

SIMULAÇÕES E TESTES DE SENSIBILIDADE DE ACIONAMENTOS A VELOCIDADE VARIÁVEL FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Carla César Martins Cunha
Universidade Federal do Espírito Santo
Caixa Postal 01.9011
CEP 29.060-970 Vitória – ES
Brasil
carla@ele.ufes.br

Selênio Rocha Silva
Universidade Federal de Minas Gerais
Avenida Antônio Carlos, 6627
CEP 31270-901 Belo Horizonte – MG
Brasil
selenios@cpdee.ufmg.br

Resumo – Este trabalho avalia a suportabilidade de dois acionamentos a velocidade variável (ASD's) trifásicos, de baixa potência (220/230V - 5kVA e 230V - 2,2kW), frente a afundamentos de tensão oriundos de faltas trifásicas equilibradas e desequilibradas, através simulações e de uma montagem experimental para levantamento das referidas curvas de sensibilidade, conforme normas vigentes. Assim, procura-se verificar os resultados até então apresentados na literatura internacional, mas pouco explorados experimentalmente com equipamentos comercializados no Brasil, cujas informações inexistem nos catálogos dos referidos equipamentos.

Palavras-Chave – Acionamentos a velocidade variável (ASD's). Afundamentos de tensão (*voltage sags*). Curvas de tolerância. Simulações. Testes experimentais.

VOLTAGE SAG TOLERANCE CURVES OF ADJUSTABLE SPEED DRIVES: TESTING AND SIMULATIONS

Abstract – This paper evaluates the ride-through performance of two 3-phase low voltage ASD's (220/230V - 5kVA e 230V - 2,2kW), during voltage sags due to three-phase balanced and unbalanced faults, including simulations and a experimental setup to determine tolerance curves, as described in actual standards. In this way, the results presented in the international literature, and not experimentally explored with commercially equipment available in Brazil, where there is no information about these curves in the manufacturers catalogue, will be verified.

Keywords – Adjustable speed drives (ASD's). Voltage sags. Tolerance Curves. Simulations. Experimental tests.

I. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de aumentar a eficiência e a economia de energia, além de melhorar o controle de vários processos, a utilização de acionamentos a velocidade variável (ASD's - *Adjustable Speed Drives*) em instalações industriais e comerciais está crescendo. Entretanto, estes acionamentos são, normalmente, susceptíveis a distúrbios de tensão, tais como, afundamentos momentâneos de tensão (*voltage sags*), sobretensões momentâneas (*voltage swells*), tensões transitórias e interrupções momentâneas. Tal característica tem exigido uma atenção especial por parte dos agentes envolvidos, a saber, a transmissora e a distribuidora de energia elétrica, o usuário, além, é claro, do fabricante do equipamento. Assim, o conhecimento da sensibilidade destes equipamentos constitui-se em poderosa ferramenta destes agentes no combate aos problemas advindos dos citados distúrbios.

De acordo com a literatura, afundamentos de tensão e interrupções momentâneas são a principal causa de distúrbios e estão, na maioria das vezes, relacionados à ocorrência de faltas ou curto-circuitos em algum ponto do sistema.

Entretanto, os afundamentos de tensão são muito mais comuns, uma vez que os mesmos podem estar associados a faltas remotas ao local sob observação. Faltas ocorrendo em sistemas de alta tensão podem provocar *sags* em regiões num raio superior a centenas de quilômetros. Afirmar-se ainda que 68% dos distúrbios registrados são afundamentos de tensão, e que estes são os únicos responsáveis por perdas de produção [1], [2]. Estas perdas são normalmente causadas por *sags* mais profundos do que 87%, e com duração superior a 8,3ms (0,5 ciclo).

Outra pesquisa [3] revela que um pouco mais do que 62% de distúrbios registrados são afundamentos de tensão com duração inferior a 0,5s (30 ciclos). Em outro estudo [1], com 17 meses de observação em duas indústrias, concluiu-se que *sags* com duração não inferior a 12 ciclos e amplitudes maiores, isto é, mais profundos, do que 80%, irão ocasionar o desligamento (*trip*) do acionamento envolvido em um processo contínuo. Comparando-se estes dados com as "curvas de tolerância" CBEMA ou ITIC [4], alguns chegam a afirmar que os acionamentos mais modernos parecem ser mais sensíveis do que os equipamentos de processamento de dados.

Em fábricas de papel ou tecido, um pequeno afundamento de tensão pode fazer com que o acionamento introduza flutuações de velocidade, as quais podem deteriorar a qualidade do produto final. Adicionalmente, estes pequenos

Artigo Submetido em 10/03/2003. Primeira Revisão em 29/04/2003. Segunda Revisão em 26/06/2003. Aceito sob recomendação do Editor Geral Prof. Carlos Alberto Canesin.

distúrbios resultam em decréscimos na tensão no elo CC do equipamento, levando-o ao desligamento por subtensão ou por sobrecorrente. Este desligamento indesejado do ASD, dentro de um processo contínuo, pode causar perdas significativas da produção, além de custos relativos ao tempo de interrupção do processo e à retomada da produção [5].

