

Avaliação do desempenho do ASD sob variações de tensão de curta duração

Ruty P. S. Leão e Ivo C. de Albuquerque – UFC Marcony E. Melo - COELCE

Resumo – Em um ambiente industrial baseado em equipamentos eletrônicos e processos automatizados, a sensibilidade dos dispositivos e equipamentos a variações de tensão de curta duração tem chamado bastante atenção e implicado em diversos estudos. Um dos problemas mais sérios enfrentados pela indústria é a influência da qualidade de energia na produtividade e rentabilidade industrial. Os Acionamentos AC de Velocidade Variável - ASD, largamente utilizados na indústria, apresentam um comportamento indesejável mediante perturbações na tensão tais como afundamentos de tensão e interrupções de curta duração. Este artigo apresenta resultados de simulações computacionais para ASD mono e trifásicos mediante tais distúrbios. Para o caso trifásico foi considerada a condição de afundamento de tensão desbalanceado. Os testes foram realizados com base na norma internacional do IEC 61000-4-11 que define métodos de teste de imunidade e faixa preferencial de valores para equipamentos elétricos e/ou eletrônicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão. Os resultados testados apresentam o comportamento de ASD a diversas condições de distúrbios, de carga e parâmetros elétricos.

Palavras Chaves – Qualidade de Energia, Afundamentos de Tensão, Interrupções de Curta Duração, Tolerância a Variações de Tensão, Sensibilidade de ASD.

I. INTRODUÇÃO

Grande atenção tem sido dada por consumidores e agências reguladoras à qualidade da energia elétrica fornecida pelas companhias de distribuição. Reconhecendo a importância e a necessidade de regulamentação e supervisão nos serviços de energia elétrica, consumidores esperam medidas a serem tomadas pelos fabricantes de equipamentos que assegurem uma melhor compatibilidade entre fornecimento de energia e sensibilidade do equipamento durante variação na qualidade de energia. É importante inferir na performance e imunidade de um equipamento eletro-eletrônico conectado à rede de energia elétrica. A sensibilidade de equipamentos tem causado impactos econômicos e descontentamento a todas as classes de consumidores. Na indústria, os ASD, o equipamento eletrônico industrial mais comum, controla mais eficientemente os motores elétricos. Por outro lado, a suscetibilidade dos ASD mediante variações de tensão de curta duração tem conduzido a disputas entre consumidores, concessionárias e fabricantes. Este artigo avalia através de simulação computacional usando PSPICE V6.0 a resposta de ASD mono e trifásico mediante afundamentos de tensão para 70%, 40% e 0% de 5 ciclos de duração. Os testes estão baseados na norma internacional do IEC 61000-4-11 [1]. Os resultados da simulação mostram a influência da capacitância do barramento dc, do desequilíbrio da tensão de alimentação, a conexão do transformador a montante do ASD, e a severidade do afundamento de tensão na tolerância do ASD. Um ASD ac é tanto mais imune à variação na tensão quanto mais energia, pelo maior tempo possível, ele é capaz de suprir a carga sem falhar.

II. TOPOLOGIA E PARÂMETROS DOS ASD

O ASD estudado consiste basicamente de uma fonte de tensão senoidal a 60Hz em série com uma indutância, um retificador em ponte a diodo não-controlado, um capacitor no barramento dc, um inversor senoidal a MOSFET com modulação a PWM com frequência chaveamento de 10kHz, e um filtro LC. O ASD controla uma carga puramente resistiva. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos de um ASD genérico.

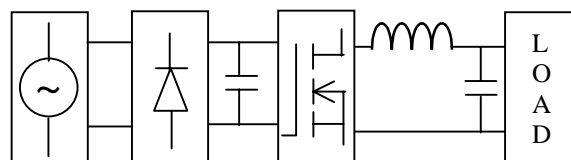


Fig. 1. Diagrama de Blocos de um ASD Genérico.

Os parâmetros de ASD são mostrados na tabela 1. Os resultados das simulações de um ASD com estes parâmetros são tomados como referência.

TABELA I
PARÂMETROS DE UM ASD MONOFÁSICO E TRIFÁSICO.

No. Fases	Fonte	DC	Filtro	Carga
1 ϕ	$U_T = 100V$ $L = 100\mu H$	$C = 10mF$	$C = 100\mu F$ $L = 100\mu H$	1Ω
3 ϕ	$U_T = 540V$ $L = 100\mu H$	$C = 1mF$	$C = 100\mu F$ $L = 100\mu H$	10Ω

Os afundamentos momentâneos de tensão são aplicados por uma comutação abrupta entre fontes de tensão em paralelo. Interruptores ideais *topen* (normalmente fechado) e *tclose* (normalmente aberto) são posicionados adequadamente para comutar entre uma fonte de tensão U_T e outra de $a\%$ de U_T . A percentagem de $a\%$ pode assumir 0%, 40% e 70%. Os afundamentos são aplicados somente após o circuito ter alcançado o estado permanente.

III. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentadas e analisadas as curvas de tensão do barramento dc e da tensão na carga como resposta para várias características de afundamentos de tensão e parâmetros de ASD.

A norma internacional IEC 61000-4-11 define interrupções de curta duração e afundamentos de tensão para os seguintes níveis de teste em % de U_T : 0%, 40% e 70%; e duração de 0.5, 1, 5, 10, 25, 50 ciclos, e qualquer outra duração específica ao produto. Um ou mais níveis de testes e durações mencionados podem ser escolhidos [1].

Quando um ASD é submetido a um afundamento de tensão a redução na magnitude da tensão é transferida à barra dc que cai exponencialmente.

A energia fornecida pelo capacitor dc à carga diminui com o consumo de energia pela carga. A energia armazenada no capacitor dc é determinada pela diferença da energia do capacitor no início do afundamento de tensão e a energia consumida pela carga durante o tempo t [2,3], como mostrado em (1).

$$\frac{1}{2} CV^2(t) = \frac{1}{2} CV_0^2 - Pt \quad (1)$$

C é a capacitância do barramento dc, $V(t)$ é a tensão no capacitor no instante t , V_0 é a tensão na barra dc no instante do afundamento de tensão, P é a potência da carga e t é o tempo decorrido de descarga do capacitor.

A. ASD Monofásico

Interrupções de curta duração representam a condição mais severa de afundamento de tensão. Quando um ASD é submetido a um afundamento de tensão para 0%, 5 ciclos, a redução de tensão é transferida à barra dc como mostra a figura 2.

Durante o afundamento e enquanto a tensão da rede é menor que a tensão na barra dc, os diodos do retificador ficam reversamente polarizados e a carga passa a ser suprida pela energia armazenada no capacitor que decai exponencialmente.

No início do afundamento de tensão V_0 na barra dc é de 50,678V e leva 19ms (1,15 ciclos) para alcançar 50% V_0 , i.e., um quarto da capacidade de armazenamento do capacitor de acordo com (1).

A figura 2 também mostra a curva de tensão na carga com um decaimento similar ao da barra dc. Após 5 ciclos de duração do afundamento ainda há energia residual no capacitor. A falta de energia no elo dc para alimentar o controle do acionamento e a carga pode levar ao desligamento do ASD.

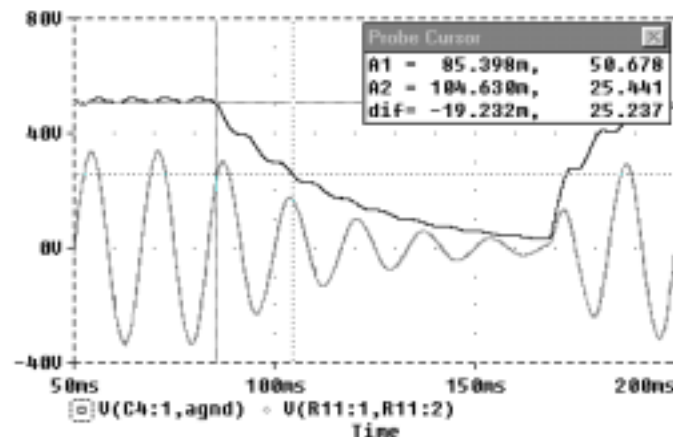


Fig. 2. Tensão DC e AC na Carga.

A corrente de alimentação do ASD é mostrada na figura 3 para a condição antes, durante e depois do afundamento de tensão. Durante o afundamento a corrente de entrada é nula e o inversor é alimentado pelo capacitor do barramento dc até

que a tensão da fonte exceda a tensão dc e os diodos sejam polarizados diretamente entrando em condução.

Quando a tensão retorna ao normal ocorre um pico de corrente de 83%. Essa elevação brusca na corrente é resultado do chaveamento de tensão sobre o capacitor e a amplitude depende da impedância da fonte, da capacitância dc e da potência da carga.

A sobrecorrente após o término do afundamento de tensão pode levar a uma falta no ASD devido o disparo de dispositivos de proteção.

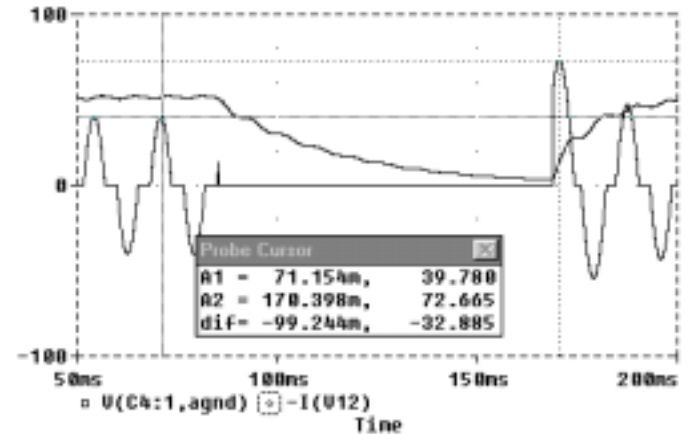


Fig. 3. Tensão no barramento DC e Corrente de entrada AC.

