



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-01
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA – GCQ**

**SENSIBILIDADE DE ACIONAMENTOS A VELOCIDADE VARIÁVEL (ASD's)
FRENTE A VOLTAGE SAGS: ANÁLISE**

Carla César Martins Cunha*
Universidade Federal do Espírito Santo
UFES

Selênio Rocha Silva
Universidade Federal de Minas Gerais
UFMG

RESUMO

Este trabalho avalia a suportabilidade de dois ASD's trifásicos, de baixa potência (220/230V - 5kVA e 230V - 2,2kW), frente a *sags* oriundos de faltas trifásicas equilibradas e desequilibradas, através de uma montagem experimental para levantamento das referidas curvas de sensibilidade, conforme IEC 1000-4-11 [1]. 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 ASD's.

PALAVRAS-CHAVE

Afundamentos de tensão (*voltage sags*). Acionamentos a velocidade variável (ASD's). Curvas de tolerância.

1.0 - 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, os ASD's 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, *voltage sags* 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 *sags* 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. Afirma-se ainda que 68% dos distúrbios registrados são afundamentos de tensão, e que estes são os únicos responsáveis por perdas de produção [2], [3]. Estas perdas são normalmente causadas por *sags* mais profundos do que 87%, com duração superior a 8,3ms (0,5 ciclo).

Outra pesquisa [4] revela que um pouco mais do que 62% de distúrbios registrados são *sags* com duração inferior a 0,5s (30 ciclos). Em outro estudo [2], 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 *trip* (desligamento) do ASD envolvido em um processo contínuo. Comparando-se estes dados com as "curvas de tolerância" CBEMA ou ITIC [5], alguns chegam a afirmar que os ASD's 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 ASD introduza flutuações de velocidade, as quais podem deteriorar a qualidade do produto final. Adicionalmente, estes pequenos distúrbios resultam em decréscimos na tensão no elo CC do equipamento, levando-o ao *trip* por subtensão ou por sobrecorrente.

* Avenida Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901 - Belo Horizonte - MG - BRASIL
Tel.: (031) 3499-4875 - Fax: (031) 3499-5480 - E-MAIL: carla@cpdee.ufmg.br

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 [6].

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 [7]. No Brasil, avalia-se que tais prejuízos possam chegar a US\$ 2 bilhões por ano [8].

Este projeto pretende realizar um estudo da suportabilidade destes equipamentos trifásicos a *voltage sags*, oriundos de faltas trifásicas equilibradas e desequilibradas no sistema ao qual ele esteja conectado. Assim, o trabalho procura confirmar os resultados até então apresentados na literatura internacional, mas pouco explorados experimentalmente com equipamentos comercializados no Brasil.

2.0 - ACIONAMENTOS A VELOCIDADE VARIÁVEL (ASD's)

2.1 Tolerância a *Voltage Sags*

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 [9]. 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 [5], [9]. Esta curva, agora denominada “curva ITIC”, está reproduzida na Figura 1.

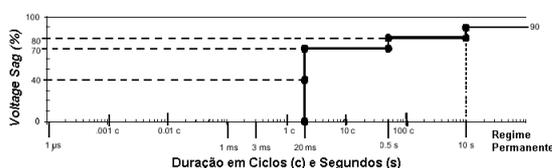


FIGURA 1 – Curva ITIC de tolerância de computadores frente a *voltage sags*. Revisada em 2000 [5].

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% do valor nominal não permaneceriam por mais do que 0,5s. Por outro lado, as interrupções

momentâneas de tensão (0 a 10% da tensão nominal) podem durar não mais do que 20ms, ou seja, um pouco além de um ciclo em 60Hz.

2.2 Sensibilidade de ASD's a *Voltage Sags*

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 [10]. Durante um *voltage sag*, 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 ASD 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 ASD's 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 ASD's [2] [11] [12] [13] [14] [15]. Em [11] 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 ASD's comerciais de 5hp foram testados e em 90% deles ocorreu *trip* para *sags* abaixo de 50% da tensão nominal, com duração de 5 ciclos [13].

