



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 103

Tópico: Modelagens e Simulações

## SIMULAÇÕES E TESTES DE SENSIBILIDADE DE ACIONAMENTOS A VELOCIDADE VARIÁVEL (ASD's) FRENTE A VOLTAGE SAGS

Carla César Martins Cunha\*  
Universidade Federal do Espírito Santo

Selênio Rocha Silva  
Universidade Federal de Minas Gerais

### 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, através simulações e 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. Simulações. Testes.

### 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.

\* UFMG/EE/CPDEE - Av. Antônio Carlos, 6627 - CEP 31.270-901 - Belo Horizonte - MG - BRASIL  
Tel.: +55 (031) 3499-4875 - FAX: +55 (031) 3499.5480 - E-mail: carla@cpdee.ufmg.br

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.

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.

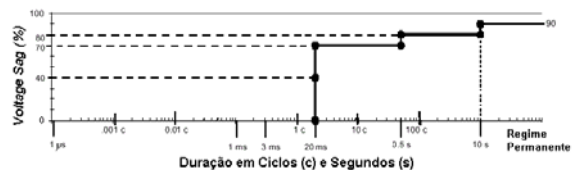


Figura 1 – Curva ITIC de tolerância de computadores frente a *voltage sags*. Revisada em 2000 [5].

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% 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.

### 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, 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 com 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, sendo um dotado de controle vetorial e religamento síncrono e o outro com controle senoidal e religamento assíncrono, ambos de 5hp, 460V, alimentando um motor de 5hp, 1740rpm, com carregamento de 75%. Observa-se que o inversor 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 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 *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 .

### 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, é composto de:

- Fonte de tensão trifásica programável, ASX-360 da *Pacific Power Source*,  $132V_{\phi-N}$ , 6kVA;
- Inversores de frequência trifásico ASD1, 220/230V, 5kVA, 5kHz; e o 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 ( $\Delta$ -Y), 4 pólos, 60Hz, 1715 rpm, momento de inércia de  $0.0045\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ;
- 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.

A fonte de tensão programável sintetiza os afundamentos de tensão, onde se pode ajustar a amplitude das tensões e o tempo de duração dos *sags*. Com o sistema operando em regime permanente, e com tensões trifásicas equilibradas nominais, 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, além de interrupções momentâneas, com duração de 0,5 ciclo a 1,0 minuto, testes no referido sistema foram realizados, com carregamentos de 100% (8,3N.m) e 50% (4,14N.m). A Figura 2.(a) ilustra

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%, com duração de 2 e 5 ciclos, na situação de 100% de carga.

Por outro lado, a Figura 2.(b) mostra o perfil da tensão no elo CC do ASD1, além da velocidade mecânica, para o mesmo caso anterior.

Observa-se, nesta figura, 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 2.(b).

A Figura 3 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]. Verifica-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%, também mostrados na Figura 3.

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 [15].