Se o equipamento é testado para um afundamento para 0%, geralmente não há necessidade de teste para outros níveis de tensão para a mesma duração [1].

O *ripple* de tensão é definido como a diferença entre a máxima e a mínima tensão no barramento dc. A figura 4 mostra um *ripple* de tensão de 1,88V e 120Hz em condições de operação normal.

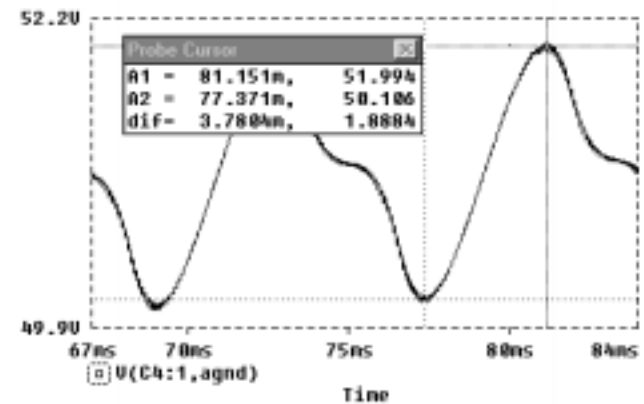


Fig. 4. Ripple de tensão no barramento DC.

O valor da tensão dc V_0 depende do ângulo de fase da tensão da rede no instante do afundamento. V_0 na figura 5 é igual a 52,479V e na figura 2 igual a 50,320V. A diferença entre os tempos de decaimento para alcançar 50% de V_0 para as situações descritas é de 3,393ms, significando um aumento de 17,5% quando V_0 é igual a 52,479V.

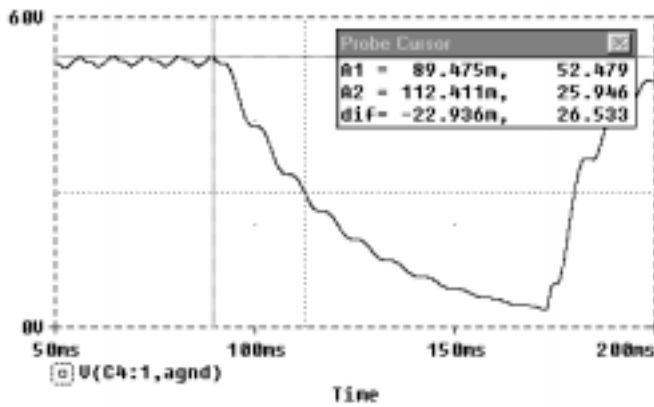


Fig. 5. Tensão no barramento DC para afundamento de tensão para 0%.

A suportabilidade dos ASD é melhorada quando o afundamento de tensão acontece em V_0 máximo.

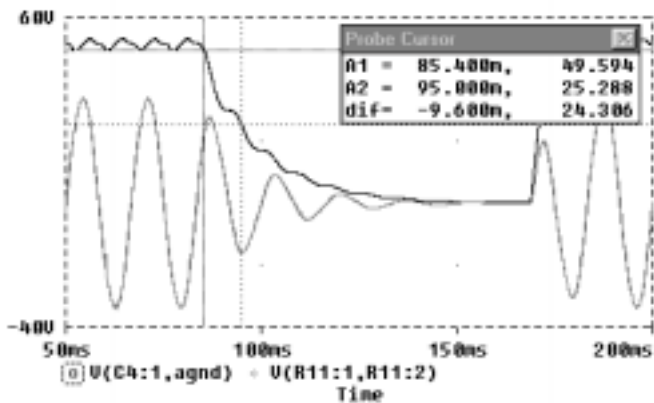


Fig. 6. Curva de tensão na barra DC e na carga para interrupção de curta duração e $C=5mF$.

Se o capacitor da barra dc tem metade da capacidade ($5mF$) e o afundamento de tensão de para 0%, 5ciclos, o capacitor descarrega duas vezes mais rápido ($9,6ms$) para alcançar 50% de V_0 , como mostra a figura 6. O ripple de tensão é duas vezes mais alto ($3,68V$) que o caso de referência.