Estima-se que os prejuízos financeiros acumulados, nos EUA, devido a distúrbios na rede, variam de US\$ 20 a 100 bilhões por ano, quando a indústria registra perdas na faixa de US\$10 mil a US\$ 1 milhão por evento [6]. No Brasil, avalia-se que tais prejuízos possam chegar a US\$ 2 bilhões por ano [7].

Este projeto pretende realizar um estudo da suportabilidade destes equipamentos trifásicos a afundamentos de tensão, oriundos de faltas trifásicas equilibradas e desequilibradas no sistema ao qual ele esteja conectado, dentro das condições de fornecimento de energia elétrica usuais no Brasil. Assim, o trabalho procura confirmar os resultados até então apresentados na literatura internacional, mas pouco explorados experimentalmente com equipamentos comercializados no país.

II. ACIONAMENTOS A VELOCIDADE VARIÁVEL

A. Tolerância a Afundamentos de Tensão

O conceito de curva de tolerância de tensão para equipamentos eletrônicos sensíveis, isto é, inicialmente para computadores de instalações militares, foi introduzido em 1978 por Thomas Key [8]. Anos mais tarde, a curva de tolerância de tensão resultante de seus testes tornou-se conhecida como "curva CBEMA". Ela se popularizou quando a associação CBEMA - *Computer Business Equipment Manufacturer's Association* começou a utilizar a referida curva como uma recomendação a seus membros. Posteriormente, esta curva foi utilizada na elaboração da norma *IEEE Standard 446-1995 (Orange Book)* e tornou-se uma referência para tolerância de equipamentos frente a variações de tensão, bem como para severidade de afundamentos de tensão. Recentemente, a "curva CBEMA revisada" foi adotada pelo ITIC - *Information Technology Industry Council*, sucessor da CBEMA [4], [8]. Esta curva, agora denominada "curva ITIC", é reproduzida na Figura 1.

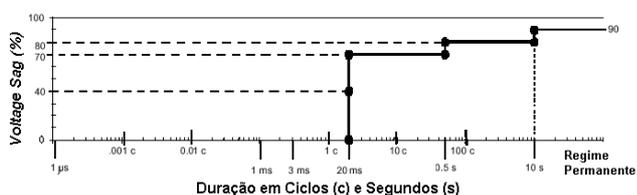


Fig. 1. Curva ITIC de tolerância de computadores frente a *voltage sags*. Revisada em 2000 [4].

Nesta nova curva de referência, considera-se que os afundamentos de tensão para 80% da tensão nominal têm uma duração típica de 10s, ao passo que *sags* para 70% não permanecem por mais do que 0,5s. Por outro lado, as interrupções momentâneas de tensão (0 a 10% da tensão nominal) duram não mais do que 20ms, ou seja, um pouco além de um ciclo em 60Hz.

B. Sensibilidade de ASD's a Afundamentos de Tensão

A resposta do acionamento de um motor CA a distúrbios de tensão é fortemente dependente do algoritmo de controle e das variáveis elétricas e mecânicas monitoradas, tanto do acionamento, quanto do motor [9]. Durante um afundamento de tensão, a tensão no elo CC irá experimentar um aumento no *ripple* e uma diminuição do seu valor médio. Muitos ASD's são ajustados para operação no modo V/f constante, onde a razão entre a tensão de saída do inversor PWM e a sua frequência é mantida linearmente constante, até o valor nominal da velocidade ou da frequência. Se a tensão na entrada do acionamento sofre um afundamento, o *ripple* e/ou a redução da tensão no elo CC irá refletir em uma redução na amplitude da tensão na saída do inversor PWM. Normalmente, este não é maior problema, tendo em vista que o acionamento pode simplesmente aumentar a largura dos pulsos para compensar a diferença.

Os circuitos de controle dos acionamentos mais modernos monitoram a tensão no elo CC. Muitos fabricantes alimentam tais circuitos diretamente a partir desta tensão CC, e não monitoram a tensão da rede CA. Vários ASD's, com tecnologia já ultrapassada, mas que ainda se encontram em operação em um grande número de indústrias, alimentam o circuito de controle a partir da rede CA e, conseqüentemente, são mais sensíveis a distúrbios de tensão na rede CA. Em um esforço para manter o controle sobre o motor e ter uma parada segura, o acionamento irá desligar o motor antes da perda da alimentação do circuito de controle. Por outro lado, em ASD's mais modernos, o capacitor do elo CC armazena energia suficiente para esses circuitos de controle. Como resultado, este tipo de acionamento possui menos problemas com distúrbios na rede CA.

A literatura apresenta diversos trabalhos envolvendo testes de sensibilidade de acionamentos [1] [10] [11] [12] [13] [14] [15]. Em [10] foram testados quatro diferentes ASD's trifásicos de 5hp, 460V, 60Hz, 1745rpm, e demais ajustes de fábrica. Estes ensaios mostraram que afundamentos de tensão mais profundos afetam os inversores de frequência de forma adversa. Além disto, a performance destes equipamentos durante *sags* não pode ser determinada por dados de placa.

Em outro estudo realizado pelo *EPRI-PEAC (Electronic Power Research Institute - Power Electronics Applications Center)*, 17 acionamentos comerciais de 5hp foram testados e em 90% deles ocorreu *trip* para *sags* abaixo de 50% da tensão nominal, com duração de 5 ciclos [12]. Neste mesmo trabalho, a performance de um ASD comercial de 5hp, 480V, acrescido de um circuito (regulador *chopper*) conectado ao elo CC, para aumento da tolerância a afundamentos de tensão, foi avaliado.

