

# Projeto e Implementação de um Conversor Boost para Mitigar Afundamentos de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável

Nelber X. Melo, Ruth P. S. Leão, René P. T. Bascopé e Fernando L. M. Antunes.

**Resumo**--Neste trabalho é apresentado o projeto e a implementação de um conversor *boost* projetado para mitigar afundamentos de tensão em acionamentos de velocidade variável - AVVs. As principais características de projeto são apresentadas seguidas de resultados de testes experimentais de suportabilidade a afundamentos de tensão simétrico e assimétrico realizados com conversor *boost* de 200W, tensão de entrada cc de 150V a 300V e tensão de saída cc de 300V, conectado a um AVV trifásico de 250W com tensão ac de linha de 230V e de saída de 230V e motor de indução trifásico de 0,25hp operando em plena carga. O conversor *boost* operou satisfatoriamente na mitigação de afundamentos de tensão aumentando a imunidade do AVV de 0,7pu para 0,5pu.

**Palavras-chave**—Acionamento de velocidade variável Afundamentos de tensão, Conversor *boost*, Motor de indução trifásico.

## I. INTRODUÇÃO

AVVs são dispositivos eletrônicos usados no acionamento e controle de velocidade de motores de indução através da variação da magnitude e frequência da tensão de alimentação dos motores. Controlar automaticamente a velocidade de um motor elétrico com carga variável é muito mais eficiente do que operá-lo com velocidade fixa. As vantagens em operar motores com acionamento eletrônico são várias, dentre as quais incluem controle da corrente de partida, controle de aceleração e de velocidade de rotação do motor, ajuste do ponto de torque máximo, controle de parada, e, por conseguinte, economia de energia e redução de distúrbios na rede elétrica. Os vários benefícios têm sido a causa do crescente uso de AVVs na indústria.

Não obstante sua importância no processo produtivo, os AVVs são sensíveis a afundamentos de tensão, visto que possuem, em geral, proteção contra subtensão e sobrecorrente, fenômenos estes que podem estar associados aos afundamentos de tensão. Mediante atuação da proteção o AVV é desligado causando parada no processo produtivo e, por conseguinte perdas financeiras decorrentes. As variações na tensão de alimentação podem ainda causar flutuações de torque e de velocidade na carga, uma vez que o controle de corrente e de tensão de saída do AVV tem como referência um valor proporcional à tensão do barramento cc do AVV, valor este que decai rapidamente, conforme (1) [1].

$$V_{cc}C \frac{dV_{cc}}{dt} = \frac{T_L \omega_r}{\eta_{mot} \eta_{avv}} \quad (1)$$

Assim, a taxa de decrescimento da tensão no barramento cc,  $dV_{cc}/dt$ , depende do valor da capacitância,  $C$ , instalada no barramento cc, da tensão inicial,  $V_{cc}$ , sobre o capacitor no início do distúrbio, do torque de carga,  $T_L$ , da velocidade de rotação do motor,  $\omega_r$ , do rendimento do motor,  $\eta_{mot}$ , e do rendimento do AVV,  $\eta_{avv}$ .

Diversos trabalhos que tratam da análise do desempenho dos AVVs sob afundamentos de tensão têm sido publicados [2], [3], [4], bem como soluções para aumentar a tolerância dos AVVs sob afundamento de tensão têm sido propostas [1], [5], [6], [7]. Dentre as soluções podem-se destacar a adição de capacitores ao barramento cc do AVV, a mitigação regenerativa e por adição de neutro e a utilização de conversores *boost*.

Este artigo apresenta o projeto de um conversor *boost* aplicado para aumentar a imunidade de acionamentos de velocidade variável a afundamentos de tensão. O conversor *boost* é de 200W, com tensão cc de entrada de 150V a 300V e tensão cc de saída de 300V. O desempenho do conversor *boost* sob condição de afundamento de tensão trifásico e monofásico é avaliado com base em resultados experimentais de um sistema composto de AVV trifásico de 250W, alimentando um motor de indução trifásico de 0,25hp operando em plena carga. Com base em testes de tolerância do AVV o conversor *boost* foi projetado para aumentar a suportabilidade do AVV a afundamentos de tensão para 0,5pu.

