo/torque quando o rotor se encontra na posição elétrica do enrolamento em falta. Para compensar a perda de um terço do torque durante a falha, um controle tradicional em cascata tende a impor uma referência muito alta na malha de corrente para compensar a ausência de fluxo na posição elétrica da fase em aberto, aumentando o valor eficaz da corrente do motor. Isso ocasiona uma maior deterioração das bobinas saudáveis ou até mesmo ultrapassa os limites de corrente de projeto do motor.

Motivado pela necessidade de um acionamento que mantém a operação segura de motores BLDC sob falta de fase, este artigo apresenta uma estratégia para o modo de operação apresentado em [9] que minimiza o valor eficaz da corrente nesta situação. Como contribuição principal, a estratégia resulta em redução das correntes eficazes nas fases saudáveis e não requer redundâncias estruturais, tendo fácil implementação via *software* e baixo custo computacional. A ideia principal é impor um formato de corrente trapezoidal sincronizado com a tensão induzida das fases saudáveis do motor BLDC, fazendo com que o controlador não aplique corrente no motor nas posições elétricas onde não há fluxo e, conseqüentemente, onde não é possível produzir torque. A diminuição dos valores eficazes das correntes das fases

saudáveis do motor BLDC refletem diretamente nos valores finais de temperatura do motor.

De modo a realizar o acionamento experimentalmente, propõe-se uma técnica de detecção de falta de fase, adaptada de [5]. Além disso, o algoritmo de detecção conta com uma extensão para a constatação de um eventual retorno da fase, em caso de reparação da causa da falha, por exemplo. A detecção de retorno permite que o motor possa voltar a trabalhar com as três fases equilibradamente reduzindo assim qualquer perigo de sobreaquecimento.

A metodologia proposta é validada tanto via simulação quanto experimentalmente.

II. O MOTOR BLDC

Os motores do tipo BLDC são motores com ímãs permanentes no rotor (e portanto síncronos), com forma de onda induzida (BEMF, do inglês *back electromotive force*) preferencialmente trapezoidal e sem escovas (*brushless*) para comutação pois a comutação nesses motores é realizada eletronicamente e, normalmente, através de uma ponte inversora trifásica no modo de operação com seis-pulsos (*Six-Step*).

A. Modelagem dos Motores BLDC

O modelo matemático do motor BLDC consiste em duas dinâmicas: a elétrica e a mecânica. Para um motor BLDC trifásico equilibrado tem-se as dinâmicas dadas por [10]

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + (L - M) \begin{bmatrix} dI_a/dt \\ dI_b/dt \\ dI_c/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = T_l + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

onde a BEMF de cada fase é dada por

$$E_a = k \omega f(\theta_e) \quad (3)$$

$$E_b = k \omega f(\theta_e + 120^\circ) \quad , \quad \theta_e = (P/2)\theta_r \quad (4)$$

$$E_c = k \omega f(\theta_e - 120^\circ) \quad (5)$$

e $f(\cdot)$ é a onda trapezoidal unitária presente na tensão induzida no BLDC. Além disso, é suposto que as indutâncias não variam em função da posição do rotor e portanto o torque de relutância pode ser considerado desprezível, desacoplando as dinâmicas elétricas de cada fase [11].

B. Modo de Operação Six-Step em Motores BLDC

Dentre as diversas formas existentes de acionamento de motores do tipo BLDC, o modo de operação *Six-Step* é a predominante devido à sua fácil implementação e ao baixo custo computacional requerido.

O modo de operação *Six-Step* tem como base a predefinição do formato das correntes de fase com o intuito de aproveitar o conhecimento do formato trapezoidal da BEMF nos motores BLDC [11]. A técnica divide o ângulo elétrico do motor em seis regiões, onde cada região possui uma combinação de comutação das chaves do inversor previamente definida. O modo de operação *Six-Step* ainda pode ser definido como 120° ou 180°, de acordo com o ângulo de condução imposto para as correntes nas bobinas. Entre as duas possibilidades,

a comutação através do *Six-Step* em 120° de condução é a mais utilizada, pois possui mais facilidade de implementação, não é necessário implementar um controle vetorial, o controle *Sensorless* não necessita de modelos sofisticados, perdas de comutação são reduzidas pois apenas duas chaves são acionadas em cada região de comutação. Porém o modo de operação da chave inversora através do *Six-Step* em condução de 120° pode resultar em uma elevada pulsação de torque entre as trocas de regiões e o conteúdo harmônico das correntes normalmente é prejudicado devido ao formato da corrente [11].

Na Figura 1 é apresentado o modo de operação *Six-Step* com condução de 120° elétricos. Note que, tomando a fase *a* como exemplo na região 1, a chave é fechada durante o patamar positivo da tensão induzida E_a (E_p - Tensão induzida de pico) e durante o patamar negativo de E_b ($-E_p$). Logo, a corrente I_a será positiva (atingindo seu valor de pico I_p após um breve transitório) e a corrente I_b será negativa ($-I_p$) durante esse período de comutação. Com isso, a potência fornecida por cada fase durante o regime permanente desse período de comutação será um valor constante igual a

$$P_a = E_p I_p \quad (6)$$

$$P_b = -E_p \cdot (-I_p) = P_a \quad (7)$$

$$P_{total} = P_a + P_b = 2E_p I_p. \quad (8)$$

Através de algumas manipulações algébricas nas equações de potência em (8) e da dinâmica mecânica em (2), é possível definir o torque fornecido pelo motor durante um período de comutação qualquer como

$$T_e = \frac{1}{\omega} \frac{P}{2} (E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c). \quad (9)$$

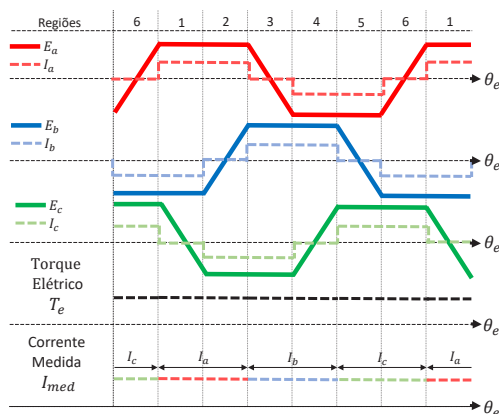


Fig. 1. Formas de onda das tensões trapezoidais, correntes, torque e corrente observada pelo controlador de um motor BLDC no modo de operação *Six-Step* com condução em 120° elétricos.