Em [14], um acionamento de 15kW, 380V foi testado para *sags* dos tipos A, D e C, carregamento do motor de 25% e 75% e tensão pré-*sag* de 0,95; 1,00 e 1,05 pu. Neste caso, o carregamento do motor causou um efeito mínimo na performance do ASD. Observou-se ainda que, para tensões pré-*sag* maiores (1,05 pu), e afundamentos de pequena duração, a tolerância do inversor de frequência também aumentou.

Outros testes de tolerância a afundamentos de tensão realizados pelo *EPRI-PEAC* [11] destacaram a importância

do religamento síncrono. Afundamentos de tensão para 50%, com duração de 5 ciclos, foram aplicados em dois modelos comerciais de acionamentos trifásicos de 5hp, 460V, alimentando um motor de 5hp, 1740rpm, com carregamento de 75%. O Modelo A utilizava tecnologia PWM e controle vetorial e possui religamento síncrono. Já o Modelo B, com tecnologia senoidal, era dotado de religamento assíncrono. Apesar do afundamento de tensão ter causado o desligamento no inversor Modelo A, o acionamento retornou à operação quase que instantaneamente após o afundamento de tensão, com uma pequena queda da velocidade. Por outro lado, o desligamento no Modelo B o desligou por quase 1 segundo após o *sag*. Durante este intervalo, o acionamento cortou a tensão para o motor e a velocidade deste diminuiu de 1740rpm para cerca de 1160rpm, quando o ASD realizou o religamento. Entretanto, devido ao fato do Modelo B não ser sincronizado com a tensão residual do motor, a velocidade continuou a cair por mais 0,5 segundo, para aproximadamente 180rpm. Neste ponto, o acionamento foi novamente sincronizado com o motor, acelerando-o para 1740rpm em 3,5 segundos. Observa-se que o inversor religamento síncrono permitiu uma queda de apenas 5% na velocidade do motor e levou menos do que 0,5 segundo para restaurar a velocidade ao seu valor nominal. Em contrapartida, o ASD com religamento assíncrono admitiu uma queda de 90% na velocidade do motor, e levou cerca de 4 segundos para restaurá-la. Em processos que suportam tal variação de velocidade, os dois acionamentos podem ser considerados imunes a afundamentos de tensão para 50%, com duração de 5 ciclos, porque ambos religam o motor automaticamente. Entretanto, somente o modelo com religamento síncrono pode sustentar processos críticos que requerem tanto velocidade quanto conjugado praticamente constantes [11].

III. SIMULAÇÃO DE ASD'S

A. Modelo para Simulação

O sistema utilizado para realização das simulações contém:

- Fonte ideal de tensão trifásica 60Hz, 220V, onde os afundamentos de tensão são sintetizados.
- Inversor de frequência trifásico (ASD1) composto de um retificador a diodos; elo CC com indutor série ($L=10\mu\text{H}$ e $R=0.5\Omega$) e capacitor *shunt* ($C=1880\mu\text{F}$); e inversor PWM com controle vetorial (5kHz). Todos os componentes passivos do acionamento são considerados ideais e nenhuma malha de controle (corrente, velocidade, etc...) está representada.
- Motor de indução trifásico, com rotor em gaiola de esquilo, 2cv, 254/440 V (Δ -Y), 4 pólos, 60Hz, 1715 rpm, momento de inércia de $0.0045\text{kg}\cdot\text{m}^2$, representado por um motor de rotor bobinado equivalente e modelado através de vetores espaciais, com os seguintes parâmetros: $R_s=1,4\Omega$; $R_r=1,3\Omega$; $L_m=110,49\text{mH}$ e $L_{ls}=L_{lr}=6,48\text{mH}$.
- Carga modelada por um conjugado constante.

Uma primeira aproximação para determinação do tempo máximo de suportabilidade do inversor ($t_{m\acute{a}x}$) frente a afundamentos de tensão pode ser obtida a partir de (1).

Para isto deve-se conhecer a condição de carga (P), a capacitância (C) e as tensões nominal (V_0) e mínima (V_{min}) no elo CC do inversor [6].

$$t_{m\acute{a}x} = \frac{C(V_0 - V_{min})}{P/V_0} \quad (1)$$

Assim, para a condição de 100% de carga nominal do motor, o tempo máximo de suportabilidade do ASD1, para uma tensão mínima nominal no elo CC de 208V, foi calculado como sendo 35,7ms, ou seja 2,14 ciclos, como mostrado na Figura 2.

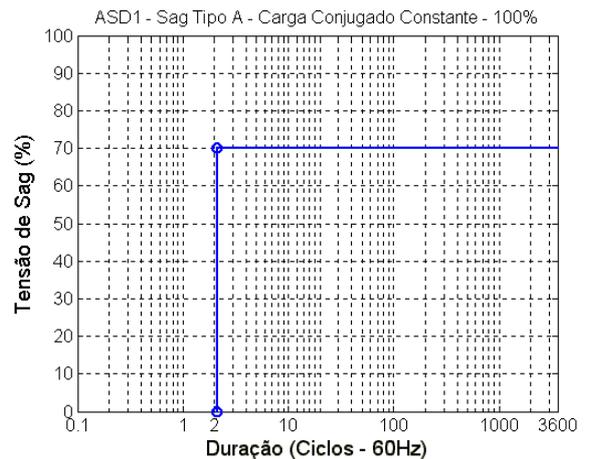


Fig. 2. Curva "teórica" de sensibilidade do ASD1 para afundamentos de tensão do Tipo A.