## II. MITIGAÇÃO POR CONVERSOR BOOST

O conversor *boost* é um conversor cc-cc cuja tensão de saída é maior ou igual à tensão de entrada. A estratégia de empregar conversores *boost* na mitigação de afundamentos de tensão em AVVs consiste em conectar o conversor aos terminais do barramento cc do AVV (acessíveis externamente na maioria dos AVVs modernos), podendo a alimentação do *boost* ser independente (p.ex. com baterias) ou derivada da alimentação do AVV.

O diagrama de um conversor *boost* conectado a um AVV com alimentação compartilhada é mostrado na figura 1. Os componentes básicos de um conversor *boost* são: fonte cc, indutor *boost*, diodo *boost*, chave eletrônica e capacitância de saída. Na figura 1 a fonte cc está representada por um retificador trifásico de onda completa e um capacitor de alisamento da tensão de saída da ponte retificadora. Quando aplicado para aumentar a suportabilidade do AVV a

afundamento de tensão o capacitor da barra cc do AVV é normalmente usado como o capacitor de saída do *boost*.

Um conversor *boost* possui entrada com característica de fonte de corrente devido à presença do indutor em série com a fonte de tensão de alimentação, e saída com característica de fonte de tensão, o que é assegurado pelo capacitor conectado à saída do conversor.

A razão cíclica de um conversor *boost* é dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (2)$$

em que  $V_o$  e  $V_i$  são as tensões cc de saída e de entrada do conversor, respectivamente, e  $D$  a razão cíclica. Baseado em (2) verifica-se que para razão cíclica igual a zero o ganho de tensão é unitário, e para razão cíclica próxima à unidade o ganho de tensão cresce acentuadamente levando a valores de  $V_o$  muito elevados. Por este motivo na prática, aconselha-se trabalhar com valores de  $D$  menores que a unidade ( $D < 1$ ) e em geral até 0,8.

Para uma razão cíclica de até 0,8 o conversor *boost* é capaz de mitigar afundamentos de tensão para até 0,2pu de tensão remanescente, mantendo uniforme a tensão no barramento cc do AVV, e tensão de saída do AVV constante.

O custo estimado da solução por conexão de conversores *boost* é de aproximadamente \$200,00/kW [7], podendo este valor variar com as características de sensibilidade do AVV e o nível de imunidade que se deseja obter.

### III. PROJETO DE UM CONVERSOR BOOST

No projeto do conversor deve ser considerada a máxima intensidade de afundamento de tensão que se deseja mitigar, em especial se o conversor compartilha da mesma fonte de alimentação que o AVV, pois, neste caso, para se manter uma tensão de saída constante, quanto menor o valor de tensão de entrada maior deverá ser o valor do ciclo de trabalho do conversor. Porém, como mencionado anteriormente, a razão cíclica recomendada para operar o conversor *boost* é de até 0,8, assim, não é recomendável a aplicação do conversor para mitigar afundamentos de tensão que levem sua tensão de entrada retificada para valores menores que 0,2pu.

Neste trabalho o conversor *boost* compartilha a mesma fonte de alimentação que o AVV, assim, embora haja a

restrição quanto à máxima intensidade de afundamento de tensão mitigável, não há restrições quanto à duração do evento já que o conversor pode operar enquanto durar o afundamento. Por outro lado, em casos em que o conversor *boost* é alimentado por uma fonte independente, o conversor poderá mitigar afundamentos de tensão de qualquer intensidade, já que sua tensão de entrada é fixa, porém, quanto menor a autonomia da fonte independente de alimentação do conversor *boost*, menor o tempo que o conversor poderá suprir energia à barra cc do AVV. Assim, a alimentação independente do conversor *boost* requer que seja considerada a duração máxima de afundamento que se deseja mitigar, enquanto que compartilhando da mesma alimentação da carga, deve-se considerar a máxima intensidade de afundamento a mitigar [8].