Neste mesmo trabalho [13], a performance de um ASD comercial de 5hp, 480V, acrescido de um circuito (regulador *chopper*) conectado ao elo CC, para aumento da tolerância a *voltage sags*, foi avaliado.

Em [15], um ASD 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 *voltage sags* realizados pelo EPRI-PEAC [12] destacaram a importância do religamento síncrono. Afundamentos de tensão para 50%, com duração de 5 ciclos, foram aplicados em dois modelos comerciais de ASD's 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 *trip* no inversor Modelo A, o ASD retornou à operação quase que instantaneamente após o *sag*, com uma pequena queda da velocidade. Por outro lado, o *trip* no Modelo B o desligou por quase 1 segundo após o *sag*. Durante este intervalo, o ASD 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 ASD foi novamente sincronizado com o motor, acelerando-o para 1740rpm em 3,5 segundos.

Observa-se que o inversor de frequência, com 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, permitiu uma queda de 90% na velocidade mecânica, e levou cerca de 4 segundos para restaurar a velocidade. Em processos que suportam tal variação de velocidade, os dois acionamentos podem ser considerados imunes a *sags* 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 velocidade e conjugado praticamente constantes [12].

3.0 -LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL DE CURVAS DE SENSIBILIDADE

3.1 Descrição do Sistema

Com a finalidade de avaliar e comparar a suportabilidade de ASD's frente a *voltage sags* comercializados no Brasil, e já disponíveis no Laboratório de Aplicações Industriais do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG, realizou-se uma montagem experimental para levantamento das referidas curvas de sensibilidade, objeto deste projeto.

O sistema utilizado para realização dos testes, representado no diagrama de blocos da Figura 2, é composto de:

- Uma fonte de tensão trifásica programável, ASX-360 da Pacific Power Source, 132V_{φ-N}, 6kVA;
- O inversor de frequência trifásico, denominado ASD1, 220/ 230V, 5kVA, 5kHz; e um segundo modelo, chamado de ASD2, 230V, 2,2kW, 4kHz, ambos utilizados com o ajuste de parâmetros (programação) de fábrica;
- Motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo, 2cv, 254/440 V (□-□), 4 pólos, 60Hz, 1715 rpm, momento de inércia de 0.0045kg.m²;
- Finalmente, a carga é representada por um gerador CC, alimentando um banco de resistores variáveis, de forma que a sua corrente de armadura permaneça constante, a fim de se representar uma carga do tipo conjugado constante.

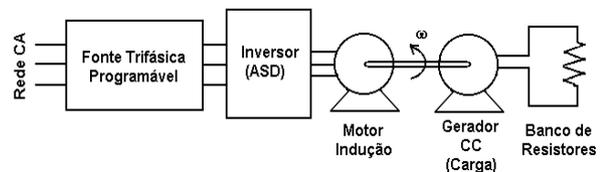


FIGURA 2 – Diagrama de blocos do sistema utilizados para os testes de ASD's.

A fonte de tensão programável sintetiza os afundamentos de tensão, onde se pode ajustar a amplitude das tensões de fase e o tempo de duração dos *sags*. Cabe 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.

Com o sistema operando em regime permanente, e com tensões trifásicas equilibradas e valor nominal, o *sag* programado é aplicado ao inversor de frequência, conforme IEC 1000-4-11 [1]. Para os testes realizados, a tensão na entrada do ASD, bem como a tensão no elo CC, a corrente de linha e a velocidade do motor foram monitoradas. Tais procedimentos foram repetidos para a análise do efeito de diferentes tipos de *sags* nos dois ASD's de modelos distintos, além de condições de operação do acionamento diferenciadas.