Para estudo deste sistema, o modelo no domínio do tempo foi equacionado e implementado no programa ACSL (*Advanced Continuous Simulation Language*), cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 3.

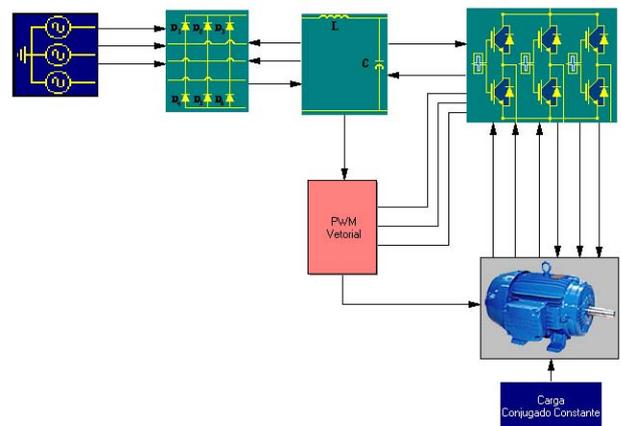


Fig. 3. Modelo do sistema implementado no *Graphic Modeller* do ACSL.

B. Sags Trifásicos Equilibrados Tipo "A"

As Figuras 4 e 5 apresentam a operação do inversor de frequência frente a um afundamento de tensão equilibrado para 80% e 50% da tensão nominal, respectivamente, com duração de 6 ciclos (100ms) na situação de 100% de carga no motor (8,3N.m).

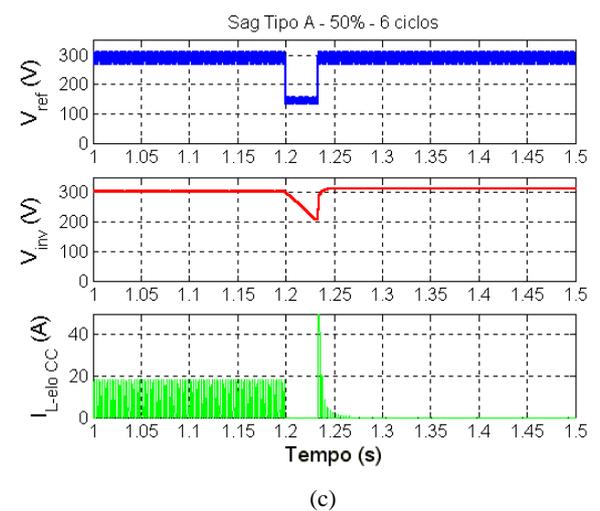
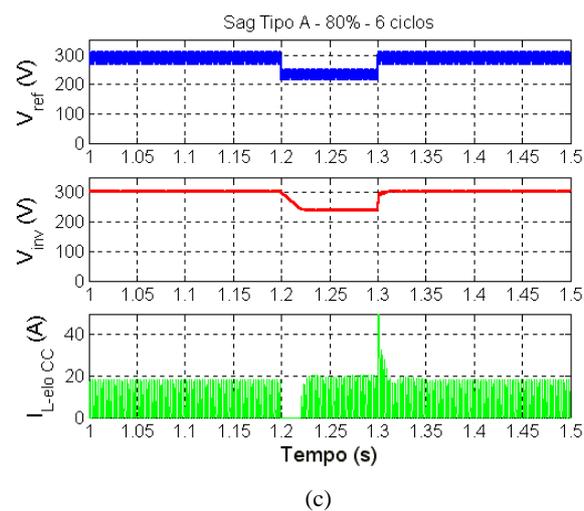
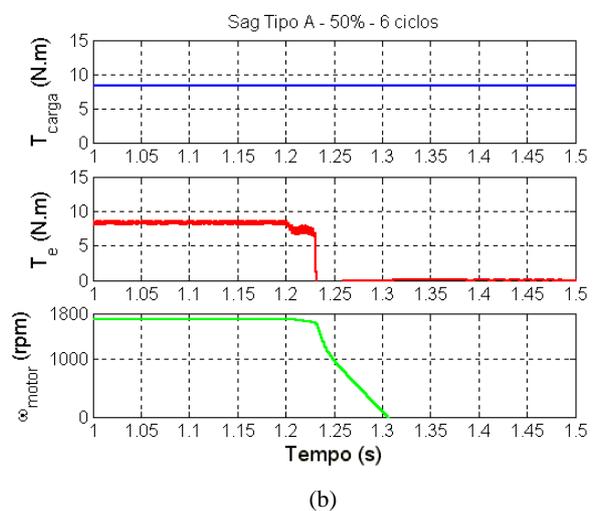
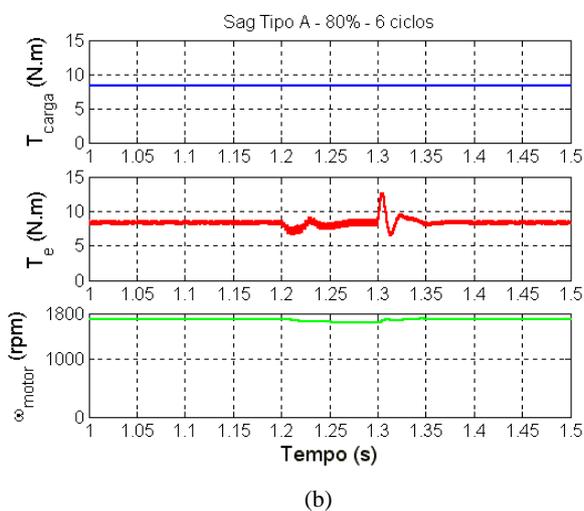
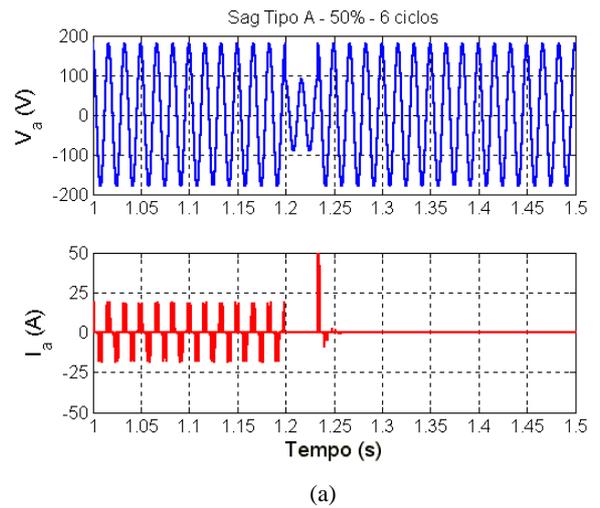
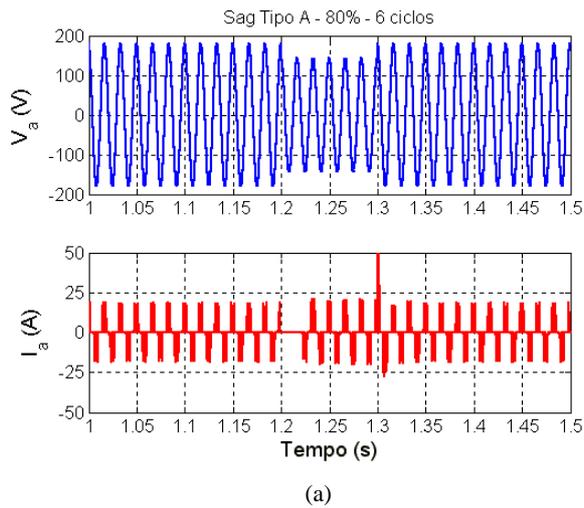