A fim de assegurar polarização reversa do diodo *boost*, a tensão de saída  $V_o$  do conversor *boost*, em regime permanente, deve ser projetada para valor de tensão inferior à tensão nominal do barramento cc do AVV, assegurando assim o não fluxo de energia através do conversor nas condições de regime permanente.

Quanto ao controle do conversor *boost*, deve ser projetado para apresentar uma resposta rápida a fim de atender a característica própria dos afundamentos de tensão, que é de rápida redução no valor da tensão, evitando assim alteração na velocidade do motor. No entanto, embora a resposta do controle necessite ser rápida, o sobre sinal não pode exceder a especificação de sobretensão do AVV, desta forma, é importante que seja implementada uma função de *shutdown* no controle do *boost*.

#### A. Especificação do conversor boost

O conversor *boost* foi projetado para mitigar afundamentos de tensão de até 0,5pu de tensão remanescente na entrada retificada. O AVV trifásico usado nos ensaios é alimentado com tensão nominal de linha de 220V. A tensão nominal do barramento cc do AVV equivale, portanto, à tensão de pico da rede de alimentação, i.é.,  $311V_{cc}$ . A fim de que em regime permanente o diodo *boost* permaneça reversamente polarizado a tensão de saída  $V_o$  do *boost* foi projetada para  $300V_{cc}$ . Assim a tensão nominal de entrada retificada do conversor *boost*,  $V_i$ , foi especificada como  $300V_{cc}$ . Desta forma a tensão cc mínima de entrada do conversor deve ser  $150V_{cc}$ , valor este equivalente a 50% da tensão cc de entrada.

A potência do conversor *boost* adotada para o projeto,  $P_{out}$  foi de 200W para alimentar um AVV de 250W, que por sua vez alimenta um motor de indução trifásico de 0,25hp (186,5W). Assumiu-se, para simplificar o projeto, a potência de entrada do *boost*,  $P_{in}$ , igual à de saída.

A frequência de chaveamento do conversor,  $f_s$  foi adotada como 40kHz, valor típico para uso em conversores com comutação dissipativa [9].

Assumiu-se ainda, como critério para o projeto, uma ondulação de corrente no indutor,  $\Delta I_L$ , de 10% da corrente máxima,  $I_{Lmax}$ . A corrente máxima no indutor  $I_{Lmax}$  pode ser calculada com base na potência de entrada e na tensão mínima

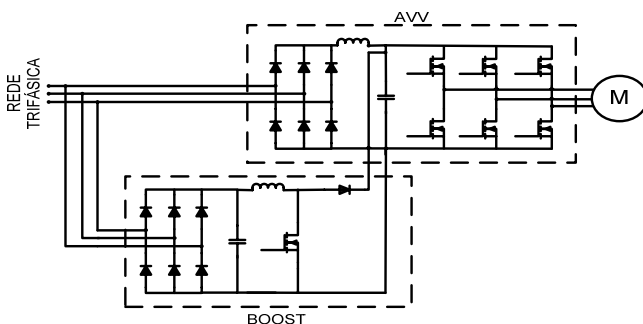


Fig. 1. Conversor *boost* conectado ao barramento cc de um AVV.

de entrada do conversor, como mostrado em (3). Como a menor tensão de entrada admitida no projeto é de 150V, e a potência de entrada é de 200W, então resulta em  $I_{L,max}$  igual a 1,33A. Assim, a ondulação de corrente no indutor deverá ser de 0,13A.

$$I_{L,max} = \frac{P_{in}}{V_{i,min}} \quad (3)$$

### B. Cálculo do indutor

O cálculo do indutor *boost* é feito a partir da menor tensão de entrada,  $V_{i,min}$ , da ondulação de corrente especificada para o indutor,  $\Delta I_L$ , da razão cíclica,  $D$ , e da frequência de chaveamento,  $f_s$ , como se segue em (4).

$$L = \frac{V_{i,min} \cdot D}{\Delta I_L \cdot f_s} \quad (4)$$

O ciclo de trabalho a ser utilizado no cálculo deve ser aquele que corresponde à mínima tensão de entrada, isto é, a máxima razão cíclica assumida no projeto é de 0,5. Assim, com base em (4) a indutância do conversor é de 14mH.

