

# Conversores Matriciais: Avaliação da Técnica de Modulação Vetorial para a Redução da Tensão de Modo Comum em Sistemas de Acionamento de Motores

André M. Alzamora\*. Hélder de Paula\*\*. Isabela O. Zapparoli\*. Luiz Henrique A. Barbosa\*.

\*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia

\*\*Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia,

Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 3N, 38408-100, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil  
(e-mails: andre.alzamora@outlook.com, drhelderdepaula@gmail.com, oliveirazapparoli@gmail.com, luizharantesb@gmail.com)

**Abstract:** In this paper, a modified modulation technique for the common mode voltage reduction in matrix converters is evaluated in several other aspects, such as the severity of the transient overvoltages which can be produced at the motor terminals. Such phenomenon takes place when the connecting cable between the inverter and the motor is sufficiently long, as in the case of the mining and off-shore oil extraction industries. In the study, simulations were developed in Matlab/Simulink employing sophisticated models for the converter, cable, motor and transformer, able to represent their behavior in a wide frequency range. From the obtained results, the advantages and drawbacks of the modulation method under investigation, in comparison to the traditional one, are highlighted and discussed. One of the conclusions is that the transient overvoltages are magnified when the alternative modulation is used, in contrast to the common mode reduction provided by it. This fact stresses undesired implications resulting from modulation control modifications for this converter and a trade-off between such aspects, which means that the intended application is what defines the feasibility of the investigated technique.

**Resumo:** Nesse artigo, uma técnica de modulação vetorial utilizada para mitigar a tensão de modo comum em conversores matriciais, baseada na substituição dos vetores nulos pelos rotativos, é avaliada sob outros aspectos, tais como a severidade das sobretensões transitórias que podem surgir nos terminais do motor. Este fenômeno se manifesta ao se utilizar cabos suficientemente longos entre o conversor e o motor, tal como ocorre nas indústrias de mineração e petrolífera. Para tanto, simulações foram realizadas no Matlab/Simulink empregando modelos sofisticados para a representação do conversor, cabo, motor e transformador, capazes de reproduzir o comportamento de tais elementos em uma ampla faixa de frequências. A partir dos resultados obtidos, as vantagens e desvantagens entre a modulação tradicional e a modificada são evidenciadas e discutidas. Pôde-se concluir, por exemplo, que as sobretensões transitórias são amplificadas ao se empregar a modulação em análise, em contraste com a redução da tensão de modo comum proporcionada por esta técnica. Isso evidencia as implicações indesejáveis decorrentes de mudanças no algoritmo de controle do chaveamento destes conversores e a relação de compromisso entre tais aspectos, de forma que a aplicação à qual o conversor será destinado serve de orientação para definir a viabilidade da utilização da técnica estudada.

**Keywords:** Matrix converter, common-mode currents, high frequency modeling, vector modulation, transient overvoltages, common-mode voltage.

**Palavras-chaves:** Conversor matricial, correntes de modo comum, modelagem para alta frequência, modulação vetorial, sobretensões transitórias, tensão de modo comum.

## 1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento dos dispositivos semicondutores de potência e dos controles digitais nas últimas décadas tem possibilitado o acionamento de motores elétricos de maneira cada vez mais eficaz e otimizada, proporcionando um controle de velocidade e conjugado bastante preciso. Tal progresso não apenas propiciou uma evolução nos inversores, que representam o dispositivo de acionamento mais utilizado, mas também contribuiu para o surgimento de novas topologias de conversores de frequência (Swamy e Kume, 2010). Nesse contexto, o conversor matricial tem sido estudado extensivamente nas últimas décadas, encontrando aplicações

extremamente importante nos anos recentes (Friedli e Kolar, 2012; Yaskawa America, Inc. 2020a, 2020b)

O conversor matricial é um conversor CA-CA composto por chaves bidirecionais que conectam diretamente a fonte à carga sem utilizar elementos armazenadores de energia. A obtenção da tensão e da frequência desejadas é realizada por meio do controle direto dessas chaves através de algoritmos específicos. Uma série de vantagens podem ser encontradas neste tipo de conversor em relação aos inversores: a ausência do link CC o torna mais leve e menos volumoso, reduzindo também o risco de falhas e custos com manutenção; além

disso, ele possibilita o controle do fator de potência de entrada independentemente da corrente na carga (Szczesniak, 2012).

A proposição deste conversor, incluindo sua designação como conversor matricial, foi realizada inicialmente em 1980, através de um trabalho do pesquisador Venturini (Venturini, 1980). No entanto, o alto preço e a ausência de dispositivos semicondutores bidirecionais de alto desempenho na época adiaram suas aplicações práticas e comerciais apenas para a última década (Swamy e Kume, 2010). Hoje já é possível encontrar conversores matriciais no mercado, tal como aquele mostrado na Fig. 1, produzido pela Yaskawa (Yaskawa America, Inc., 2015).