C. Máxima Eficiência de Operação

A condição de máxima eficiência dos motores BLDC pode ser obtida pela análise da (9). Dessa equação percebe-se que o torque é proporcional à soma dos produtos das tensões induzidas de fase E_a , E_b e E_c pelas correntes de fase I_a , I_b e I_c . Logo, a condição de máxima eficiência é obtida quando esta soma de produtos é máxima com o mínimo de corrente possível. Do conceito de potência elétrica sabe-se que essa condição ocorre quando os seguintes critérios são satisfeitos [12]:

- as correntes de fase estão perfeitamente alinhadas com as tensões induzidas de fase;
- as correntes têm o mesmo formato, ou seja, o mesmo conteúdo harmônico das BEMFs.

Portanto, ao impor ao motor correntes com o mesmo formato e alinhadas às tensões induzidas, garante-se a máxima eficiência de operação.

D. Controle Tradicional em Cascata de Velocidade e Torque

A malha de controle de velocidade considerada neste artigo é acoplada em cascata com o controle de torque/corrente de acordo com a Figura 2. A velocidade medida ou estimada ω_{med} é comparada com sua referência desejada ω_{ref} para gerar um sinal de erro (e_ω) de referência de velocidade. De modo a regular ω_{med} , a saída do controlador de velocidade C1 é utilizada como referência para a corrente, pois esta é proporcional ao torque através da constante de fluxo k . A referência de corrente I_{ref} é então comparada com a atual corrente no motor I_{med} para gerar um sinal de erro (e_I) de referência de corrente que possibilitará fechar a malha interna através do controlador C2. Por sua vez, o controlador C2 atua diretamente na razão cíclica d do inversor [5].

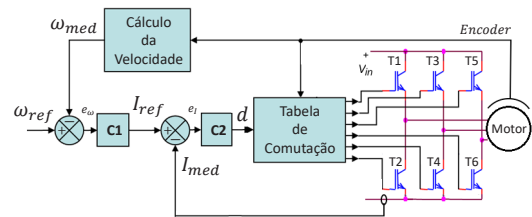


Fig. 2. Malha de controle em cascata de velocidade e torque/corrente utilizada em motores BLDC.

Como no modo de operação *Six-Step* em condução de 120° elétricos apenas duas fases do motor entram em condução ao mesmo tempo, a corrente fluindo através do motor (I_{med}) é a mesma medida no *link* CC do inversor. Na Figura 1 pode-se observar as seis regiões de comutação possíveis. A Tabela I, adaptada de [5], apresenta o valor das correntes observadas pelo controlador para cada região (ou setor) de comutação.

TABELA I

Correntes Analisadas pelo Controlador com *Six-Step* em 120°

Posição do eixo	Região	I_a	I_b	I_c
$0^\circ < \theta \leq 60^\circ$	1	I_{med}	$-I_{med}$	
$60^\circ < \theta \leq 120^\circ$	2	I_{med}		$-I_{med}$
$120^\circ < \theta \leq 180^\circ$	3		I_{med}	$-I_{med}$
$180^\circ < \theta \leq 240^\circ$	4	$-I_{med}$	I_{med}	
$240^\circ < \theta \leq 300^\circ$	5	$-I_{med}$		I_{med}
$300^\circ < \theta \leq 360^\circ$	6		$-I_{med}$	I_{med}

III. ACIONAMENTO DE MOTORES BLDC COM FALTA DE FASE

Considere o motor BLDC com o modo de operação *Six-Step* em condução de 120° elétricos, como na seção anterior, porém com a falta de uma das fases. A Figura 3 apresenta as principais formas de onda do motor nesta situação (assumindo a falta da fase *c*) sem qualquer tratamento em relação à falha. Observa-se que das seis regiões de comutação, apenas duas

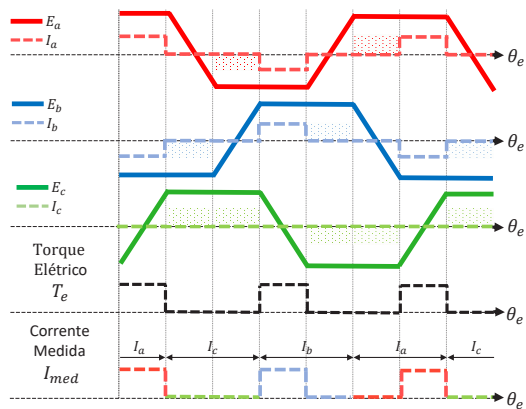


Fig. 3. Formas de onda de tensões induzidas, correntes, torque e corrente observada pelo controlador de um motor BLDC com falha na fase *c* com o modo de operação *Six-Step* em condução de 120° elétricos.

regiões produzem torque, ou seja, o motor possui torque nulo na maior parte do tempo na sua operação. Através do gráfico é possível dizer que o motor perde aproximadamente dois terços do torque médio quando comparado com o acionamento em condições normais, conforme Figura 1. Outro problema desta situação é a larga faixa do ciclo elétrico sem torque, o que pode ocasionar a parada definitiva do motor para cargas com pouca inércia quando o movimento cessar em uma posição elétrica sem torque.