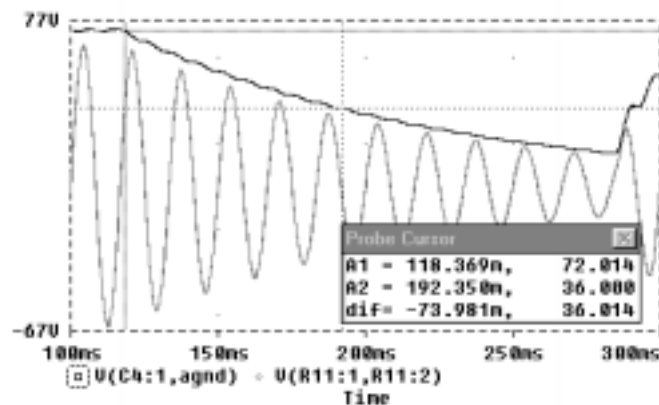


Fig. 7. Curvas de tensão na barra dc e na carga para $R=5\Omega$.

A figura 7 apresenta as curvas de tensão no capacitor dc e na carga mediante afundamento para 0%, 5ciclos, quando a resistência na carga é cinco vezes maior (5Ω) do que o caso de referência. Como a carga é menor V_0 é maior, com um tempo

de descarga 5,5 vezes maior para atingir 50% de V_0 do caso base.

A tolerância do ASD a variações na tensão de curta duração é ditada não somente pela severidade do distúrbio de tensão, mas também pelo tempo decorrido. V_0 , C , e a carga determinam o tempo de descarga.

Testes para uma frequência de chaveamento menor de 2kHz mostrou que o capacitor descarrega mais rápido. O tempo para alcançar 50% de V_0 foi reduzido pela metade. A tensão na carga por sua vez apresentou um aumento no espectro harmônico, o que contribuiu para o aumento de potência consumida pela carga.

B. ASD Trifásico

Quando uma falta acontece no sistema de distribuição, a tensão no barramento do consumidor depende da configuração do sistema, do local da falta, da impedância do sistema vista pela falta, da impedância do alimentador, da distância até a falta, e das conexões dos transformadores a montante da barra do consumidor [2,3,4,5].

Como apresentado em [2,3] as tensões de linha resultantes na entrada do ASD são mostradas na figura 8.

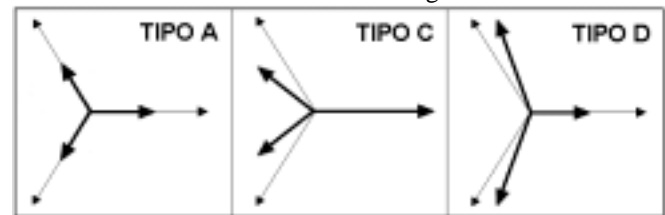


Fig. 8. Tensões de linha para afundamentos de tensão balanceados e desbalanceados.

Os três tipos de afundamentos de tensão A, C e D são apresentados em equações da tabela 2. A tensão V representa a magnitude do afundamento de tensão, $V=a\% U_T$.

TABELA II
REPRESENTAÇÃO DOS FASORES DE TENSÃO

Tipo A	Tipo C	Tipo D
$V_1=V$	$V_1=1$	$V_1=V$
$V_2=-1/2V-j\sqrt{3}/2V$	$V_2=-1/2-j\sqrt{3}/2V$	$V_2=-1/2V-j\sqrt{3}/2$
$V_3=-1/2V+j\sqrt{3}/2V$	$V_3=-1/2+j\sqrt{3}/2V$	$V_3=-1/2V+j\sqrt{3}/2$

Como descrito pelo diagrama fasorial na figura 8, os afundamentos de tensão podem ser balanceados ou desbalanceados dependendo das causas. Contudo a maior parte é causada por para faltas assimétricas.

A seguir, as respostas de ASD a afundamentos de tensão para 70% e 40%, 5ciclos, tipo A, C e D são apresentadas.

Uma falta equilibrada é o tipo de falta mais severa. A figura 9 apresenta a condição de afundamento de tensão balanceado. Embora o afundamento seja balanceado a tensão na carga é desequilibrada exceto quando a tensão na barra dc é menor que do que a tensão da rede e os diodos são polarizados diretamente. Mesmo quando a tensão da rede retorna ao normal, a tensão na carga permanece ainda desequilibrada por um certo tempo. A tensão na barra dc nesta condição cresce subitamente para 887V representando 170,57% de V_0 .