Apesar das vantagens citadas, o conversor matricial compartilha com o inversor os mesmos problemas associados às altas frequências de chaveamento, que incluem o surgimento da tensão de modo comum (TMC) e de sobretensões transitórias nos terminais do motor. A TMC é gerada naturalmente durante a operação de um conversor matricial ou inversor e pode ser definida como o potencial entre o neutro da carga ligada em estrela e o ponto de aterramento das tensões de alimentação. A TMC é responsável por produzir correntes transitórias de alta frequência, chamadas de correntes de modo comum (CMC), que fluem através das capacitâncias mútuas do cabo e também pelas capacitâncias intrínsecas do conversor, cabo e motor à terra. Em aplicações de acionamento de motores elétricos, estas correntes podem conduzir à redução da vida útil da máquina por falhas no rolamento (Araújo et al., 2015), interferências eletromagnéticas em equipamentos eletrônicos (Akagi e Shimizu, 2008) e também atuação indevida de relés de proteção de falta à terra (Jouanne, Zhang e Wallace, 1998). Nos casos em que os conversores empregam IGBTs e a conexão entre o conversor e o motor é realizada através de cabos suficientemente longos (a partir de 7 a 10 metros) (de Paula, 2008b), além da corrente de modo comum ser intensificada, surgem também sobretensões transitórias nos terminais do motor produzidas pelas reflexões das ondas no cabo de ligação (Persson, 1992; Kerkman, Leggate e Skibinsky, 1997; de Paula et al., 2009).



Fig. 1 - Conversor matricial comercial fabricado pela Yaskawa. (Fonte: Yaskawa America, Inc., 2015)

Existem na literatura algumas técnicas aplicadas a conversores matriciais que conseguem reduzir a tensão de modo comum através da modificação dos algoritmos que controlam as

chaves (Cha e Enjeti, 2003; Lee, Nguyen e Jung, 2005; Nguyen e Lee, 2012). Estes métodos, além de não incluírem a adição de estruturas externas ao conversor, podem ser facilmente implementáveis, pois se encontram apenas em nível de *software*. Um destes métodos, baseado na modulação direta vetorial, consiste em substituir a utilização dos vetores nulos pelos vetores rotativos na síntese do vetor de referência (Espina et al., 2014), apresentando um excelente resultado em termos da redução da tensão de modo comum. No entanto, uma análise mais profunda desta técnica deve ser realizada, principalmente no que tange às aplicações que utilizam cabos longos na ligação entre o conversor matricial e o motor, pois, apesar de ser vantajosa no que se refere à redução da tensão de modo comum, as sobretensões transitórias nos terminais do motor podem ser intensificadas, como efeito colateral.

Para analisar os fenômenos em foco (correntes de modo comum, sobretensões transitórias e quaisquer outros eventos de alta frequência) através de simulações computacionais, são necessários modelos capazes de reproduzir o comportamento dos diversos componentes do sistema em uma ampla faixa de frequências, isto é, desde as frequências de unidades ou dezenas de Hz, correspondentes à velocidade de operação da máquina, até as frequências de vários MHz. Na faixa de várias unidades e dezenas de kHz situam-se as componentes harmônicas da tensão não-senoidal (PWM) produzida pelo conversor; na ordem de algumas centenas de kHz encontram-se as oscilações das tensões e correntes devido às reflexões de onda nos terminais do cabo; por fim, na faixa de MHz localizam-se as componentes associadas aos rápidos tempos de subida dos pulsos da forma de onda PWM. Neste cenário, os modelos dos equipamentos que compõem o sistema de acionamento devem incluir os principais acoplamentos capacitivos intrínsecos existentes nestes dispositivos e, no caso do cabo, reproduzir a natureza distribuída dos seus parâmetros e sua variação com a frequência, além das impedâncias de modo comum e de modo diferencial associadas (de Paula, 2009), visto que as sobretensões transitórias manifestam-se no modo diferencial, ao passo que as correntes de modo comum circulam, evidentemente, neste modo.

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é analisar criticamente o método para reduzir a tensão de modo comum em conversores matriciais que se baseia na substituição dos vetores nulos pelos rotativos na modulação direta por espaço vetorial, apresentando, em relação a outros trabalhos encontrados na literatura, os seguintes diferenciais/aperfeiçoamentos: (i) avaliação dos seus efeitos também no que se refere às características da sobretensão transitória gerada nos terminais do motor, visando aplicações em cabos longos, amplamente encontradas em atividades de mineração e extração de petróleo; (ii) análise não apenas do perfil da TMC gerada pelo conversor associada à técnica de modulação empregada, mas também da corrente de modo comum gerada por ela, circulando pelo aterramento do sistema; (iii) simulação da tensão que surge no eixo do motor para ambos os métodos e, para o cumprimento dos itens acima, (iv) emprego de modelos adequados para o estudo de fenômenos transitórios/alta frequência para representar o transformador, o cabo, o motor e o conversor matricial, assegurando que os resultados simulados sejam bastante fidedignos à realidade.

## 2. CONVERSOR MATRICIAL

O conversor matricial é um conversor de estágio único que consiste em uma matriz  $m \times n$  de chaves bidirecionais, cada uma composta por dois IGBTs e dois diodos, que conectam diretamente cada fase  $m$  da fonte de tensão à cada fase  $n$  da carga. Em sistemas trifásicos, este conversor é composto por nove chaves que permitem conectar qualquer uma das fases da carga em qualquer uma das fases da fonte de tensão de entrada. Normalmente, utiliza-se um filtro na entrada do conversor no intuito de mitigar as componentes de alta frequência nas correntes de entrada e reduzir o impacto de natureza harmônica na rede de alimentação (She et al., 2009). A Fig. 2 exibe a estrutura de um conversor matricial. As tensões e correntes na entrada do conversor são designadas por letras maiúsculas (A, B e C), enquanto que na saída elas são denotadas por letras minúsculas (a, b e c).