3.2 Sags Trifásicos Equilibrados Tipo "A"

Para *sags* trifásicos equilibrados, Tipo A, segundo classificação de [9], variando de 90% a 10% da tensão nominal (220V), além de interrupções momentâneas, com duração de 0,5 ciclo a 1,0 minuto, testes no sistema descrito anteriormente foram realizados, com carregamentos de 100% (8,3N.m) e 50% (4,14N.m).

A título de ilustração, a Figura 3 mostra o perfil da tensão V_{ab} aplicada ao ASD1, bem como a corrente I_a de linha do motor, no caso de um *sag* para 70% da tensão nominal, com duração de 2 e 5 ciclos, na situação de 100% de carga no motor.

Por outro lado, a Figura 4 mostra o perfil da tensão no elo CC do ASD1, além da velocidade mecânica, para o mesmo caso anterior, ou seja, um *sag* para 70% da

tensão nominal, com duração de 2 e 5 ciclos, na situação de 100% de carga no motor.

Observa-se, na Figura 4 - (b), durante o *sag* de 5 ciclos, que a tensão no elo CC atinge o valor mínimo de 208V permitido pelo ASD1, levando-o ao desligamento por “subtensão no circuito intermediário”. Este *trip* causa a interrupção da alimentação do motor, mostrada na Figura 3 - (b).

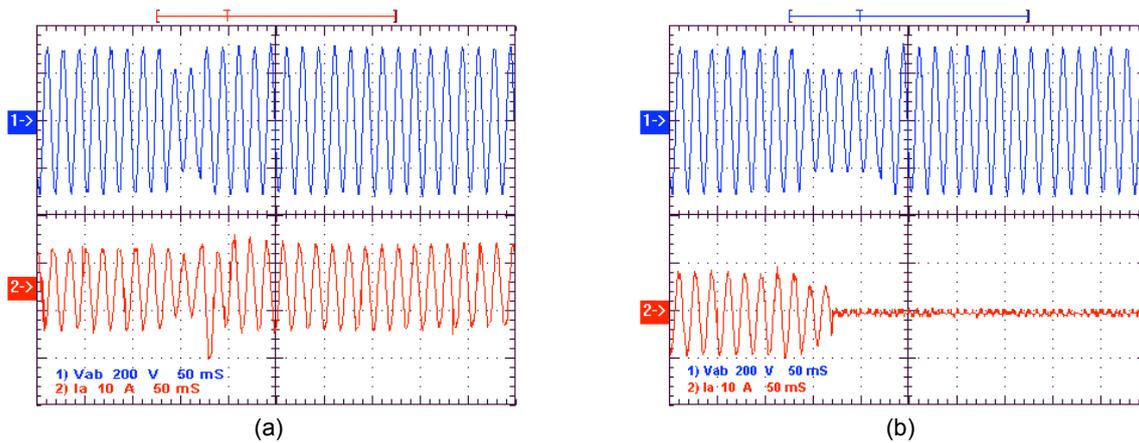


FIGURA 3 – Tensão de linha V_{ab} do ASD1 e corrente de linha I_a no motor, frente a um *sag* para 70%, durante (a) 2 ciclos e (b) 5 ciclos.