A situação apresentada anteriormente pode ser atenuada adequando-se o modo de operação no acionamento de acordo com as fases saudáveis do motor BLDC como, por exemplo, realizar o acionamento do motor BLDC através de um modo de operação da ponte inversora que utilize as fases saudáveis em condução de 180° elétricos [9], como apresentado na Figura 4.

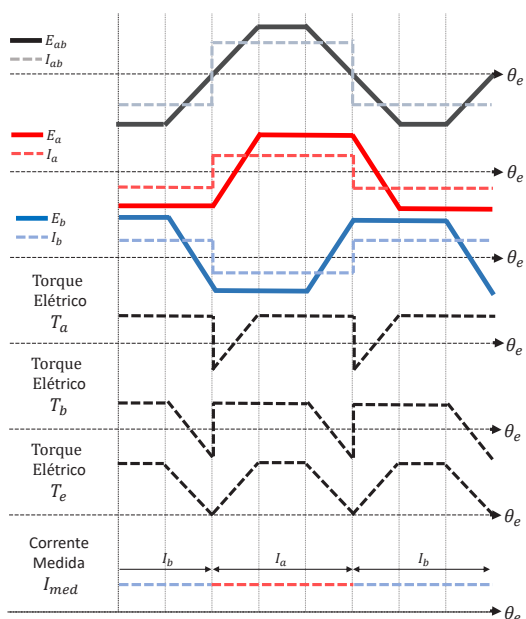


Fig. 4. Formas de onda de tensões trapezoidais, correntes, torque e corrente observada pelo controlador de um motor BLDC com falha na fase *c* com o modo de operação *Six-Step* em condução de 180° elétricos.

Para aplicar a estratégia apresentada na Figura 4, é preciso garantir o sincronismo da corrente de linha I_{ab} com a BEMF de linha E_{ab} (entre as fases saudáveis do motor). Observa-se na figura que há torque negativo nas fases *a* e *b*, porém a soma dos torques (total resultante) é sempre maior ou igual a zero ao utilizar o modo de operação *Six-Step* com condução em 180° elétricos. Isso resulta em intervalos de torque reduzido, incluindo um instante de torque nulo. Como consequência deste torque variável tem-se uma oscilação de velocidade no motor. Entretanto, o modo de operação apresentado permitiu reduzir a perda do torque médio de dois terços para um terço (valor calculado através da geometria das curvas de torque).

Os intervalos de torque reduzido e nulo durante o ciclo elétrico afetam diretamente a malha de controle apresentada na Figura 2. Para ilustrar esta situação, na Figura 5, tem-se uma simulação numérica de um motor operando com falta na fase *c* utilizando o modo de operação apresentado em [9]. Os dados do motor utilizado para gerar as simulações e os resultados experimentais deste artigo são apresentados na Tabela II. O torque de carga aplicado na simulação foi de 0,45 N.m, que representa 50% do torque máximo do motor.

TABELA II
Parâmetros do Motor Considerado

Parâmetro	Valor
R_s	3,5 Ω
L	52 mH
k	0,43 V.s/rad
I_{max}	2,5 A
ω_{nom}	4000 rpm
P	4
J	$1,1 \times 10^{-3}$ kg.m ²
B	$0,72 \times 10^{-3}$ N.m.s

Para os controladores *C1* e *C2* apresentados na Figura 2 foram consideradas as funções de transferências simplificadas

$$\frac{e_{\omega}(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{2k}{J} \frac{1}{s + \frac{B}{J}} \quad (10)$$

$$\frac{e_I(s)}{d(s)} = \frac{V_{DC}}{2} \frac{1}{s + \frac{R_s}{L}} \quad (11)$$

que representam a função de transferência do erro de velocidade pela corrente de referência e a função de transferência do erro de corrente pela razão cíclica do inversor, respectivamente. Os controladores *C1* e *C2* projetados e implementados nesse trabalho possuem: um poló na origem para zerar o erro de referência em regime; um zero para anular o polo da função de transferência permitindo obter uma banda útil maior e transformar a malha de laço aberto em uma curva com decaimento de 20db por década durante toda a banda de frequência; e um ganho para ajustar ganho nulo em uma determinada frequência de corte. Os controladores projetados são apresentados a seguir:

$$C1 = K_{C1} \frac{s + \frac{B}{J}}{s} \quad (12)$$

$$C2 = K_{C2} \frac{s + \frac{R_s}{L}}{s} \quad (13)$$

onde os valores de K_{C1} e K_{C2} foram definidos em 2,98 e 0,44 viabilizando uma frequência de corte para o sistema em malha fechada de 1kHz para *C1* e de 5kHz para *C2*.

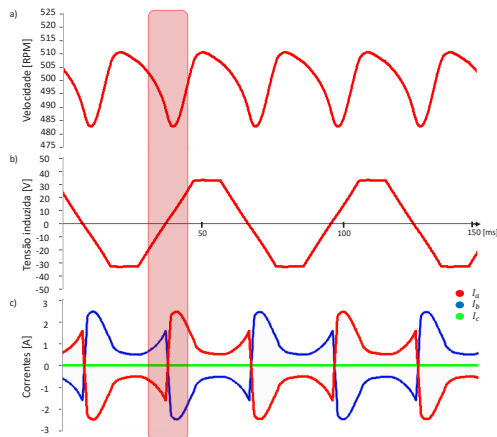


Fig. 5. Simulação numérica de um motor BLDC em condição de falha da fase c com o modo de operação *Six-Step* com condução em 180° elétricos: a) velocidade; b) tensão induzida de fase E_{ab} ; c) correntes de fase I_a , I_b e I_c .