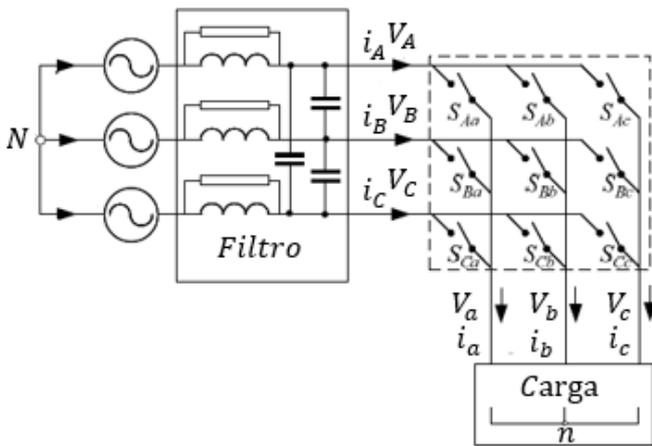


Fig. 2 - Estrutura de um conversor matricial com filtro de entrada. (Fonte: Autores)

Diversas estratégias de controle das chaves para os conversores matriciais têm sido apresentadas na literatura (Rodriguez et al., 2012). Um dos métodos mais eficientes e utilizados é o *Space Vector Direct Modulation* (SVDM) que utiliza a abordagem vetorial para sintetizar as tensões de saída de referência e as correntes de entrada de referência (Huber e Borojevic, 1995).

### 2.1 Space Vector Direct Modulation (SVDM)

Considerando que as fases da entrada não podem ser curto-circuitadas e que nenhuma das fases da saída pode ficar desconectada, ter-se-ão 27 possíveis configurações de chaveamento, conforme mostra a Tabela 1. Para cada um destes estados de chaveamento possíveis, existe um vetor associado no plano vetorial de tensão de saída e corrente de entrada (Fig. 3). Os vetores da tensão de saída e corrente de entrada de números  $\pm 1$  a  $\pm 9$  são chamados de vetores ativos e possuem direções fixas, enquanto que suas magnitudes dependem dos valores instantâneos da tensão de entrada e da corrente de saída, respectivamente. Eles são produzidos quando duas fases da saída estão conectadas na mesma fase da entrada. Os vetores  $\pm r_1$  a  $\pm r_3$  são denominados de rotativos ou síncronos e possuem direções variáveis, eles são produzidos quando cada fase da saída é conectada a uma fase diferente da entrada. Por último, os vetores  $0_a$ ,  $0_b$  e  $0_c$ , chamados de nulos,

são produzidos quando as três fases da saída são conectadas na mesma fase da entrada.

Tabela 1 - Chaveamento de um conversor matricial SVDM.

Grupo	Vetor	a-b-c	$V_o$	$\alpha_o$	$i_i$	$\beta_i$
VETORES ATIVOS	+1	A-B-B	$2/3 V_{AB}$	0	$2/\sqrt{3} i_a$	$11\pi/6$
	+2	B-C-C	$2/3 V_{BC}$	0	$2/\sqrt{3} i_a$	$\pi/2$
	+3	C-A-A	$2/3 V_{CA}$	0	$2/\sqrt{3} i_a$	$7\pi/6$
	+4	B-A-B	$2/3 V_{AB}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_b$	$11\pi/6$
	+5	C-B-C	$2/3 V_{BC}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_b$	$\pi/2$
	+6	A-C-A	$2/3 V_{CA}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_b$	$7\pi/6$
	+7	B-B-A	$2/3 V_{AB}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_c$	$11\pi/6$
	+8	C-C-B	$2/3 V_{BC}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_c$	$\pi/2$
	+9	A-A-C	$2/3 V_{CA}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3} i_c$	$7\pi/6$
	-1	B-A-A	$-2/3 V_{AB}$	0	$-2/\sqrt{3} i_a$	$11\pi/6$
	-2	C-B-B	$-2/3 V_{BC}$	0	$-2/\sqrt{3} i_a$	$\pi/2$
	-3	A-C-C	$-2/3 V_{CA}$	0	$-2/\sqrt{3} i_a$	$7\pi/6$
	-4	A-B-A	$-2/3 V_{AB}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_b$	$11\pi/6$
	-5	B-C-B	$-2/3 V_{BC}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_b$	$\pi/2$
	-6	C-A-C	$-2/3 V_{CA}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_b$	$7\pi/6$
	-7	A-A-B	$-2/3 V_{AB}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_c$	$11\pi/6$
	-8	B-B-C	$-2/3 V_{BC}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_c$	$\pi/2$
	-9	C-C-A	$-2/3 V_{CA}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3} i_c$	$7\pi/6$
VETORES NULOS	$0_a$	A-A-A	0	-	0	-
	$0_b$	B-B-B	0	-	0	-
	$0_c$	C-C-C	0	-	0	-
VETORES ROTATIVOS	$+r_1$	A-B-C	$V_i$	$\omega_i t$	$i_0$	$\omega_o t$
	$+r_2$	C-A-B	$V_i$	$\omega_i t + 2\pi/3$	$i_0$	$\omega_o t + 2\pi/3$
	$+r_3$	B-C-A	$V_i$	$\omega_i t + 4\pi/3$	$i_0$	$\omega_o t + 4\pi/3$
	$-r_1$	A-C-B	$V_i$	$-\omega_i t$	$i_0$	$-\omega_o t$
	$-r_2$	B-A-C	$V_i$	$-\omega_i t + 2\pi/3$	$i_0$	$-\omega_o t + 2\pi/3$
	$-r_3$	C-B-A	$V_i$	$-\omega_i t + 4\pi/3$	$i_0$	$-\omega_o t + 4\pi/3$