Fig. 4. Operação do ASD1 frente a *sag* do Tipo A, para 80%, com duração de 100ms. (a) Tensão fase-neutro e corrente de linha; (b) Conjugado de carga, conjugado eletromagnético e velocidade; (c) Tensão na saída do retificador, tensão no elo CC e corrente no indutor do ASD. Simulação.

Fig. 5. Operação do ASD1 frente a *sag* do Tipo A, para 50%, com duração de 100ms. (a) Tensão fase-neutro e corrente de linha; (b) Conjugado de carga, conjugado eletromagnético e velocidade; (c) Tensão na saída do retificador, tensão no elo CC e corrente no indutor do ASD. Simulação.

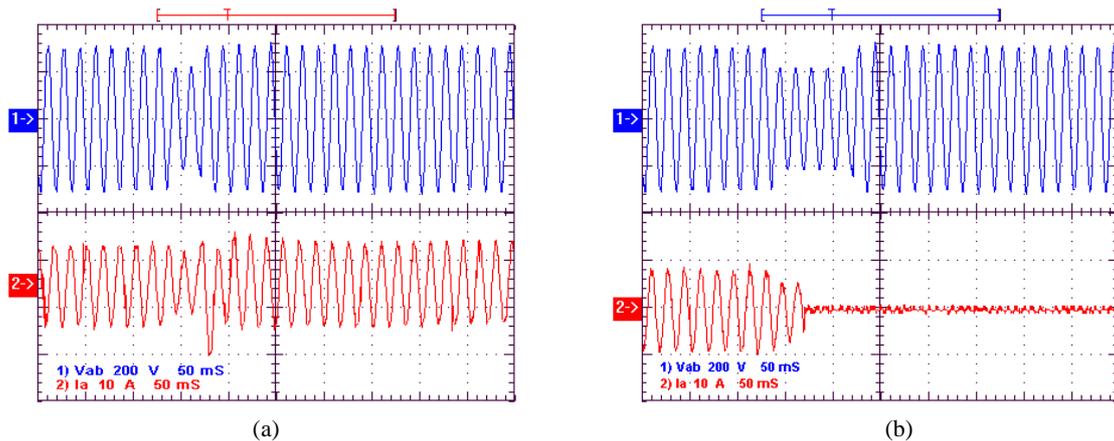


Fig. 8. Tensão de linha V_{ab} do ASD1 e corrente de linha I_a no motor, frente a um *sag* para 70%, durante (a) 2 ciclos e (b) 5 ciclos. Testes.