Observa-se na Figura 5 a malha de controle em cascata atuando na correção do erro de velocidade ocasionado pela falta do torque da bobina c . Quando o rotor está na posição elétrica do eixo magnético da fase c (área destacada na figura), o motor não produz torque para balancear o torque de carga e então o controlador atua elevando as correntes das fases a e b para aumentar o torque elétrico devido à falta do fluxo da bobina da fase c , porém os fluxos presentes das fases a e b , conforme Figura 5.b não possuem um valor significativo na região para gerar o torque necessário, pois estão no momento da reversão da onda trapezoidal. O resultado dessa situação é uma corrente eficaz de 1,31A nas fases a e b , conforme Figura 5.c. Sabendo-se que o valor eficaz da corrente do motor sem falha e com os mesmos 50% de carga é de 0,51A, nota-se um aumento de aproximadamente 2,5 vezes na corrente do motor devido à falta da fase.

O aumento no valor eficaz da corrente da Figura 5 ocasiona aquecimento na temperatura das bobinas saudáveis do motor, visto que a corrente está diretamente ligada às perdas por efeito *joule* no motor e esta representa grande parte das perdas elétricas em um motor elétrico, acompanhado das perdas por histerese. O comportamento da velocidade é ondulatório, como esperado, devido à falta de fluxo da bobina da fase c . Pode-se observar também na Figura 5.a uma variação de velocidade ($\Delta_{velocidade}$) de aproximadamente 30 rpm.

IV. ESTRATÉGIA DE REDUÇÃO DE CORRENTE PROPOSTA

A estratégia de redução de corrente proposta nesse trabalho para complementar o modo de operação apresentado em [9] tem dois objetivos principais: (i) tornar o controlador menos sensível as oscilações de velocidade, evitando com isto o aumento demasiado da corrente quando o rotor está nas posições em que o torque é afetado pela falta e (ii) impor à corrente mesmo formato da tensão induzida E_{ab} , em sincronia com esta, atingindo assim a melhor eficiência do motor em falta. A estratégia apresentada aqui é comumente utilizada em estratégias de correção de fator de potência, no sentido de que busca-se alinhar corrente e tensão, resultando em um fator de potência próximo do unitário [12]. A Figura 6 apresenta a

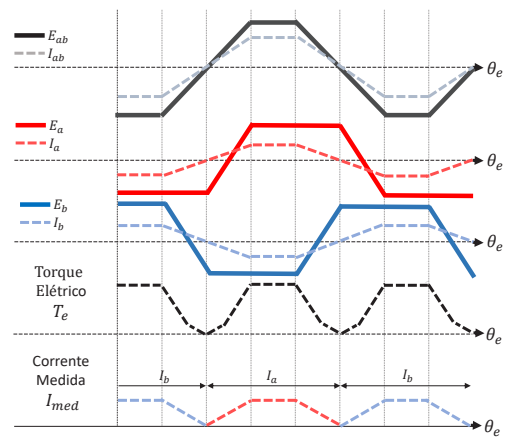


Fig. 6. Formas de onda de tensões induzidas, correntes, torque e corrente observada pelo controlador de um motor BLDC com falha na fase c com o modo de operação *Six-Step* em condução de 180° elétricos utilizando a estratégia proposta.

estratégia proposta nesse artigo.

Visando reduzir a interferência das oscilações de velocidade vista pela malha de controle de corrente, o controlador $C1$ da Figura 2 é substituído por um novo controlador $L1$ com uma banda passante reduzida de uma década em comparação a $C1$. Isso resulta em uma ação de controle de velocidade mais lenta, reduzindo a influência das oscilações em I_{ref} . O diagrama de blocos da malha de controle proposta é apresentado na Figura 7. Neste diagrama é possível observar que I_{ref} é sincronizada com E_{ab} ao ser multiplicada por uma onda trapezoidal unitária com mesmo formato e em fase com E_{ab} . O aumento de eficiência resultante desta sincronização se reflete em menores valores eficazes de corrente nas bobinas saudáveis do motor BLDC, reduzindo sua degradação.

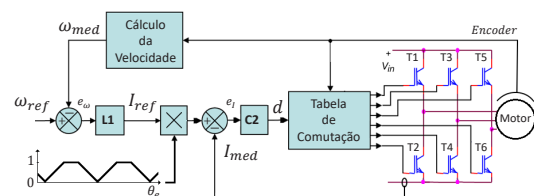


Fig. 7. Malha de controle com imposição do formato de corrente.

A Figura 8 apresenta os resultados de simulação para a estratégia proposta, as comparações aqui apresentadas são feitas com relação a Figura 5. Analisando as figuras observa-se que a forma de onda da velocidade foi alterada em relação ao caso sem a estratégia, porém a amplitude da oscilação foi semelhante. Utilizando a estratégia proposta obteve-se uma alteração do $\Delta_{velocidade}$ de 30 rpm para 37 rpm, um aumento de aproximadamente 1,23 vezes. Nota-se também uma pequena alteração no comportamento da tensão induzida no motor, pois esta é função da derivada da velocidade.

Ainda na Figura 8, observa-se que a corrente do motor apresenta um formato trapezoidal em sincronia com a tensão induzida E_{ab} . O valor eficaz da corrente obtido com a estratégia proposta foi de 0,85A, que é 35% menor quando

As bandas passante dos controladores utilizados neste trabalho ficaram então definidos como: 0-1 kHz ($C1$), 0-5 kHz ($C2$) e 0-100 Hz ($L1$).