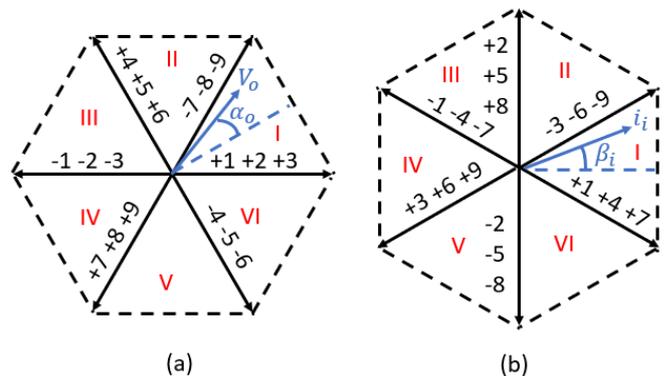


Fig. 3 - Representação gráfica dos: (a) vetores da tensão de saída (b) vetores da corrente de entrada. (Fonte: Autores)

Basicamente, o objetivo da SVDM é selecionar quatro vetores ativos que aplicados de acordo com tempos específicos dentro do período de chaveamento conseguem sintetizar os vetores de referência de tensão e corrente ao mesmo tempo. Quando a soma dos ciclos de trabalho dos quatro vetores ativos é menor que um, completa-se o período de chaveamento utilizando o intercalamento de vetores nulos. Por exemplo, para um dado instante em que os vetores de tensão de saída e corrente de

entrada estão no setor I, utiliza-se a sequência de chaveamento  $0_c, +9, -7, 0_a, -3, +1$  e  $0_b$ .

As formulações que regem a decomposição dos vetores de referência, assim como a obtenção dos ciclos de trabalho de cada chaveamento, podem ser encontradas em Alzamora e de Paula (2018).

### 2.2 Método para Redução da Tensão de Modo Comum

A tensão de modo comum pode ser definida como a tensão entre o neutro do motor (ponto n) e o terra (ponto N) (Fig. 2). A Tabela 2 mostra a amplitude da tensão de modo comum para cada grupo de vetores (Alzamora e de Paula, 2018).

**Tabela 2 - Amplitude da TMC para cada um dos grupos de vetores.**

	TMC ( $v_{nN}$ )
VETORES ATIVOS	$\frac{1}{\sqrt{3}}V_{i-fase}$
VETORES NULOS	$V_{i-fase}$
VETORES ROTATIVOS	0

Conforme já explicitado, no método tradicional SVDM, os vetores de tensão de saída de referência e corrente de entrada de referência são sintetizados pelos vetores ativos adjacentes nos planos vetoriais respectivos, sendo o restante do período de chaveamento completado pelos vetores nulos. O impacto negativo desta abordagem está na amplitude elevada da TMC produzida por estes vetores, que equivale ao pico da tensão de fase, conforme mostra a Tabela 2. Tal tensão, aplicada sobre as capacitâncias mútuas do cabo e também sobre as capacitâncias intrínsecas do conversor, cabo e motor à terra, induz o surgimento das correntes de modo comum de elevadas frequências, responsáveis por uma série de consequências indesejadas no sistema, conforme já comentado.

O método analisado para reduzir a tensão de modo comum consiste em utilizar os vetores rotativos no lugar dos vetores nulos para completar o ciclo de chaveamento, pois, os rotativos, utilizados em sequência, não modificam a síntese do vetor de referência e, no caso de tensões de entrada balanceadas, não contribuem para a tensão de modo comum (Espina et al., 2014). A Fig. 4 mostra um exemplo de síntese do vetor de tensão de referência, localizado no setor I, através dos vetores ativos adjacentes e utilizando os rotativos para completar o período de chaveamento.

Este método, portanto, é capaz de reduzir a tensão de modo comum em relação ao método tradicional. O questionamento a respeito do seu emprego é se, devido às características distintas de chaveamento, as sobretensões transitórias produzidas podem ser amplificadas em relação ao método tradicional, cujas consequências são mais severas em aplicações que utilizam cabos longos.

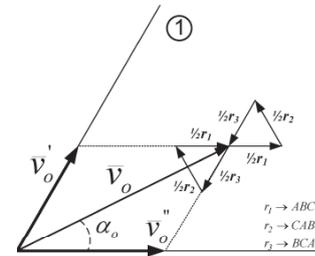


Fig. 4 - Síntese do vetor de tensão de referência utilizando vetores ativos e rotativos. (Fonte: Espina et al., 2014)

### 3. MODELAGEM DO SISTEMA DE ACIONAMENTO

No intuito de se obter resultados computacionais de qualidade, modelos adequados ao estudo em análise foram utilizados para a representação do sistema. Na sequência são descritos, resumidamente, os modelos empregados neste trabalho.

#### 3.1 Cabo entre o Conversor e o Motor

Como já mencionado, para os fins da análise em foco, o modelo do cabo deve ser capaz de representar satisfatoriamente três requisitos principais: (i) variação de sua resistência e indutância devido aos efeitos pelicular e proximidade, (ii) representação da natureza distribuída dos seus parâmetros, de forma a reproduzir os fenômenos de propagação e reflexão de ondas e (iii) representação tanto do modo comum quanto do modo diferencial. Para isso, utilizou-se a modelagem de cabo proposta por (de Paula et al., 2008a), cujo detalhamento pode ser encontrado nessa referência.