A metodologia para ser definido o núcleo magnético a ser utilizado pode ser encontrada em [9].

### C. Capacitor do filtro de saída

Em aplicação para mitigação de afundamentos de tensão em AVVs, o filtro capacitivo de saída do conversor *boost* pode ser dispensado para que haja a redução de custos em sua implementação, já que a saída do conversor deverá ser conectada ao barramento cc do AVV, onde há a presença de uma capacitância maior, em geral, que aquela que seria especificada como filtro de saída do conversor. Assim, foi verificada a presença de um capacitor de 330 $\mu$ F no barramento cc do AVV, a qual é usada como capacitância de filtro do conversor *boost*.

### D. Dimensionamento do diodo boost

O dimensionamento do diodo *boost* deve ser feito com base no valor da máxima corrente eficaz que atravessará o diodo, que corresponde à máxima corrente do indutor *boost*. Isso ocorre quando a tensão de entrada é mínima, ou seja, quando a corrente de entrada e a razão cíclica são máximas. Logo, a corrente eficaz do diodo,  $I_{d,ef}$ , será dada por (5) em que  $I_{in,max}=I_{L,max}$ . Desta forma, a corrente para a qual deve ser especificado o diodo do conversor deve ser igual a 0,94A.

$$I_{d,ef} = \sqrt{1-D} \cdot I_{in,max} \quad (5)$$

A máxima tensão à qual o diodo *boost* deverá ficar submetido quando reversamente polarizado deve ser a própria tensão de saída do conversor  $V_o$ . Porém, é recomendado que o diodo seja dimensionado para uma tensão  $V_d$  20% superior, logo a menor tensão reversa que o diodo deve suportar é de 360V.

### E. Dimensionamento do transistor

O transistor utilizado no projeto do conversor *boost* pode ser IGBT ou MOSFET. Caso seja utilizado um IGBT este deve ser dimensionado com base no máximo valor médio de corrente previsto em seus terminais. No caso de ser utilizado um MOSFET, o dimensionamento deve ser baseado na máxima corrente eficaz especificada que fluirá através do MOSFET.

O valor médio,  $I_{s,med}$ , e o eficaz,  $I_{s,ef}$ , da corrente através da chave podem ser calculados com base em (6) e (7), respectivamente:

$$I_{s,med} = D \cdot I_{in,max} \quad (6)$$

$$I_{s,ef} = \sqrt{D} \cdot I_{in,max} \quad (7)$$

Como resultado, um IGBT deve ser especificado para  $I_{s,med}=0,66A$ . Por sua vez, um MOSFET deve ser dimensionado para suportar pelo menos o valor de corrente eficaz igual a 0,94 A.

A tensão de operação do transistor,  $V_s$  deve ser igual ou superior à tensão de saída  $V_o$ , já que quando o mesmo está aberto, o diodo está diretamente polarizado e a tensão de saída é diretamente aplicada ao transistor. Desta forma, atribuindo-se um valor 20% superior, tem-se  $V_s$  igual a 360V.

Seguindo os critérios mencionados nesta seção, as especificações do conversor ficam como mostradas na tabela I.

TABELA I  
ESPECIFICAÇÕES DO CONVERSOR BOOST

$V_i$	150-300V	$L$	14mH
$V_o$	300V	$I_{d,ef}$	0,94A
$P_{in}$	200W	$V_d$	360V
$P_{out}$	200W	$I_{s,med}$	0,66A
$f_s$	40kHz	$I_{s,ef}$	0,94A
$\Delta I_L$	0,13A	$V_s$	360V

## IV. CONTROLE MODO CORRENTE MÉDIA

O controle do *boost* é baseado no modo corrente média, adequado para a aplicação proposta já que permite além de uma tensão de saída do *boost* com poucas variações, assegura uma adequada tensão no barramento cc do AVV, e ainda assegura que não haja variações significativas na corrente de entrada, evitando assim por ocasião de afundamentos de tensão grandes variações de corrente, o que sensibilizaria a proteção contra sobrecorrente do AVV. O controle modo corrente média melhora a resposta dinâmica do sistema, a imunidade a ruídos e o erro estático, introduzindo um alto ganho em baixas frequências e integrando o erro do amplificador de corrente [10].