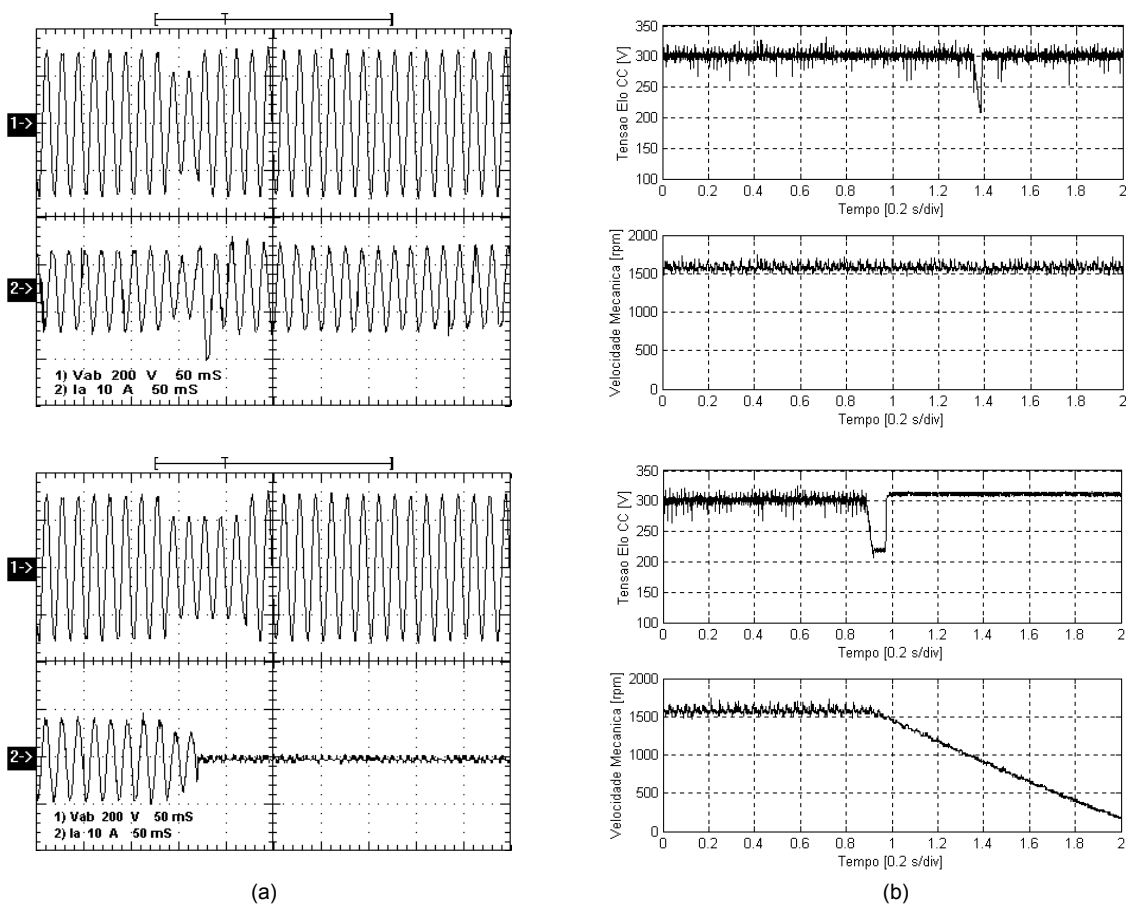


Figura 2 – (a) Tensão de linha  $V_{ab}$  do ASD1 e corrente de linha  $I_a$  no motor; (b) Tensão no elo CC do ASD1 e velocidade mecânica do motor, frente a um *sag* para 70%, durante 2 ciclos e 5 ciclos.

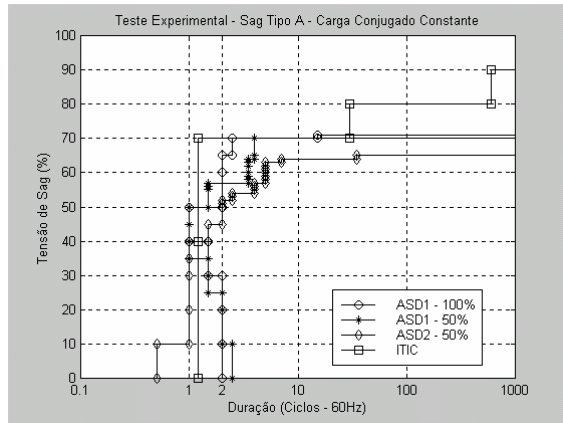


Figura 3 – Curva de tolerância dos inversores de frequência para sags trifásicos equilibrados - Testes.

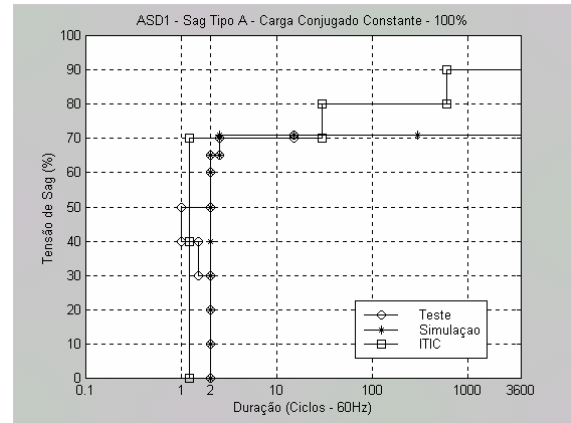


Figura 5 – Curva de tolerância do inversor de frequência ASD1 para sags trifásicos equilibrados - Simulações.