#### 3.2 Motor de Indução

Em relação ao motor, é necessário utilizar um modelo que reproduza sua impedância entre fases e destas para a terra em uma ampla faixa de frequências. O ponto chave, para isso, é a inclusão de suas capacitâncias intrínsecas, que se comportam como um caminho de baixa impedância para as correntes de alta frequência. No caso do presente trabalho, a modelagem escolhida foi aquela apresentada por Mirafzal et al. (2007). Este modelo é capaz de representar: (i) o comportamento do motor em regime permanente nas baixas frequências (até 400 Hz), em que a tensão é distribuída uniformemente pelas espiras do enrolamento de estator; (ii) na faixa de médias frequências (400 Hz até 20 kHz), relacionadas à frequência de chaveamento, as ondulações das correntes e o aquecimento gerado por elas nos enrolamentos de cobre e na laminação do núcleo magnético; (iii) nas elevadas frequências (até 10 MHz), o comportamento predominantemente capacitivo do motor, onde a tensão é distribuída de maneira não uniforme pelo enrolamento.

#### 3.3 Conversor Matricial

No caso do conversor de frequência, deve-se utilizar uma modelagem que inclua a presença das capacitâncias parasitas de cada uma das chaves para a terra. Para tal, foi utilizado como referência o modelo sugerido por de Paula et al. (2010) para inversores trifásicos. Neste caso, considerou-se o dissipador aterrado e o acoplamento capacitivo existente entre ele e o coletor das chaves.

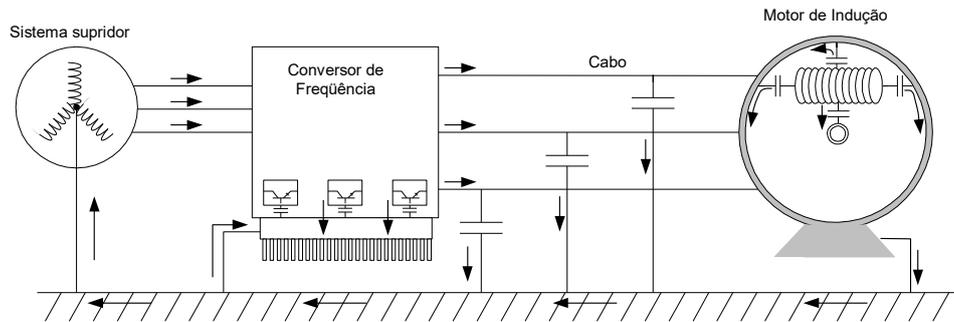


Fig. 5 - Diagrama ilustrativo do sistema simulado (as setas representam a circulação das correntes de modo comum). (Fonte: Autores)

### 3.4 Transformador

Um sistema de acionamento industrial consiste não só do inversor, cabo e motor, mas também de um transformador de potência (sistema supridor). Para estudos de sobretensões transitórias, que é essencialmente um fenômeno diferencial, o transformador não exerce nenhuma influência e pode ser desconsiderado. No entanto, quando se analisa a corrente de modo comum, o transformador desempenha um papel imprescindível, visto que a sua impedância faz parte do circuito de modo comum. No transformador, a corrente de modo comum flui do ponto neutro aterrado do secundário em direção aos terminais das fases. Como esta corrente transitória tem oscilações cuja frequência se encontra na faixa de dezenas a centenas de kHz, o modelo escolhido deve representar apropriadamente sua impedância em toda essa faixa, devendo incluir, portanto, os acoplamentos capacitivos existentes entre os elementos do transformador para o seu tanque (aterrado), além da variação da resistência dos seus enrolamentos. Em de Conti (2001) é utilizado um modelo para estudos de surtos de tensão transferidos do secundário para o primário do transformador, mas que, com a devida adaptação (de Paula et al., 2009), pode ser empregado para representar a sua impedância de sequência zero.

## 4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações foram realizadas no *Simulink* utilizando as modelagens citadas na seção anterior e implementando as técnicas de chaveamento SVDM tradicional e a que utiliza vetores rotativos, descritas na seção 2. A Fig. 5 mostra o diagrama do sistema simulado. Para a conexão entre o motor e o conversor foi utilizado um cabo de 80 metros; os parâmetros do motor de indução trifásico foram obtidos de Almeida (2011); já os valores das capacitâncias do conversor foram retirados de Villabona et al. (2002) e, por último, os dados do transformador foram extraídos de Paula et al. (2009). A tensão de alimentação e a frequência de chaveamento foram mantidas em 120 V<sub>rms</sub> e 20 kHz, respectivamente.

### 4.1 Tensão e Corrente de Modo Comum

A Fig. 6 exibe a TMC e a corrente de retorno pela terra produzida por ela no método SVDM tradicional. Vale ressaltar que esta corrente que circula pelo aterramento é a combinação da parcela que flui através do ponto de aterramento do motor, fruto do acoplamento capacitivo de suas bobinas com a carcaça aterrada, com a parcela que flui pela capacitância distribuída

dos cabos para a terra, retornando parte pelo transformador e parte pelo conversor, através do acoplamento capacitivo de suas chaves com o dissipador aterrado. A Fig. 7 exibe o resultado obtido para a tensão e a corrente de modo comum quando se aplica vetores rotativos no lugar dos vetores nulos.