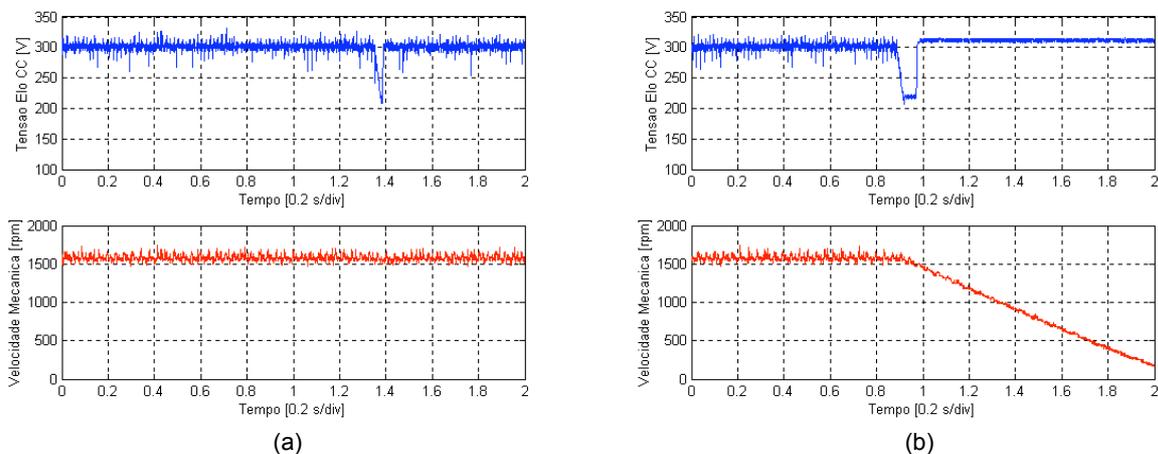


FIGURA 4 – Tensão no elo CC do ASD1 e velocidade mecânica do motor, frente a um *sag* para 70%, durante (a) 2 ciclos e (b) 5 ciclos.

A Figura 5 a seguir apresenta a curva de tolerância do ASD1 encontrada para este tipo de *sag*, com carregamento de 100% do motor, bem como a curva de tolerância ITIC [5]. 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 *sags* 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%.

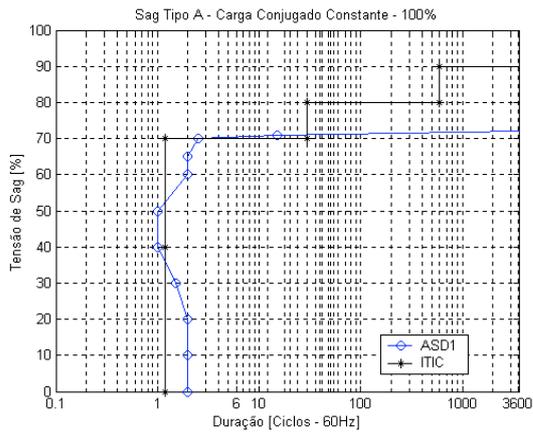


FIGURA 5 – Curva de tolerância do inversor de frequência ASD1 para sags trifásicos equilibrados.

Assim, a Figura 6 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.

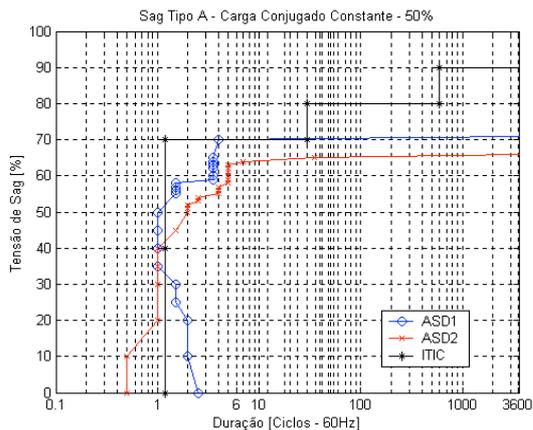


FIGURA 6 – Curva de tolerância dos inversores em teste para sags trifásicos equilibrados (Carga conjugado constante de 50%).

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%.

3.3 Sags Trifásicos Desequilibrados Tipo "D"

Para sags trifásicos desequilibrados do Tipo D [9], 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 7 a seguir, onde se observa uma suportabilidade bastante superior do ASD2 comparado ao ASD1.