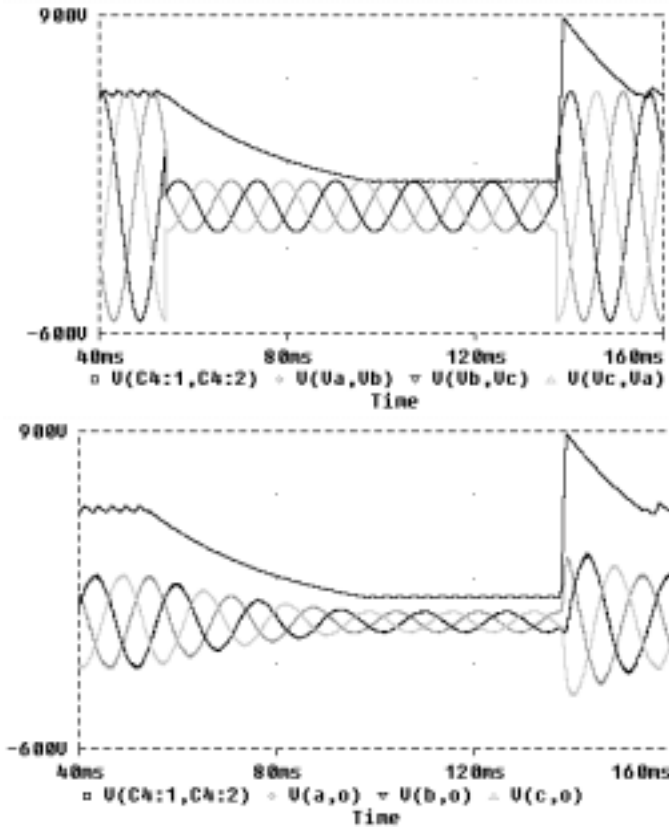


Fig. 9. Curvas de tensão na barra DC, tensão da rede e tensão na carga sob afundamento de tensão para 40% do tipo A.

A corrente de linha é excessivamente alta ($\approx 1\text{kA}$) quando a falta é eliminada como mostra a figura 10. Note que a corrente é nula quando a carga é suprida somente pelo capacitor.

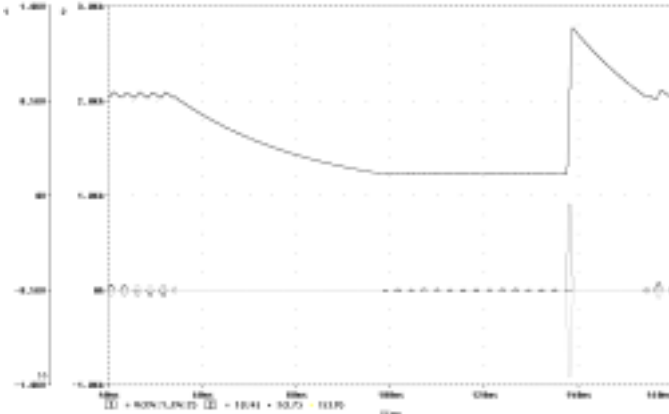


Fig. 10. Tensão DC e corrente de linha sob afundamento para 40% tipo A

A figura 11 mostra um afundamento de tensão desbalanceado para 70% tipo C visto pelo ASD. Note que a linha cuja tensão não sofre afundamento polariza os diodos do retificador carregando o capacitor. As linhas pontilhadas na figura indicam a mudança no ângulo de fase das tensões da rede e da carga antes, durante e após o afundamento.

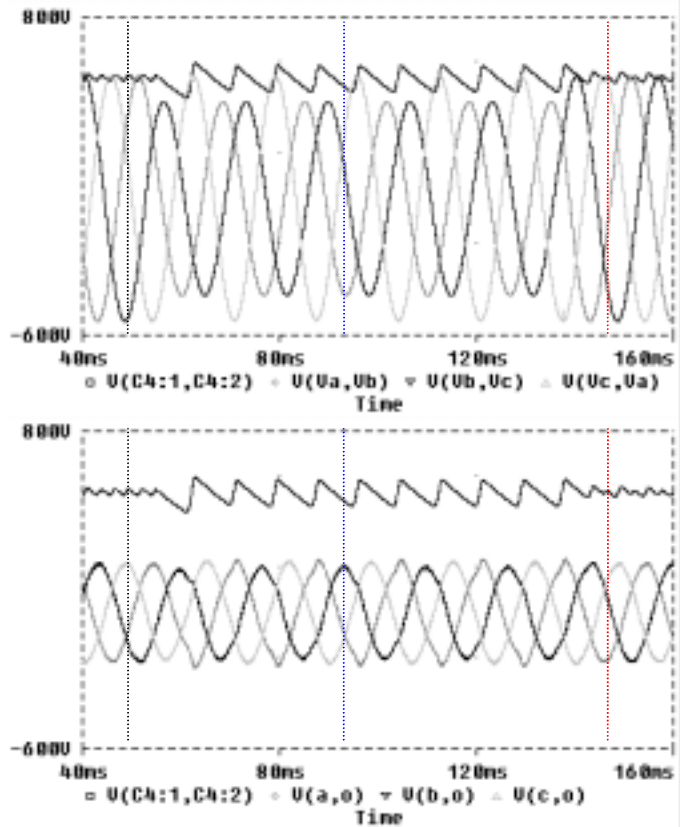
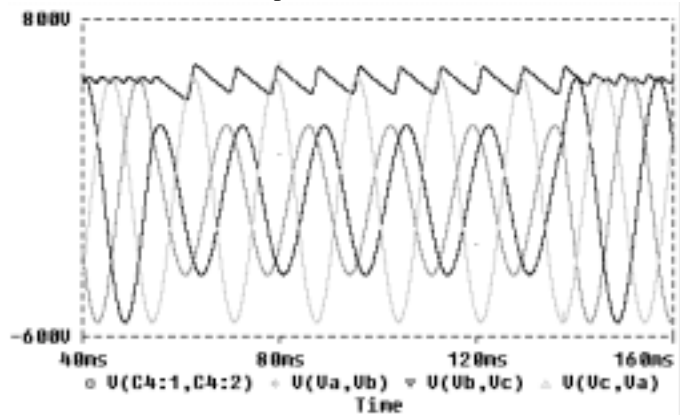