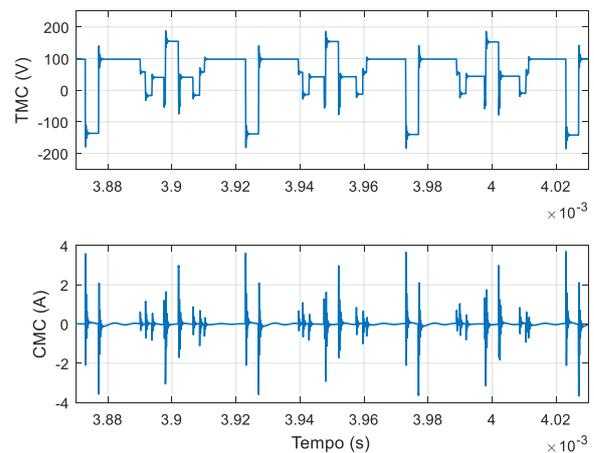


Fig. 6 - Tensão de modo comum produzida pelo conversor matricial (gráfico superior) e a correspondente corrente de modo comum total (gráfico inferior) quando se utiliza vetores nulos no método SVDM. (Fonte: Autores)

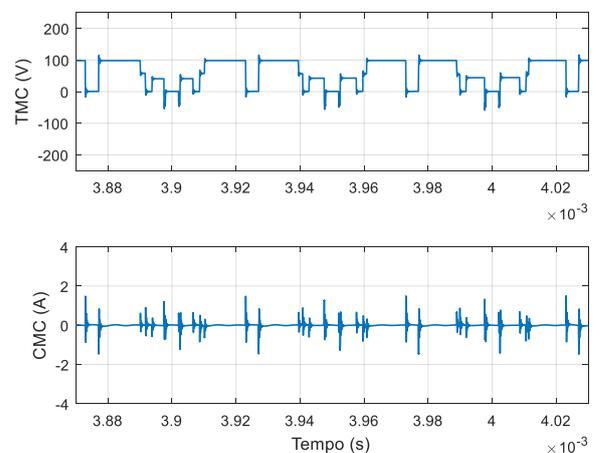


Fig. 7 - Tensão de modo comum produzida pelo conversor matricial (gráfico superior) e a correspondente corrente de modo comum total (gráfico inferior) quando se utiliza vetores rotativos no método SVDM. (Fonte: Autores)

#### 4.2 Tensão no Eixo do Motor

As Fig. 8 e 9 exibem a tensão no eixo experimentada pelo motor ao se utilizar a modulação com vetores nulos e com vetores rotativos, respectivamente.

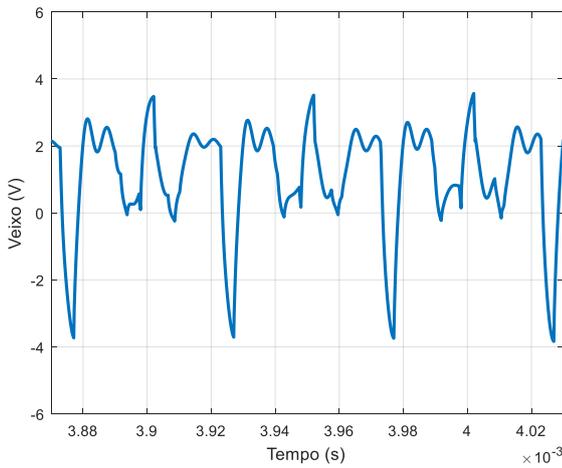


Fig. 8 - Tensão no eixo do motor quando se utiliza vetores nulos no método SVDM. (Fonte: Autores)

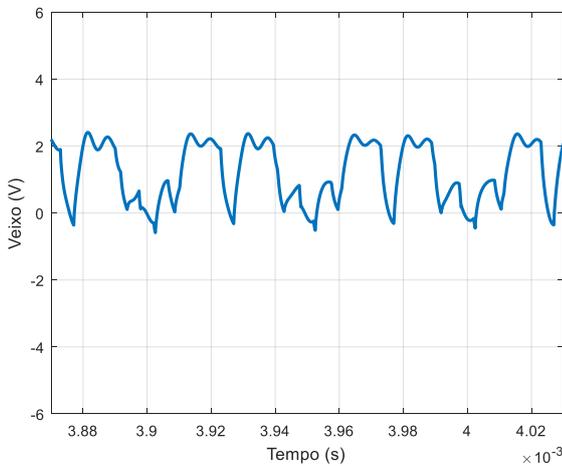


Fig. 9 - Tensão no eixo do motor quando se utiliza vetores rotativos no método SVDM. (Fonte: Autores)

#### 4.3 Sobreensões nos Terminais do Motor

As Fig. 10 e 11 mostram a tensão de fase tanto na saída do conversor (início do cabo) como nos terminais do motor (saída do cabo) para a modulação tradicional e a que utiliza vetores rotativos.

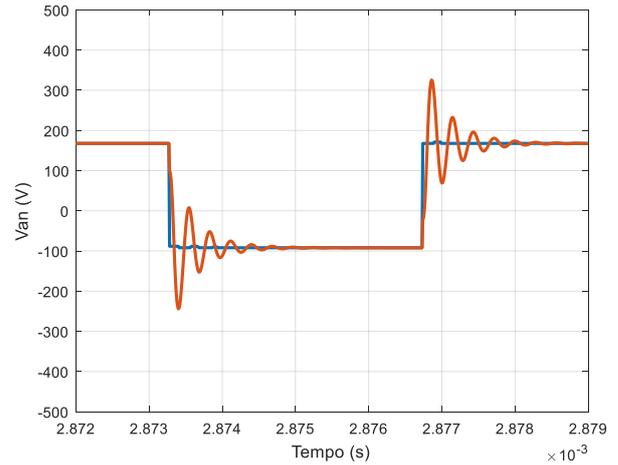


Fig. 10 - Tensão de fase na saída do inversor (em azul) e no motor (em laranja) quando se utiliza vetores nulos no método SVDM. (Fonte: Autores)