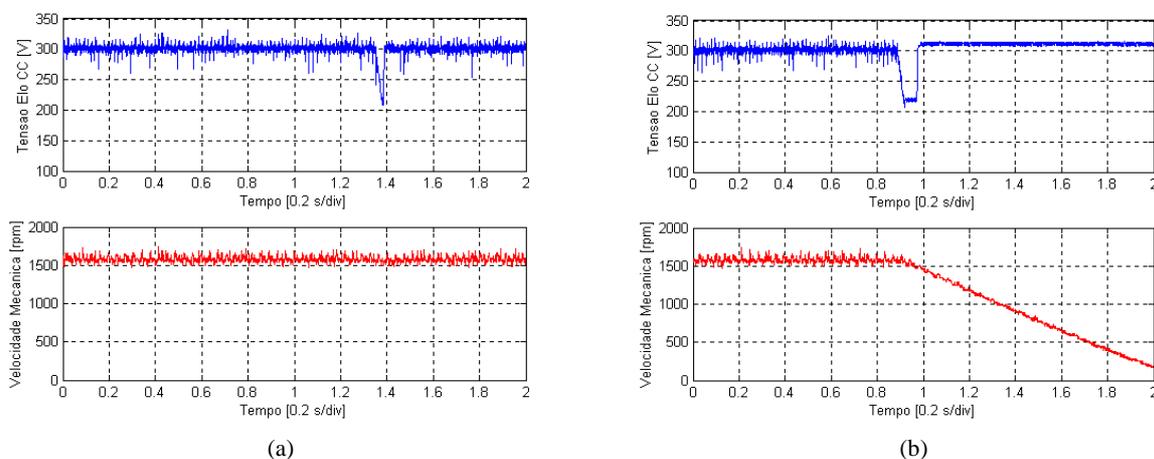


Fig. 9. Tensão no elo CC do ASD1 e velocidade mecânica do motor, frente a um *sag* para 70%, durante (a) 2 ciclos e (b) 5 ciclos. Testes.

A Figura 10 apresenta a curva de tolerância do ASD1 encontrada para este tipo de afundamento de tensão, com carregamento de 100% do motor, bem como a curva de tolerância ITIC [4]. Observa-se que nos casos de *sags* para 50% a 40%, o inversor de frequência em questão apresenta uma maior sensibilidade quando comparado com a curva de referência ITIC. Por outro lado, a suportabilidade dos mesmos frente a afundamentos de tensão acima de 70% mostra-se superior à citada referência.

No caso de interrupções momentâneas de tensão, o ASD1 em teste, com carregamento de 100%, desliga para eventos com duração igual ou superior a 2 ciclos.

Considerando-se que as correntes envolvidas no sistema encontravam-se em patamares muito próximos dos valores máximos permitidos pelos dispositivos de proteção, optou-se pela continuidade dos testes com carga no motor de apenas 50%.

Assim, a Figura 11 mostra os resultados alcançados nos ensaios dos dois inversores anteriormente descritos, para *sags* oriundos de faltas trifásicas na rede, também comparados com a curva de tolerância ITIC.

Ressalta-se a característica mais linear do ASD2 e sua maior suportabilidade a *sags* do Tipo A para até 50%, tanto em relação ao ASD1, quanto aos valores de referência ITIC.

Por outro lado, verifica-se uma performance inferior do ASD2 frente a *sags* mais profundos que 45%.

Observa-se ainda a pouca influência do carregamento do motor na sensibilidade do ASD, aumentando em 1,5 ciclos a tolerância do inversor a um *sag* para 70%, no caso de uma redução de 50% na carga, como relatado em [14].

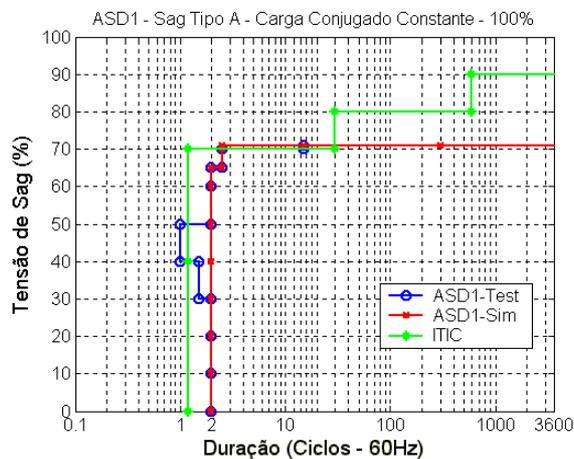


Fig. 10. Curva de tolerância do inversor de frequência ASD1 para *sags* trifásicos equilibrados. Testes.