O diagrama de blocos do controle modo corrente média é mostrado na figura 2 [11]. A malha dentro da região tracejada corresponde à malha de controle de corrente, enquanto que a malha externa representa a malha de controle de tensão que gera a referência da malha de corrente.

Na malha de corrente,  $F_m$  é o ganho do modulador,  $G_i(s)$  é a função de transferência que relaciona corrente no indutor

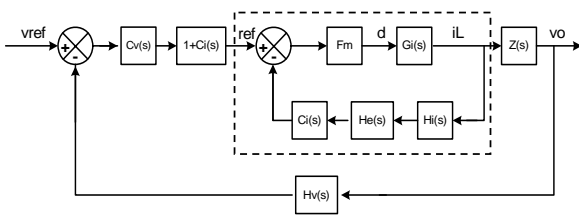


Fig. 2. Diagrama de blocos do controle modo corrente média.

com a razão cíclica,  $i_L/D$ ,  $H_i(s)$  é o ganho de amostragem de corrente,  $H_e(s)$  é um ganho de amostragem que representa as não idealidades que não são consideradas na modelagem, principalmente, em altas frequências e  $C_i(s)$  a função de transferência do compensador de corrente.

Na malha de tensão,  $C_v(s)$  é o compensador de tensão,  $H_v(s)$  o ganho de amostragem de tensão e  $Z(s)$  é a função de transferência que relaciona a tensão de saída com a corrente no indutor  $v_o/i_L$ .

Para o projeto do controle modo corrente média é necessário fazer primeiramente o projeto da malha de controle de corrente e depois o da malha de controle de tensão, já que a primeira está incluída na segunda.

#### A. Malha de corrente

O ganho da função de transferência em malha aberta da planta de corrente,  $FTMA_i$ , em baixas frequências é baixo, o que implica em erro estático. Para corrigir o problema, foi implementado um compensador PI com filtro capacitivo, que possui um zero alocado convenientemente para que a frequência de cruzamento ocorra no ponto desejado de  $-20\text{dB/dec}$ , conforme sugestão da teoria de controle de fontes chaveadas [9], um pólo na origem e outro que pode ser alocado numa frequência qualquer, no caso usado para compensar um zero da planta em altas frequências. O pólo na origem inserido pelo compensador minimiza o erro estático. Os pólos e zeros do compensador foram alocados de acordo com os critérios adotados em [12].

Assim, a alocação de pólos, após ajustes para se obter melhor margem de fase e ganho, resulta em:  $f_{ci}=3,33\text{kHz}$  (frequência de cruzamento da malha de corrente);  $f_z=83\text{Hz}$  (frequência do zero do compensador); e  $f_p=20\text{kHz}$  (frequência do pólo do compensador).

#### B. Malha de tensão

A malha de tensão compreende além da malha de corrente, o ganho de amostragem de tensão,  $H_v$ , a função de transferência da planta de tensão  $v_o/i_L$ , que é apresentada no diagrama de blocos da figura 2 como  $Z(s)$ , e o bloco  $C(s) = 1 + C_i(s)$ .

O ganho de amostragem de tensão é feito através de um divisor resistivo colocado na saída do conversor *boost*. O valor é ajustado de tal forma que quando a saída de tensão estiver em seu valor nominal,  $300\text{V}$ , a tensão amostrada tenha seu valor igual à tensão de referência,  $V_{ref}$ , adotado em  $3\text{V}$ .

A função de transferência em malha aberta para malha de tensão,  $FTMA_v$ , feitas simplificações válidas para baixas frequências [8], possui margens de ganho e de fase infinitas.

Isto implica que o sistema é estável. Porém, é necessário o aumento do ganho em baixas frequências para diminuir o erro estático da tensão de saída do conversor. Para compensar o sistema em malha aberta e adequar seu comportamento aos padrões exigidos pela teoria de fontes chaveadas foi projetado um compensador PI. O compensador PI possui um pólo na origem e um zero em uma frequência convenientemente escolhida para compensar um pólo de  $FTMA_v$ , e garantir a inclinação de  $-20\text{dB/dec}$  na frequência de cruzamento.