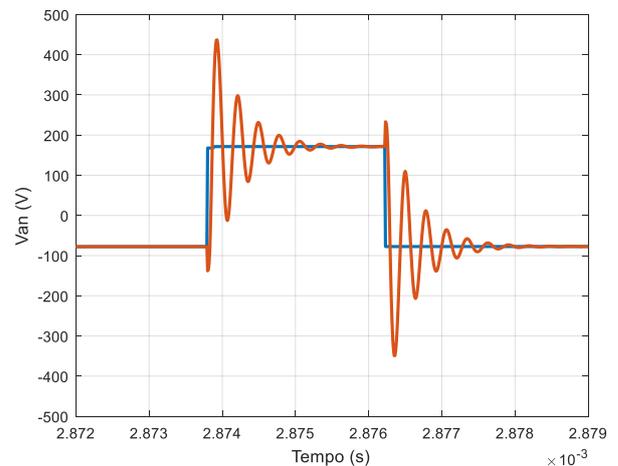


Fig. 11 - Tensão de fase na saída do inversor (em azul) e no motor (em laranja) quando se utiliza vetores rotativos no método SVDM. (Fonte: Autores)

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da análise dos gráficos da tensão de modo comum (Fig. 6 e 7) pode-se constatar que no mesmo intervalo de tempo em que ocorre os picos da tensão de modo comum no método tradicional, o método alternativo apresenta TMC nula. Este pico é de aproximadamente 169 V e ocorre, conforme já comentado, durante o tempo em que o chaveamento do método tradicional corresponde aos vetores nulos, já a tensão zero do método alternativo está associada ao emprego dos vetores rotativos. O pico da TMC neste método é de, aproximadamente, 98 V, que ocorre no acionamento dos vetores ativos, comuns a ambos os métodos. Uma vez que a tensão de alimentação é de 120 V<sub>rms</sub>, todos estes valores estão condizentes aos da Tabela 2.

Os resultados relativos à corrente de modo comum (a qual flui pelo aterramento do sistema) reforçam o fato de que a sua ocorrência é consequência da aplicação dos degraus presentes na tensão de modo comum nas capacitâncias para a terra distribuídas por todo o sistema. Dessa forma, conforme

mostram as Fig. 6 e 7, cada  $dv/dt$  da TMC origina uma corrente transitória, oscilatória e amortecida, que flui pelo circuito de modo comum do sistema. Pode-se observar que os valores de pico dessa corrente foram reduzidos de 3,8 A para 1,8 A, aproximadamente. Este resultado é consequência direta da redução das amplitudes das transições  $dv/dt$  experimentadas pela TMC quando se modifica a modulação SVDM tradicional para não empregar os vetores nulos.

Em relação à tensão que surge entre o eixo e a carcaça, responsável por uma grande parcela das falhas de rolamentos encontradas nos motores, percebe-se, através das Fig. 8 e 9, uma redução significativa do seu valor quando se utiliza o método modificado. Esta redução tem fruto direto no aumento da vida útil dos motores e na redução dos custos com manutenção. A forma de onda resultante é muito similar aos resultados práticos obtidos em Espina et al. (2014), mostrando a eficácia dos modelos de alta frequência escolhidos para a simulação. Em tal referência, o autor não exibiu simulações nesta profundidade.

Em relação às sobretensões transitórias aplicadas nos terminais do motor, obteve-se um resultado que requer bastante atenção (Fig. 10 e 11). O método tradicional mostrou picos na tensão de fase que alimenta o motor de no máximo 310 V, enquanto que essa tensão no método modificado atingiu quase 420 V. A explicação para este fato está na própria sequência de comutações de chaves que é realizada quando se utiliza vetores rotativos ao invés de vetores nulos. O chaveamento de duas fases quando se seleciona um vetor ativo após um rotativo além de diminuir a eficiência, causa picos na tensão. Fato que não ocorre no método tradicional. Por exemplo (vide Tabela 1), no método tradicional, quando é necessário a intercalação após a aplicação do vetor ativo +1 (A-B-B), emprega-se o vetor nulo  $0_b$  (B-B-B), cuja transição se dá pela alteração apenas da fase a. Quando se utilizam vetores rotativos, a maneira mais eficiente de se realizar a intercalação após o vetor +1 é através da aplicação do vetor rotativo +r<sub>1</sub> (A-B-C), de modo que duas fases devem ser chaveadas. Este chaveamento simultâneo gera reversões na tensão de linha, cuja consequência é justamente a produção de sobretensões mais severas.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise, sob novas perspectivas e recursos computacionais, de um método vetorial utilizado em conversores matriciais que consiste em modificar a estratégia de controle do método tradicional no intuito de reduzir a componente de modo comum presente na tensão sintetizada pelo conversor. Aplicações que envolvem cabos longos entre o conversor e o motor são bastante comuns e um exame sobre o impacto da nova abordagem na sobretensão transitória se fazia necessária. Para isso, foram utilizadas modelagens sofisticadas capazes de reproduzir o comportamento de todos os componentes do sistema de acionamento em uma ampla faixa de frequências.

Perante os resultados obtidos neste artigo, pode-se concluir que o método modificado da modulação SVDM, que utiliza apenas vetores ativos e rotativos para sintetizar a tensão de referência, apresenta resultados bastante satisfatórios no que tange à redução da tensão e corrente de modo comum e da

tensão no eixo experimentada pelo motor, em comparação com o método tradicional. No entanto, em aplicações que utilizam cabos longos, o emprego de vetores rotativos resulta em picos mais elevados da sobretensão nos terminais do motor, devido à nova característica da sequência de chaveamentos. A decisão sobre a aplicação da técnica analisada depende diretamente do compromisso entre suas vantagens e desvantagens, de forma que a viabilidade do seu uso deverá ser definida em função das aplicações pretendidas para o conversor matricial.