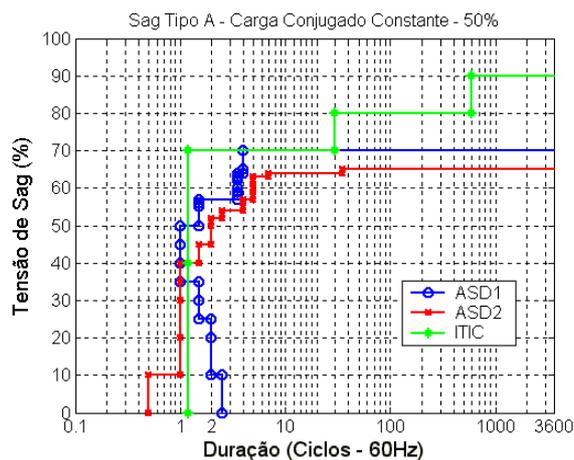


Fig. 11. Curva de tolerância dos inversores em teste para *sags* trifásicos equilibrados (Carga conjugado constante de 50%). Testes.

C. Sags Trifásicos Desequilibrados Tipo "D"

Para afundamentos de tensão trifásicos desequilibrados do Tipo D [[8], ou seja, resultantes de faltas fase-fase na rede para uma carga ligada em delta, testes semelhantes foram realizados. As amplitudes das tensões de duas fases foram variando de 90% a 0, em períodos de tempo de 0,5 ciclo a 1,0 minuto. Nestes casos, o carregamento do motor foi mantido constante em 50% do valor nominal (4,14N.m).

Os resultados são apresentados na Figura 12 a seguir, onde se observa uma suportabilidade bastante superior do ASD2 comparado ao ASD1.

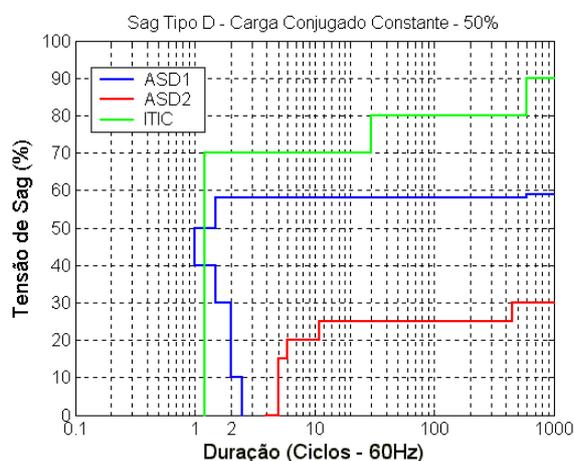


Fig. 12. Curva de tolerância dos em teste para *sags* desequilibrados do Tipo D (Carga conjugado constante de 50%). Testes.

D. Sags Trifásicos Desequilibrados Tipo "C*"

Oriundos de faltas monofásicas na rede para cargas em delta, os afundamentos de tensão trifásicos desequilibrados do Tipo C* são caracterizados por manter uma das tensões de linha no seu valor nominal.

A Figura 13 mostra a curva de tolerância do ASD1 frente a *sags* do Tipo C*. Convém ressaltar que o ASD2 suportou todos os *sags* aplicados, bem como interrupções momentâneas, por um período superior a 1,0 minuto.

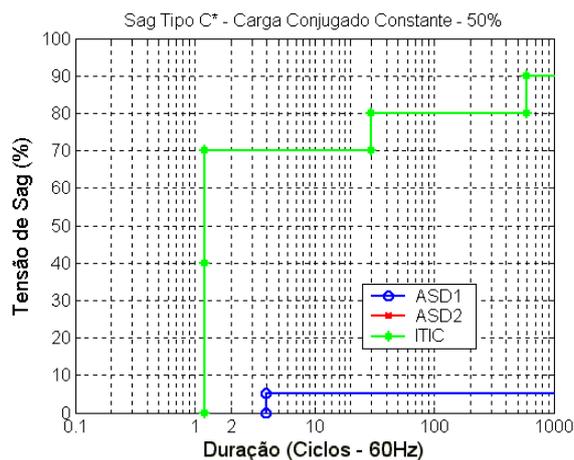


Fig. 13. Curva de tolerância do inversor de frequência ASD1 para *sags* trifásicos desequilibrados do Tipo C*, com carga conjugado constante de 50%. Testes.

Nestes casos, verifica-se a alta performance destes equipamentos frente a afundamentos de tensão devido às faltas monofásicas na rede. Tal comportamento já era esperado, considerando-se que os acionamentos são uma carga ligada em delta, onde somente as tensões de linha são de interesse.

Observa-se que os resultados verificados nos testes experimentais são praticamente os mesmos daqueles obtidos através de simulações, em especial no caso de o inversor estar acionando um motor com carga nominal (Figura 10), o que permite validar o modelo de simulação adotado.

V. CONCLUSÕES

Sendo os fenômenos de afundamentos de tensão, dentre aqueles relacionados à qualidade da energia elétrica, os responsáveis pelo maior índice de interrupção nos processos produtivos, com conseqüente prejuízo econômico na indústria e no comércio, o estudo de desempenho de equipamentos frente a estes fenômenos é de primordial importância.

A sensibilidade dos acionamentos testados frente a afundamentos de tensão equilibrados (Tipo A) é bem superior quando comparada com a situação de ocorrência de *sags* desequilibrados (Tipos D ou C*), como já era previsto. No primeiro caso, as curvas de tolerância resultantes apontam para equipamentos de baixa sensibilidade, quando comparados com a "curva ITIC". Vale a pena ressaltar que o ajuste de parâmetros dos ASD's sob teste é o padrão, isto é, de fábrica, onde o controle V/F é implementado e as malhas de corrente desabilitadas. Neste caso, a opção de religamento automático também estava desabilitada.