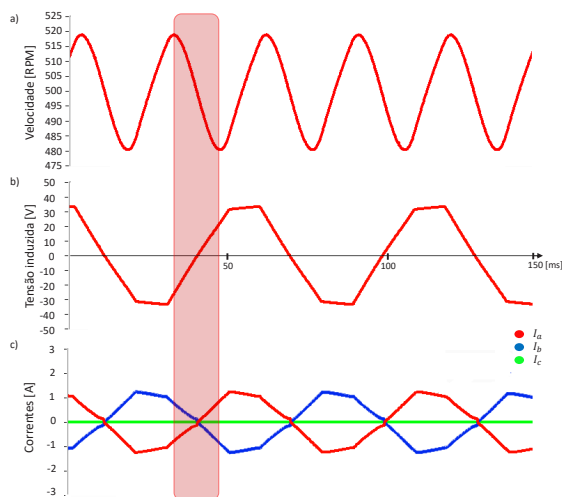


Fig. 8. Simulação numérica de um motor BLDC em condição de falha da fase c com o modo de operação *Six-Step* com condução em 180° elétricos e com a estratégia de redução de corrente proposta: a) velocidade; b) tensão induzida de fase E_{ab} ; c) correntes de fase I_a , I_b e I_c .

comparado com o resultado sem a estratégia. Esta redução significativa do valor eficaz permite a operação do motor em uma condição de falta de fase por um tempo maior durante uma emergência, caso necessário, pois a menor dissipação de energia preservará as bobinas saudáveis do motor BLDC.

V. ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE FALTA E RETORNO DE FASE

Para implementação da estratégia discutida na seção anterior é necessário um sistema rápido de detecção e diagnóstico de falta. Isso evita que o motor perca energia cinética, pare ou seja danificado, lembrando que o funcionamento do motor BLDC no modo de operação *Six-Step* em condução de 120° elétricos é altamente prejudicial ao motor com a falta de uma fase, conforme Figura 3.

A técnica de detecção de falhas de circuito aberto proposta teve como base o método apresentado em [5]. O algoritmo de detecção proposto compara I_{med} com um limiar de corrente correspondente a 5% de sua corrente de referência I_{ref} . Se I_{med} for menor do que 5% de I_{ref} por um tempo T_{falha} preestabelecido pelo programador, então uma falta de fase é detectada. A técnica de detecção é detalhada no Algoritmo 1, onde $T_{analise}$ armazena o período de tempo durante o qual a corrente do motor ficou abaixo de 5% da corrente de referência e Δt é o intervalo de tempo entre execuções consecutivas do algoritmo.

Algoritmo 1 Detecção de falta de fase

```

1: if ( $I_{med} < 5\%I_{ref}$ ) then
2:    $T_{analise} \leftarrow T_{analise} + \Delta t$ 
3:   if ( $T_{analise} > T_{falha}$ ) then
4:     SISTEMA EM FALHA
5: else
6:    $T_{analise} \leftarrow 0$ 
7:   SISTEMA NORMAL

```

Após detectar a existência de uma falta de fase, o algoritmo precisa então identificar a localização desta, ou seja, distinguir

qual a fase defeituosa. Sabendo que em cada região apenas duas fases conduzem simultaneamente, no momento em que a falha é detectada tem-se duas fases candidatas a estar com falha. Então basta ativar a região seguinte da sequência, onde uma das chaves não conduz e observar se a detecção se mantém ou não. Por exemplo, suponha que a primeira detecção ocorreu na região 1 (vide Tabela I) onde as fases a e b deveriam conduzir. Ativando-se em seguida a região 2, onde as fases a e c deveriam conduzir, se o Algoritmo 1 voltar a acusar falha, então a fase a está defeituosa. Se não, então o problema estava na fase b .

Devido aos problemas de torque variável e aquecimento apresentados pelo motor BLDC operando em falta de fase, é recomendado seu desligamento ou retorno às condições normais de operação o mais breve possível. Ocasionalmente, as falhas de fase aberta em motores BLDC podem ter sido detectadas por problemas mais triviais e de fácil reparação, como: defeito nos conectores do motor; rompimento do cabo de energia ou do cabo dos sinais de controle; falsa detecção de falha; dentre outros motivos que permitem a reparação, se for seguro e possível, com o motor em operação.

Visando o retorno das três fases do motor após o reparo da falha sem a necessidade do desligamento do motor, é proposto uma técnica para detecção do retorno da fase do motor. A ideia é monitorar a corrente da fase em falta. Para que a técnica perceba o retorno da corrente da fase em falta, mantém-se a chave inferior desta fase do inversor acionada (permitindo condução). Caso seja detectada corrente na fase falha por um período maior do que o especificado pelo programador, o modo de operação retorna para as condições normais (*Six-Step* trifásico em condução de 120° elétricos).

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um motor BLDC com os parâmetros apresentados na Tabela II foi utilizado para validação da estratégia de redução de corrente apresentada e também para validação do algoritmo de detecção de falta e de retorno de fase. Os resultados de ensaio apresentados na sequência foram obtidos com o equipamento de análise WT500 da fabricante Yokogawa.

A. Sistema de Detecção de Falta e Retorno de Fase

Foram realizados testes de detecção de falta de fase e retorno de fase para validar os algoritmos apresentados neste artigo. Utilizou-se um disjuntor para realizar a abertura e fechamento de uma das fases do motor de forma segura. Os testes foram realizados com o motor operando a 100 rpm em condições normais.