A frequência de cruzamento da malha de tensão deve ser bem inferior à frequência de cruzamento da malha de corrente por ser a carga do tipo não linear, como foi indicado anteriormente.

Com base no exposto acima são adotados os seguintes critérios:  $f_{cv} = 12\text{ Hz}$  (frequência de cruzamento da malha de tensão);  $f_z \cong f_{cv} / 10$  (frequência do zero do compensador). A partir destes critérios, obteve-se a função de transferência em laço aberto,  $FTLA_v$ , que apresenta um alto ganho em baixas frequências e uma frequência de cruzamento de  $13\text{Hz}$  a cerca de  $-20\text{dB/dec}$ .

## V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Ensaio foram realizados para obter as curvas de tolerância de um AVV Siemens da série Micromaster 420 de  $250\text{W}$ ,  $230\text{V}$  de tensão de alimentação mono ou trifásica. O motor alimentado pelo AVV é um motor de indução trifásico de  $0,25\text{hp}$ ,  $220\text{V}$ . Os afundamentos de tensão foram gerados com uma fonte de distúrbio de  $3\text{kVA}$ , da Califórnia Instruments  $3000\text{iL}$ .

Foram obtidas as curvas de tolerância do AVV a afundamentos A, B e E, os únicos possíveis de serem gerados pela fonte de distúrbios utilizada. Os resultados estão apresentados na figura 3, onde são comparados à curva SEMI F47 0706.

Pelos resultados, nota-se que somente o afundamento tipo B não causa a parada do AVV. No caso de afundamento de tensão do tipo A, o AVV pode ainda suportar uma interrupção de duração menor do que  $100\text{ms}$  ou 6 ciclos. Qualquer evento deste tipo, ou seja, com  $V=0\%$ , com duração maior que 6 ciclos leva o AVV ao desligamento por subtensão. A partir de  $100\text{ms}$  a tolerância do AVV a afundamentos do tipo A é de  $0,7\text{pu}$ . Observe que a região que compreende afundamentos com duração entre cerca de 6 e 12 ciclos compõem uma região da curva de tolerância do AVV acima da curva SEMI F47, o que significa que neste intervalo de duração de afundamentos de tensão a sensibilidade do AVV se mostra superior ao limite estabelecido pela SEMI F47.

Ainda conforme a figura 3, a curva de tolerância do AVV aos afundamentos de tensão do tipo E, embora esteja sempre dentro dos limites estabelecidos pela curva do EPRI, pode provocar a ação da proteção contra subtensão do AVV para eventos de duração superior a 6 ciclos. Em caso de eventos como este de maior duração e até permanentes, o limite de operação do AVV, sem que haja o seu desligamento, é de  $0,4\text{pu}$  de tensão remanescente de alimentação.

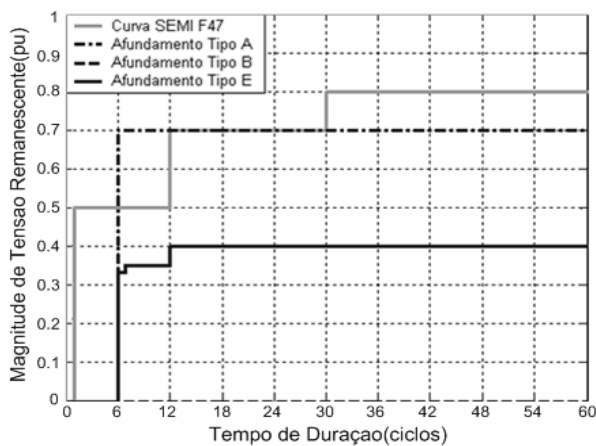


Fig. 3. Curvas de tolerância do AVV e SEMI F47 – 0706.

Nos ensaios realizados, observou-se que o desligamento do AVV pela atuação de sua proteção de subtensão ocorre quando a tensão do barramento cc atinge um valor limite de 210V, o que equivale a 0,7pu.