Fig. 11. Tensão DC, tensão da rede e tensão na carga sob afundamento para 70% tipo C.

Um afundamento de tensão para 40% tipo C é mostrado na figura 12, embora mais severo em magnitude a resposta é similar ao de 70%. A linha sã é responsável por manter o nível de tensão na barra dc alto embora com aumento no *ripple* de tensão – o retificador é tipo monofásico.



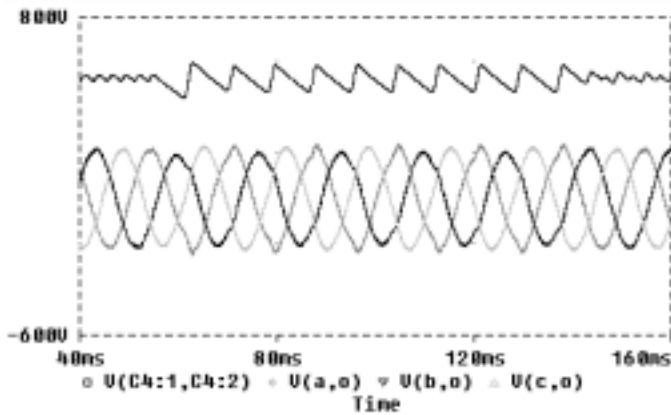


Fig. 12. Tensão DC, tensão de entrada e tensão na carga sob afundamento para 40% tipo C.

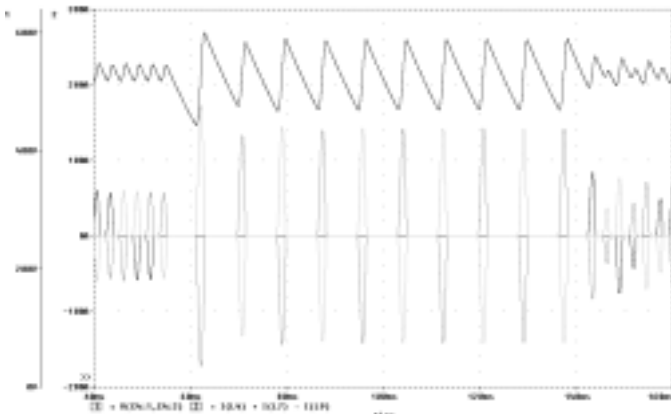


Fig. 13. Tensão DC e corrente de linha com afundamento de tensão para 40% tipo C

O desequilíbrio de tensão causa desequilíbrio de corrente. A corrente de linha antes, durante e após o afundamento de tensão é mostrada na figura 13. Observe que durante o afundamento a corrente flui em apenas duas linhas, a terceira corrente é extremamente reduzida. A elevada corrente pode levar à queima de fusível. À semelhança das correntes o *ripple* de tensão é muito maior durante o afundamento e igual a 119V. O aumento no *ripple* de tensão durante o afundamento de tensão contribui para o desequilíbrio e a distorção na forma de onda da tensão da carga.

Os afundamentos de tensão do tipo D distinguem-se do tipo C uma vez que o primeiro sofre alteração em magnitude e ângulo de fase em todas as tensões.

A seguir as figuras 14 e 15 apresentam afundamento de tensão para 70% e 40% tipo D, respectivamente. Os *ripples* de

tensão medidos são de 111V e 107V respectivamente.

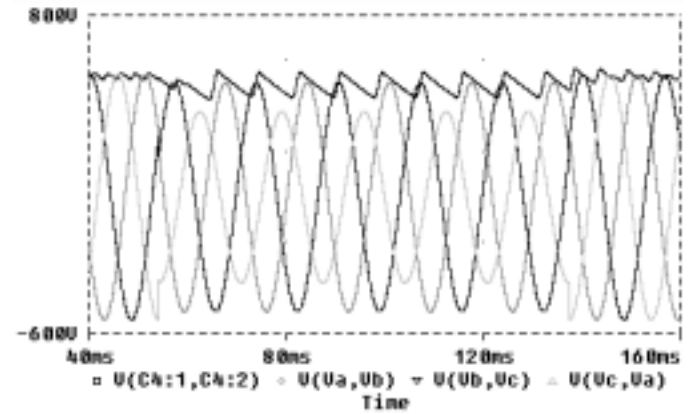


Fig. 14. Tensão DC, tensão da rede e tensão na carga sob afundamento para 70% tipo D.