1) *Detecção de falta de fase:* A Figura 9 apresenta a alteração no formato das correntes de fase no momento da ocorrência da falha. A escolha do tempo para detecção de falha (T_{falha}) vem de um compromisso que varia conforme a aplicação e o motor, pois valores muito pequenos podem ocasionar falsas detecções de falha (ocasionada pelo próprio atraso do controlador no momento de seguir a referência de corrente) e valores muito grandes podem ocasionar a parada do motor antes da detecção pois o motor no momento da detecção se encontra em uma região sem torque elétrico. Para o motor sob teste, foi escolhido o valor de 5 ms.

2) *Deteção do retorno de fase:* A Figura 10 apresenta o retorno da fase do motor BLDC. O algoritmo, ao detectar corrente na fase considerada com falha, retorna rapidamente para o modo de operação normal, utilizando-se das três fases do motor com a comutação *Six-Step* com condução em 120° elétricos. Lembrando que a circulação de corrente pela fase defeituosa é possível, após a solução da falha, pois o algoritmo mantém a chave inferior desta fase sempre acionada.

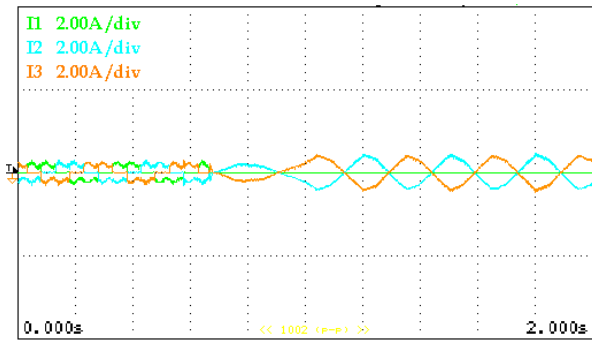


Fig. 9. Deteção e tratamento na falta de fase.

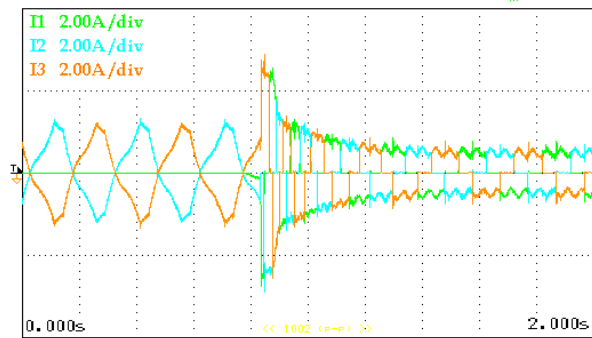


Fig. 10. Deteção e tratamento no retorno de fase.

B. Acionamento em Falta de Fase

Para validar a eficiência da estratégia de redução de corrente proposta, foram realizados testes comparativos entre três situações: o acionamento trifásico tradicional do motor sem falha de fase através do modo de operação *Six-Step* com condução em 120° elétricos; o acionamento sob falha de fase com a comutação das duas fases saudáveis com condução de 180° elétricos sem a estratégia de redução de corrente; e o acionamento sob falha de fase através da comutação das duas fases saudáveis com condução em 180° elétricos com a estratégia de redução de corrente proposta.

Os testes foram realizados com a referência de velocidade igual a 250 rpm. O torque de carga (T_l) utilizado em todos os testes foi de 0,48 N.m, o que representa aproximadamente 50% do torque máximo do motor. Os parâmetros analisados foram: eficiência; corrente eficaz e oscilação de velocidade ($\Delta_{velocidade}$).

1) *Motor em condições normais:* A Figura 11 apresenta o motor acionado em condições normais (com as três fases em funcionamento) com o modo de operação *Six-Step* com condução de 120° elétricos. A corrente eficaz do motor BLDC para o torque T_l aplicado é de 0,61A. Nesta situação, o motor apresentou um $\Delta_{velocidade}$ de aproximadamente 6 rpm.

2) *Acionamento sob falha de fase com a comutação das duas fases saudáveis com condução de 180° elétricos sem a estratégia de redução de corrente:* A Figura 12 apresenta as formas de onda da corrente quando o motor BLDC opera em falta de fase com o modo de operação apresentado em [9] sem qualquer estratégia de redução da corrente eficaz das fases saudáveis, apenas utilizando a comutação entre as duas fases saudáveis do motor em condução de 180° elétricos. Nesta condição de operação, a corrente eficaz em cada fase do motor para o torque T_l aplicado é de 1,34A. Portanto, o aumento da corrente eficaz na fase é de aproximadamente 120% quando comparado com o caso do motor em condições normais. Além disso, o motor apresentou um $\Delta_{velocidade}$ de aproximadamente 25 rpm. Fica claro que, mesmo elevando a corrente nos pontos onde não há fluxo significativo devido à falta da fase, não há produção significativa de torque para evitar a maior oscilação de velocidade.

3) *Acionamento sob falha de fase através da comutação das duas fases saudáveis com condução em 180° elétricos com a estratégia de redução de corrente proposta:* A Figura 13 apresenta as formas de onda da corrente do motor BLDC quando operando sob falha de fase com o modo de operação apresentado em [9] em conjunto com a estratégia de redução de corrente proposta. Esse valor representa uma

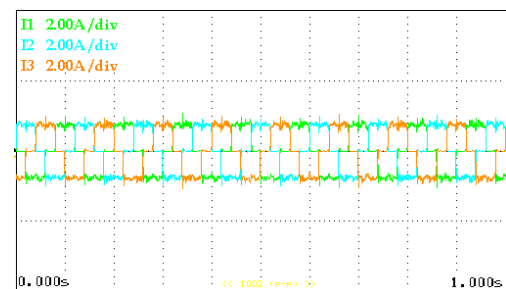


Fig. 11. Correntes BLDC em condições normais.