Para avaliação da tolerância dos inversores de frequência em questão, a figura de mérito utilizada é o desligamento da tensão de saída do ASD, o que ocorreu, em todos os casos, devido a subtensão no elo CC. Entretanto, acredita-se que o ajuste do relé de subtensão no elo CC esteja demasiadamente elevado, causando desligamentos desnecessários, quando o inversor ainda seria capaz de sintetizar a tensão de saída requerida pela carga, e a fonte do circuito de controle manter a necessária tensão de segurança.

Os testes realizados apontam para resultados com um bom nível de confiabilidade, mas que pode ser melhorado. Como dito anteriormente, a fonte de tensão programável somente ajusta a amplitude das tensões de fase e o tempo de duração dos sags para sintetizar os afundamentos de tensão. Cabe mais uma vez observar que o ângulo de fase das tensões de fase permanece constante (0°, 240° e 120°) durante os afundamentos de tensão, não constituindo um parâmetro programável do equipamento em questão. Por outro lado, o "ponto na onda" onde ocorre o sag, bem como o "ângulo de deslocamento" do mesmo, devido às impedâncias do sistema, também não foram aqui considerados.

Por fim, o modelo de simulação desenvolvido reflete, de forma bastante satisfatória, o comportamento dos equipamentos sob teste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H.G. Sarmiento and E. Estrada. "A Voltage Sag Study in an Industry With Adjustable Speed Drives". *IEEE Industry Applications Magazine*. pp.16-19. January / February 1996.
- [2] V.E. Wagner, A.A. Andreshak and J.P. Staniak. "Power Quality and Factory Automation". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol.26. No.4. pp.620-626. July / August 1990.
- [3] W.W. Carter. "Control of Power Quality in Modern Industry". *Proceedings of the IEEE Annual Textile Industry Technical Conference*. pp. 11/1-11/4. 1989.
- [4] <http://www.itic.org/technical/iticurve.pdf>
- [5] M.H.J. Bollen. "Voltage Sags in Three-Phase Systems". *IEEE Power Engineering Review*. pp. 8-11,15. September 2001.
- [6] A. von Jouanne, P.N. Enjeti and B. Banerjee. "Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable - Speed Drives". *IEEE Trans. On Industry Applications*. Vol.35. pp. 908-916. July/August 1999.
- [7] J.P. Abreu, J.M. Carvalho Fo. e F.M. Vilas-Boas. "Medidas Para Reduzir o Impacto de Depressões de Tensão na Produção". *Revista Eletricidade Moderna*. Págs. 100-108. Março / 1999.
- [8] Math H.J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags And Interruptions*. IEEE Press on Power Engineering. New York. 2000.
- [9] E. R. Collins Jr. and A. Mansoor. "Effects of Voltage Sags on AC Motor Drives". *Proceedings of the IEEE Annual on Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*. pp.1-7. June 1997.
- [10] "Low-Voltage Ride-Through Performance of 5-HP Adjustable-Speed Drives". *EPRI Power Electronics Applications Center*. Brief No. 9. January 1993.
- [11] "Ride-Through Performance of Adjustable-Speed Drives With Flying Restart". *EPRI Power Electronics Applications Center*. Brief No. 30. November 1995.
- [12] "Performance of an ASD Ride-Through Device During Voltage Sags". *EPRI Power Electronics Applications Center*. Brief No. 34. May 1996.
- [13] E.G. Strangas, V.E. Wagner and T.D. Unruh. "Variable Speed Drives Evaluation Test". *IEEE Industry Applications Magazine*. pp.53-57. January / February 1998.
- [14] A.K. Keus, R. Abrahams, J.M. van Coller and R.G. Koch. "Analysis of Voltage Dips (Sag) Testing Results of a 15kW PWM Adjustable Speed Drive (ASD)". *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical Machines and Drives*. IEMD'99. pp. 213-215. 1999.
- [15] I.C. de Albuquerque e R.P.S. Leão. "Avaliação da Resposta de Equipamentos Eletrônicos Usados na Indústria Petroquímica Quando Submetidos a Afundamentos de Tensão e Interrupções de Curta Duração". Encontro UFC e Indústria do Petróleo e Gás Natural. Fortaleza-CE. Outubro 2002.
- [16] IEC Standard 1000-4-11 (1994). "Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4: Testing and measuring techniques – Section 11: Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests".

DADOS BIOGRÁFICOS

Carla César Martins Cunha, nascida em 06/08/1966 em Varginha-MG, é engenheira eletricista (1988) e mestre em Engenharia Elétrica (1991) pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Desde 1992 é professora assistente da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES e atualmente encontra-se em doutoramento na UFMG. Suas áreas de interesse são: acionamentos e máquinas elétricas e qualidade da energia elétrica.

Selênio Rocha Silva é engenheiro eletricista (1980), mestre (1984) e doutor (1989) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB (Campina Grande). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, onde atua desde 1982 nas seguintes áreas: máquinas elétricas e dispositivos de potência, conversão e retificação da energia elétrica, geração (eólica) da energia elétrica e eletrônica industrial.