#### 4.0 - SIMULAÇÃO DE ASD'S

##### 4.1 Modelo para Simulação

Para estudo deste sistema, um modelo no domínio do tempo foi implementado no programa ACSL (*Advanced Continuous Simulation Language*) e contém:

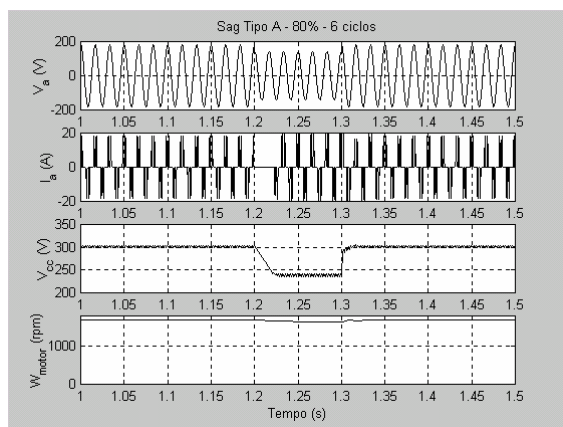
- Fonte ideal de tensão trifásica 60Hz, 220V.
- Inversor trifásico (ASD1) com diodos, elo CC com indutor série ( $L=10\mu\text{H}$  e  $R=0.5\Omega$ ) e capacitor *shunt* ( $C=1880\mu\text{F}$ ), PWM (5kHz) com controle vetorial. Todos os diodos e IGBT's do ASD são considerados ideais e nenhuma malha de controle (corrente, velocidade, etc...) está representada.
- Motor de indução trifásico, 2cv, 220V, 4 pólos, 60Hz, 1715 rpm,  $0.0045\text{kg.m}^2$ , 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.

##### 4.2 Sags Trifásicos Equilibrados Tipo "A"

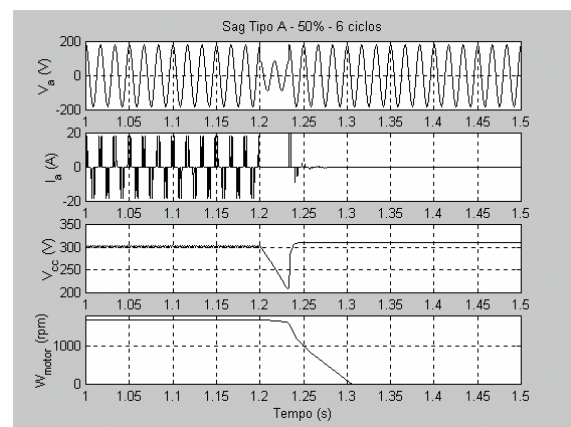
A Figura 4 apresenta a operação do inversor de frequência frente a um sag equilibrado para 80% e 50% da tensão nominal, respectivamente, com duração de 6 ciclos (100ms) na situação de 100% de carga no motor .

Desta forma, várias simulações foram realizadas com o objetivo de se obter curvas de susceptibilidade do inversor de frequência (ASD1) frente a afundamentos de tensão.

A Figura 5 mostra, então, a referida curva com os resultados das simulações, no caso de sags do Tipo A. Observa-se que os resultados obtidos através de simulações são praticamente os mesmos daqueles verificados nos testes experimentais, em especial no caso de o inversor estar acionando um motor com carga nominal , o que permite validar o modelo de simulação adotado.



(a)



(b)

Figura 4 – Tensão de linha  $V_{ab}$  do ASD1, corrente de linha  $I_a$  no motor, tensão no elo CC do ASD1 e velocidade mecânica do motor, frente a um sag para (a) 80% e (b) 50%, durante 6 ciclos.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Sendo os fenômenos de *voltage sags*, 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.

Nos testes dos ASD's frente a *sags* equilibrados (Tipo A), 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 *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.

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

## 6.0 - 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] 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.
- [3] 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.
- [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] Math H.J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags And Interruptions*. IEEE Press on Power Engineering. New York. 2000.
- [10] 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.
- [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] 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.
- [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.