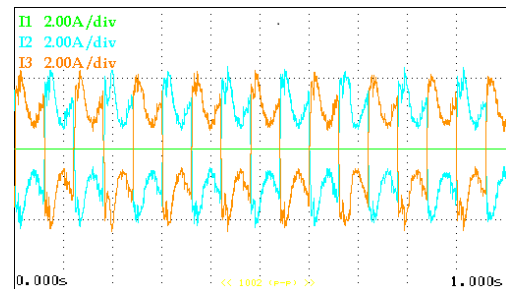


Fig. 12. Correntes BLDC sob falha sem a estratégia de redução de corrente.

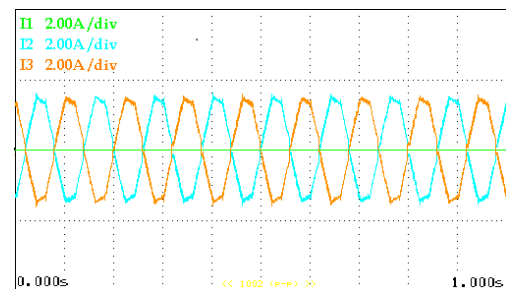


Fig. 13. Correntes BLDC sob falha com a estratégia de redução de corrente proposta.

redução da corrente eficaz de aproximadamente 27% quando comparado com o motor BLDC operando em falta sem a estratégia de redução de corrente. Além disso, o motor operando com a estratégia proposta apresentou um $\Delta_{velocidade}$ de aproximadamente 40 rpm.

Nota-se que há um compromisso entre um menor nível de corrente eficaz no motor e uma maior oscilação da velocidade, decorrente do novo formato do torque. Podemos concluir então que é possível reduzir os níveis da oscilação de velocidade para o motor operando em falta de fase quando se retira a restrição no formato de corrente, porém essa pequena redução na oscilação da velocidade irá ocasionar em um aumento significativo no valor da corrente do motor que poderá resultar em um aumento ainda mais significativo para a temperatura do motor, como será visto na próxima subseção desse artigo, pois as perdas *joules* de uma sistema então relacionadas com o quadrado da corrente no circuito.

A oscilação de velocidade ocasionada pela implementação da estratégia proposta pode ser aceitável em diversas aplicações onde a redução do valor eficaz da corrente é crucial para evitar a destruição das fases saudáveis do motor e também onde o comportamento oscilatório na velocidade seja aceito no momento emergencial da falta para garantir que o motor seja desligado de forma segura. Os testes apresentados foram realizados em baixa rotação, pois esta é a situação onde espera-se piores desempenhos da estratégia proposta. Isso porque a baixa rotação não é suficiente para armazenar energia inercial e, conseqüentemente, não ameniza a oscilação de velocidade. A oscilação de velocidade nos testes experimentais foi desprezível quando o motor operava em velocidades acima de 1000 rpm, por exemplo. Em sistemas onde tem-se uma quantidade grande de massa como veículos elétricos, por exemplo, essa oscilação de velocidade seria desprezível.

Um quadro comparativo entre os modos de operação, resumizando os resultados encontrados bem como as respectivas potências consumidas pelo motor, pode ser conferido na Tabela III.

TABELA III

Comparação entre o Acionamento sem a Estratégia de Redução de Corrente e com a Estratégia de Redução de Corrente

	Sem falta	Falta sem estratégia	Falta com estratégia
I_{RMS} Fase	0,61A	1,34A (+120%)	0,99A (+54%)
$\Delta_{velocidade}$	6 rpm	25 rpm	40 rpm
Potência Consumida	15W	24W	19W

C. Teste de Temperatura

Testes práticos foram realizados para verificar a influência da corrente eficaz do motor na temperatura das bobinas do motor BLDC. Os testes foram realizados na velocidade de 250 rpm com o torque T_l (50% do torque máximo do motor), mesma condição que resultou nos valores de corrente apresentados na Tabela III. Todos os testes foram realizados a partir da temperatura ambiente (23 °C) e com uma duração de 80 minutos.

A Figura 14 apresenta os resultados do teste de temperatura para cada condição de operação. Observa-se que o motor operando sem falta de fase alcançou uma variação de

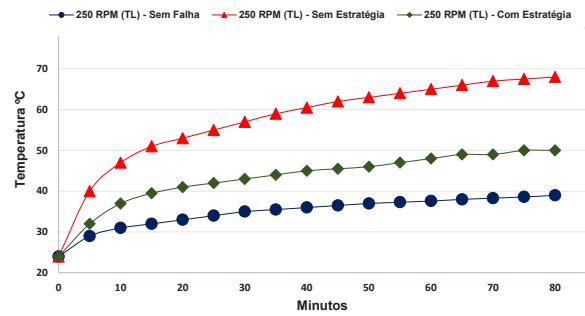


Fig. 14. Teste comparativo de temperatura com o motor operando: em condições normais; com falha de fase sem estratégia de redução de corrente; e com falha de fase com a estratégia de redução de corrente proposta.

temperatura (Δ_{temp}) de aproximadamente 16 °C ao final do teste. O motor operando em condições de falta de fase sem qualquer estratégia de redução de corrente obteve um Δ_{temp} de aproximadamente 44 °C (um aumento de 175% quando o motor opera sem falta de fase). O motor operando em condições de falta de fase com a estratégia de redução de corrente proposta obteve um Δ_{temp} de aproximadamente 26 °C (um aumento de 69% quando o motor opera sem falta de fase).