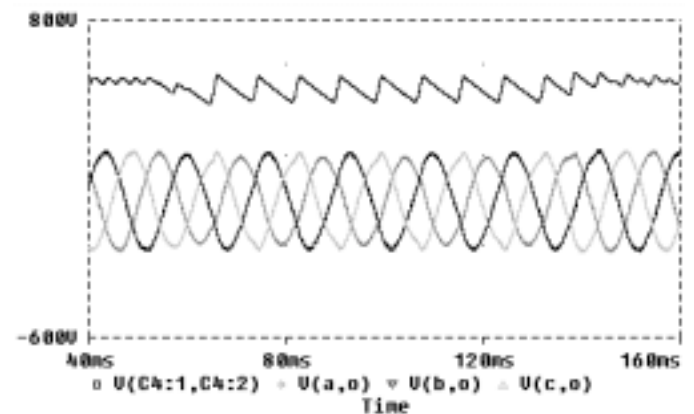


Fig. 15. Tensão DC, tensão da rede e tensão na carga sob afundamento para 40% tipo D.

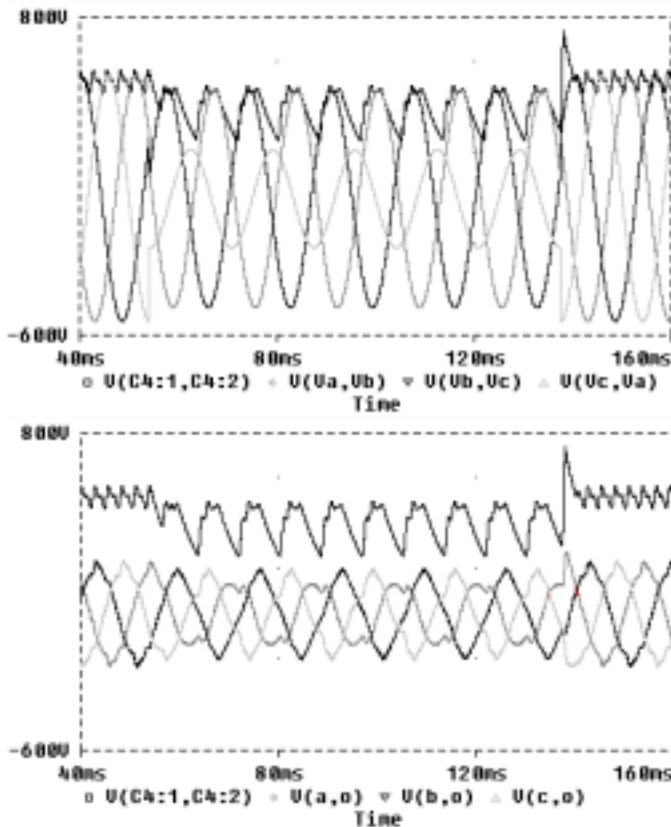


Fig. 16. Resposta do ASD sob afundamento de tensão para 40% tipo D com $C=0,2\text{mF}$.

Ainda, para um afundamento de tensão para 40% tipo D, se a capacitância na barra dc é reduzida para $0,2\text{mF}$ a resposta do ASD piora pois o *ripple* de tensão e a distorção na forma de onda aumentam como mostram as figuras 16 e 17.

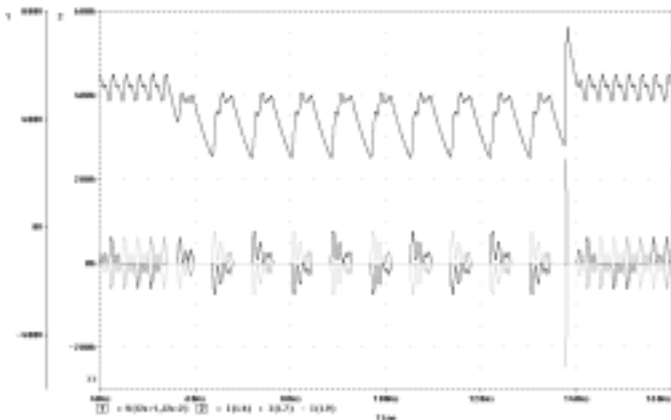


Fig. 17. Tensão DC e corrente de linha sob afundamento para 40% tipo D com $C=0,2\text{mF}$.

A tabela III resume a tensão na barra dc V_0 no instante do afundamento, o *ripple* de tensão V_{ripp} durante o afundamento

e o menor valor de tensão V_{min} na barra dc para cada condição de afundamento avaliada. Como pode ser observado, o *ripple* de tensão alcança valores consideráveis e a dimensão da capacitância assume um importante papel no desempenho do ASD.