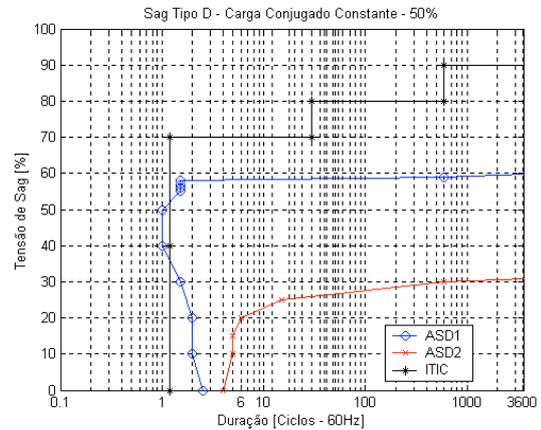


FIGURA 7 – Curva de tolerância dos em teste para sags trifásicos desequilibrados do Tipo D (Carga conjugado constante de 50%).

3.4 Sags Trifásicos Desequilibrados Tipo "C"

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

A Figura 8 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.

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

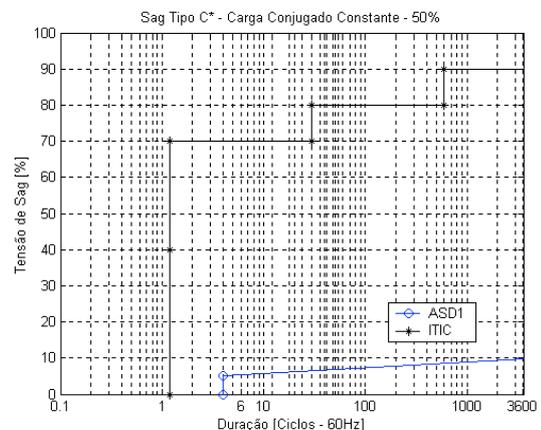


FIGURA 8 – Curva de tolerância do inversor de frequência ASD1 para sags trifásicos desequilibrados do Tipo C*, com carga conjugado constante de 50%.

4.0 - CONCLUSÕES

Sendo os fenômenos de *voltage sags*, dentre aqueles relacionados à qualidade da energia elétrica, 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 ASD's testados frente a *sags* 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", com exceção dos *sags* com duração inferiores a 1,2 ciclos (20ms) e amplitudes menores que 50%.

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 *trip* 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 fundamentos de tensão. Cabe mais uma vez observar que o ângulo de fase das tensões de fase permanece constante (0°, 240° e 120°) durante os fundamentos 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.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) Hector G. Sarmiento and Eduardo Estrada. *A Voltage Sag Study in an Industry With Adjustable Speed Drives*. IEEE Industry Applications Magazine. pp.16-19. January / February 1996.
- (3) Van E. Wagner, Allen A. Andreshak and Joseph P. Staniak. *Power Quality and Factory Automation*. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol.26. No.4. pp.620-626. July / August 1990.
- (4) 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.
- (5) <http://www.itic.org/technical/iticurve.pdf>
- (6) M.H.J. Bollen. *Voltage Sags in Three-Phase Systems*. IEEE Power Engineering Review. pp. 8-11,15. September 2001.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags And Interruptions*. Math H.J. Bollen. IEEE Press on Power Engineering. New York. 2000.
- (10) E. Randolph Collins Jr. and Arshad 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.
- (11) *Low-Voltage Ride-Through Performance of 5-HP Adjustable-Speed Drives*. EPRI Power Electronics Applications Center. Brief No. 9. January 1993.
- (12) *Ride-Through Performance of Adjustable-Sped Drives With Flying Restart*. EPRI Power Electronics Applications Center. Brief No. 30. November 1995.
- (13) *Performance of an ASD Ride-Through Device During Voltage Sags*. EPRI Power Electronics Applications Center. Brief No. 34. May 1996.
- (14) Elias G. Strangas, Van E. Wagner and Tim D. Unruh. *Variable Speed Drives Evaluation Test*. IEEE Industry Applications Magazine. pp.53-57. January / February 1998.
- (15) 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.