Os resultados do teste de temperatura demonstram a importância de dar atenção à corrente eficaz do motor quando se opera com uma falta de fase. Em situações onde o motor opera próximo do seu limite de potência, uma falta de fase poderá danificar as fases restantes do motor caso a falha não seja tratada adequadamente.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado o desenvolvimento de uma estratégia de redução de corrente para motores BLDC operando com falha de abertura de fase. A estratégia proposta tem baixo custo de implementação através de uma alteração no modo de operação *Six-Step* tradicional em condução de 120° elétricos para um modo de operação que realiza a comutação das duas fases saudáveis do motor em condução de 180° elétricos com um formato de corrente trapezoidal programada para as fases saudáveis do estator, sem necessidade de inversores especiais ou redundâncias. Ao impor o formato trapezoidal após o diagnóstico da fase falha foi verificado nos experimentos uma melhora significativa na eficiência do motor através da redução nos níveis de corrente eficaz e de temperatura das fases. Para realizar a conversão entre os modos de operação (entre o *Six-Step* 120° e o modo de operação com a estratégia de redução de corrente), foi apresentado de forma objetiva o algoritmo de monitoramento capaz de detectar e diagnosticar falhas e possíveis retornos de fase. A estratégia proposta foi testado experimentalmente, apresentando uma redução considerável nos valores de corrente eficaz e da temperatura do motor atingidos durante a falha. Assim, validou-se o objetivo de reduzir as variáveis danosas ao motor.

Apesar da estratégia proposta nesse trabalho considerar uma banda reduzida no controle de velocidade, não foi possível perceber prejuízo significativo no desempenho do sistema. Devido à perda de um terço da potência característica em um motor BLDC quando acionado através de apenas

duas fases, a estratégia para operar o motor BLDC com falha de fase é recomendada para cargas que não requerem, quando em falha, as condições de torque e de velocidade nominais simultaneamente, como por exemplo: cargas de ventilação (reduzir a rotação); tração elétrica (possibilitar a retirada de um veículo em uma rodovia); aterrissagem segura de um drone, visto que os principais objetivos da estratégia apresentada é o desligamento seguro da carga para se preservar as fases saudáveis do motor e evitar acidentes ocasionados pelo desligamento inesperado do motor BLDC após a falta de uma das fases.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, J. C. d. S. Fagundes, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 3, pp. 632–638, Maio 1992.
- [2] M. Bertoluzzo, G. Buja, R. K. Keshri, R. Menis, "Analytical study of torque vs. speed characteristics of PM brushless DC drives", in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1684–1689, Montreal, Canadá, 2012.
- [3] F. Aghili, "Fault-tolerant torque control of BLDC motors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 2, pp. 355–363, Fevereiro 2011.
- [4] R. Ribeiro, C. Jacobina, E. da Silva, A. Lima, "Sistema de acionamento de máquinas com estratégias de controle tolerante a faltas", *Revista Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, vol. 9, no. 1, pp. 45–52, 2004.
- [5] S. Neethu, V. Sreelekha, "Hysteresis controller based open phase fault tolerant control of BLDC motor drives", in *2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON)*, pp. 1–6, Thrissur, Índia, Janeiro 2014.
- [6] B. Mirafzal, "Survey of fault-tolerance techniques for three-phase voltage source inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5192–5202, 2014.
- [7] J. Fang, W. Li, H. Li, X. Xu, "Online inverter fault diagnosis of buck-converter BLDC motor combinations", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 355–363, Maio 2015.
- [8] R. S. Miranda, C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, M. B. R. Correa, L. A. S. Ribeiro, "Operação de um sistema de acionamento com motor de seis fases tolerante a faltas", *Revista Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, vol. 10, no. 1, pp. 15–22, 2005.
- [9] R. K. Jha, S. Garlapati, R. K. Keshri, G. Buj,

BLDC drive under VSI faults", in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1–6, Mumbai, Índia, Dezembro 2014.

- [10] J. Chiasson, *Modeling and High-Performance Control of Electric Machines*, John-Wiley & Sons Inc., Roboken, EUA, 2005.
- [11] R. Krishnan, *Electric Motor Drives - Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall, 2001.
- [12] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*, 2 ed., Kluwer Academic Publishers, Secaucus, EUA, 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Cesar Liberato nascido em 09/05/1991 em Tubarão, é engenheiro eletricitista (2016), mestre (2017) e, atualmente, aluno de doutorado na Universidade do Estado de Santa Catarina. Suas áreas de interesse são máquinas elétricas e eletrônica de potência.

Tiago Dezuó nascido em 24/08/1986 em Ivaiporã, é engenheiro eletricitista (2008), mestre (2010) e doutor em engenharia de automação e sistemas (2014) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade do Estado de Santa Catarina. Suas áreas de interesse incluem controle de sistemas chaveados, acionamento de máquinas elétricas e geração fotovoltaica.

José de Oliveira nascido em 15/06/1961 em Mandaguari, é engenheiro eletricitista (1986), mestre (1994) e doutor em engenharia elétrica (2000) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é Professor Titular da Universidade do Estado de Santa Catarina. Suas áreas de interesse são sistemas de controle, acionamento de máquinas elétricas e eletrônica de potência.

Ademir Nied nascido em 12/06/1962 em Santo Ângelo-RS, é engenheiro eletricitista (1987) pela Universidade Federal de Santa Maria, mestre em engenharia elétrica e informática industrial (1995) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Curitiba e Doutor em engenharia elétrica (2007) pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é professor associado da Universidade do Estado de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse são máquinas elétricas, acionamento elétrico, eletrônica de potência e energias renováveis.