A maior tensão de linha de entrada mantém o nível de tensão na barra dc um tanto invariante, como pode ser visto por V_0 na tabela III, embora o *ripple* de tensão cresça. Se a barra dc alimenta o controle do ASD e sua eletrônica, o ASD tende a ter menos problemas que se alimentado pela tensão ac de entrada, uma vez que a capacitância dc prove energia para manter o controle. If the dc bus voltage powers the drive control and their electronic, the ASD tend to have fewer problems then otherwise as the dc bus capacitance provides substantial energy storage to maintain the control.

TABELA III
MAGNITUDE DE TENSÃO NA BARRA DC

	Type A	Type C		Type D			
	40% (1mF))	70% (1mF))	40% (1mF))	40% (0.2mF))	70% (1mF))	40% (1mF))	40% (0.2mF))
V_0	520V	521V	521V	550V	522V	522V	550V
V_{ripp}	7V	118V	119V	288V	111V	107V	241V
V_{min}	113V	442V	443V	263V	429V	400V	256V

TABLE IV
VOLTAGE LINE PHASORS TO 70% AND 40% VOLATGE SAGS

	Type A	Type C		Type D	
	40%	70%	40%	70%	40%
V_1	$0.4\angle 0^\circ$	$1.0\angle 0^\circ$	$1.0\angle 0^\circ$	$0.7\angle 0^\circ$	$0.4\angle 0^\circ$
V_2	$0.4\angle -120^\circ$	$0.79\angle -129.5^\circ$	$0.61\angle -145.3^\circ$	$0.93\angle -112^\circ$	$0.89\angle -103^\circ$
V_3	$0.4\angle 120^\circ$	$0.79\angle 129.5^\circ$	$0.61\angle 145.3^\circ$	$0.93\angle 112^\circ$	$0.89\angle 103^\circ$

A tabela IV por outro lado resume os fasores de tensão de linha em pu vistos pelo ASD para cada tipo de afundamento simulado.

Para as condições apresentadas na tabela IV as componentes simétricas foram calculadas para avaliar o desequilíbrio nas tensões. O fator de desequilíbrio da tensão é dado pela relação entre a componente de seqüência negativa e a componente de seqüência positiva. O fator de desequilíbrio obtido para os afundamentos desequilibrados estudados foi de 17,65% para afundamentos para 70% tipos C e D, e de 42,86% para afundamentos para 40% tipos C e D. Os afundamentos para 40% apresentam-se, portanto, como mais desbalanceados independentes do tipo.

O desequilíbrio de tensão devido ao afundamento de tensão desbalanceado pode causar a atuação da proteção mesmo que o afundamento de tensão não seja suficientemente severo para causar uma subtensão na barra dc.

IV. CONCLUSÃO

A qualidade da energia elétrica é uma questão primariamente levantada pelo consumidor final com uma preocupação básica centrada na operação adequada de equipamentos elétricos e eletrônicos. O foco de interesse está na continuidade e desempenho da operação dos equipamentos. A contribuição deste artigo está na apresentação e avaliação da resposta da simulação computacional de acionamentos ac de velocidade variável - ASD largamente utilizados na indústria. A simulação foi feita para ASD monofásicos e trifásicos submetidos a afundamentos de tensão de diferentes características.

Conhecer a resposta e o estresse a que cada estágio do ASD (retificador, elo dc, inversor e controle) é submetida, é condição necessária para poder inferir na melhoria do equipamento.

A despeito da controvérsia sobre a responsabilidade dos vários agentes (fabricantes de equipamentos, concessionárias de energia e agências reguladoras) relacionada à qualidade da energia elétrica, os consumidores almejam ao mesmo que demandam medidas quanto à suportabilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos de modo a resguardar seus investimentos.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Energética do Ceará – COELCE e a Agência Nacional de Petróleo – ANP pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

VI. REFERÊNCIAS

Normas:

- [1] IEC61000-4-11 Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests. Edition 1.1. Reference number CEI/IEC 61000-4-11:1994+A1:2000.

Livros:

- [2] Bollen, M.H.J., Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000, ISBN 0-7803-4713-7. IEEE Order Number PC5764. pp.543.

Artigos:

- [3] Bollen, M.H.J., IEEE Tutorial on Voltage Sag Analysis, 1999, ISBN 0-7803-4713-7.
- [4] Tunaboylu, N.S., Collins Jr., E.R., Middlekauff, S.W., and Morgan, R.L., Ride-Through Issues for DC Motor Drives During Voltage Sags, *Proc. of the 1995 IEEE Southeastcon*, pp. 52-58, Raleigh NC, April 1995.
- [5] Mansoor, E. R. Collins, and R. L. Morgan, “Effects of unsymmetrical voltage sags on adjustable speed drives,” *Proceedings of the 7th International Conf. on Harmonics and Quality of Power*, Las Vegas NV, 1996, pp. 467-472.