A discussão realizada neste artigo, referente a um método específico, mostra a importância de se analisar os possíveis efeitos indesejáveis que a mudança no perfil de chaveamento pode ocasionar. Sendo assim, sugere-se que toda alteração no controle de um conversor matricial seja acompanhada de uma análise profunda das possíveis consequências associadas.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- Akagi, H. e Shimizu, T. (2008). Attenuation of conducted EMI emissions from an inverter-driven motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 1, pp. 282-290.
- Alzamora, A. M. e de Paula, H. (2018). Análise da Tensão de Modo Comum Produzida por Conversores Matriciais em Sistemas de Acionamento Industriais. *XVI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica - CEEL*.
- Araújo, R. S. et al. (2015). Premature wear and recurring bearing failures in an inverter driven induction motor - part I: investigation of the problem. *IEEE Transactions on Industry Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 4861-4867.
- Cha, H. J. e Enjeti, P. N. (2003). An approach to reduce common-mode voltage in matrix converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 4, pp. 1151-1159.
- de Almeida, W. P. (2011). Contribuições ao Estudo das Tensões de Eixo e Correntes de Modo Comum em Motores de Indução Acionados por Conversores PWM. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG.
- de Conti, A. R. (2001). Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão: Sobretensões Transferidas em Transformadores de Distribuição. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG.
- de Paula, H. et al. (2008a). Methodology for cable modeling and simulation for high-frequency phenomena studies in PWM motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 744-752.
- de Paula, H. et al. (2008b). Novas Contribuições ao Estudo das Sobretensões Transitórias e Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamento de Motores por Inversores. *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*.
- de Paula, H. et al. (2009). Differential overvoltages and common-mode currents in PWM motor drives: the influence of the cable arrangement on their characteristics.

- Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1103-1109.
- de Paula, H. et al. (2010). Uma proposta para a modelagem de inversores para o estudo de correntes de modo comum em sistema de acionamento de motores. *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, pp. 1-6.
- Espina, J. et al. (2014). Reduction of Output Common Mode Voltage Using a Novel SVM Implementation in Matrix Converters for Improved Motor Lifetime. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 11, pp. 5903-5911.
- Friedli, T. e Kolar, J. W. (2012). Milestones in Matrix Converter Research. *IEEE Journal of Industry Applications*, vol. 1, no. 1, pp. 2-14.
- Huber, L. e Borojevic, D. (1995). Space vector modulated three-phase to three-phase matrix converter with input power factor correction, *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 31, no. 6, pp. 1234-1246.
- Jouanne, A. V., Zhang, H. e Wallace, A. K. (1998). An evaluation of mitigation techniques for bearing currents, EMI and overvoltages in ASD applications. *IEEE Transactions on Industry Applic.*, vol. 34, no. 5, pp. 1113-1122.
- Kerkman, R. J., Leggate, D. e Skibinsky, G. L. (1997). Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 3, pp. 722-731,
- Lee, H., Nguyen, H. M. e Jung, E. (2005). A study on reduction of common-mode voltage in matrix converter with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 1-7.
- Mirafzal, B. et al. (2007). Universal induction motor model with low-to-high frequency-response characteristic. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 5, pp. 1233-1246.
- Nguyen, T. D. e Lee, H. Modulation Strategies to Reduce Common-Mode Voltage for Indirect Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 129-140.
- Persson, E. (1992). Transient effects in application of PWM inverters to induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1095 – 1101.
- Rodriguez, J. et al. (2012). A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 58-70.
- She, H. et al. (2009). Damped Input Filter Design of Matrix Converter. *International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 672-677.
- Swamy, M. e Kume, T. (2010). A Present State and Futuristic Vision of Motor Drive Technology. *Power Transmission Engineering Magazine*, pp. 16-27.
- Szczesniak, P. (2012). *Three-Phase AC-AC Power Converters Based on Matrix Converter Topology*, 1ª ed. Springer, Polônia.
- Venturini, M. (1980). A new sine wave in sine wave out, conversion technique which eliminates reactive elements. *Proc. Powercon 7*, pp. E3/1-E3/15.
- Villabona, E. G. et al. (2002). Simplified high-frequency model for AC drives. *28th IEEE IECON*, pp. 1144-1149.
- Yaskawa America, Inc. (2015). Z1000 Family of AC Drives for Building Automation. Disponível em <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=BL.Z1000.01&cmd=documents&documentName=BL.Z1000.01.pdf> [Consultado em 09/06/2020].
- Yaskawa America, Inc. (2020a). Application Success Story. Disponível em [https://www.yaskawa.com/products/drives/industrial-ac-drives/general-purpose-drives/u1000-industrial-matrix-drive/-/content/\\_9faba4fb-65eb-47e9-a4f7-fbeb0b05db0a\\_SuccessStories](https://www.yaskawa.com/products/drives/industrial-ac-drives/general-purpose-drives/u1000-industrial-matrix-drive/-/content/_9faba4fb-65eb-47e9-a4f7-fbeb0b05db0a_SuccessStories) [Consultado em 09/06/2020].
- Yaskawa America, Inc. (2020b). Application Case Study: Drive Retrofit Improves Efficiency for Water Treatment Plant. Disponível em <https://www.yaskawa.com/delegate/getAttachment?documentId=WP.AFD.21&cmd=documents&documentName=WP.AFD.21.pdf> [Consultado em 09/06/2020].