A figura 4 mostra o decaimento da tensão do barramento cc durante um afundamento do tipo A para 0,5pu. A tensão decai até alcançar o limite de 0,7pu quando ocorre o desligamento do AVV e o capacitor do barramento cc pára de descarregar. O desligamento do AVV ocorre cerca de 90ms após o início do afundamento de tensão. Na figura 4 é apresentada também uma das tensões de linha de saída do AVV. Independentemente do tipo de afundamento de tensão na alimentação do AVV, as tensões de saída permanecem equilibradas, sendo, portanto, semelhantes.

Do mesmo modo, um afundamento do tipo E para 0pu é mostrado na figura 5. Como no caso do afundamento tipo A, observa-se comportamento similar para a tensão do barramento cc e o conseqüente desligamento do AVV.

Ensaio com as mesmas características de afundamentos de tensão dos tipos A e E foram realizados com o conversor *boost* implementado conectado ao AVV.

Os resultados do ensaio realizado para um afundamento do tipo A, permanente, para 0,5pu estão apresentados nas figuras 6 e 7. Pela figura 6 pode ser vista a atuação do conversor *boost* quando a tensão do barramento cc atinge cerca de 275V. A diferença entre o *setpoint* e o nível que a tensão do barramento cc atinge para o conversor começar a atuar deve-se ao tempo de resposta do controle.

Como o conversor *boost* compartilha da mesma alimentação do AVV, o afundamento tensão tipo A para 0,5pu leva a tensão média de entrada do conversor a seu limiar de operação, cerca de 150V (figura 6). Logo, para a mitigação de afundamentos de tensão mais severos do tipo A, recomenda-se a especificação de uma razão cíclica máxima maior.

A figura 7 mostra a tensão de saída do AVV durante o afundamento de tensão com a conexão do conversor *boost*. A tensão sofre uma pequena queda em seu valor de pico e conseqüentemente em seu valor rms para cerca de 0,94pu e estabiliza-se.

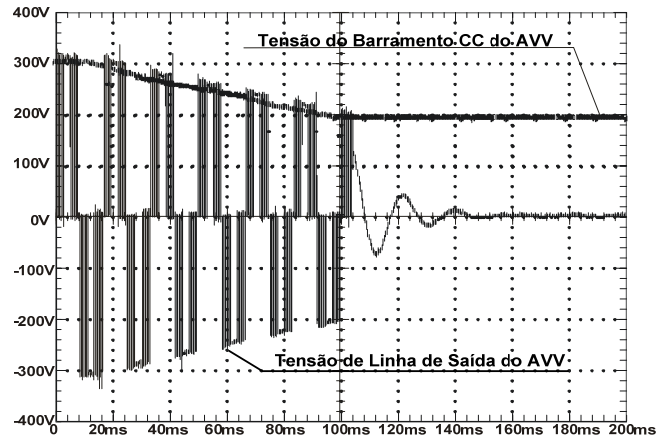


Fig. 4. Decaimento da tensão no barramento cc e desligamento do AVV causado por afundamento trifásico para 0,5pu.

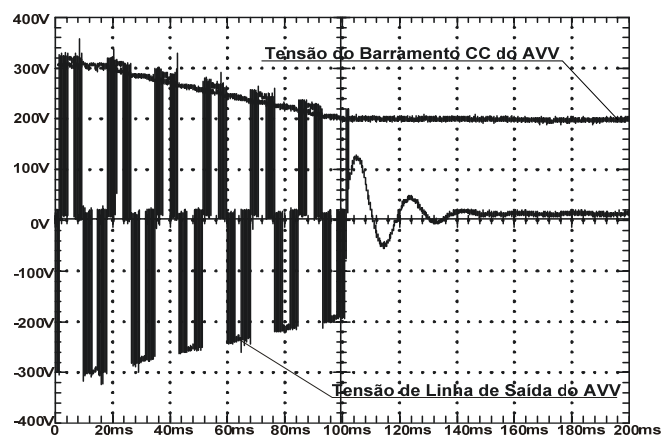


Fig. 5. Decaimento da tensão no barramento cc e desligamento do AVV causado por afundamento de tensão bifásico para 0pu.

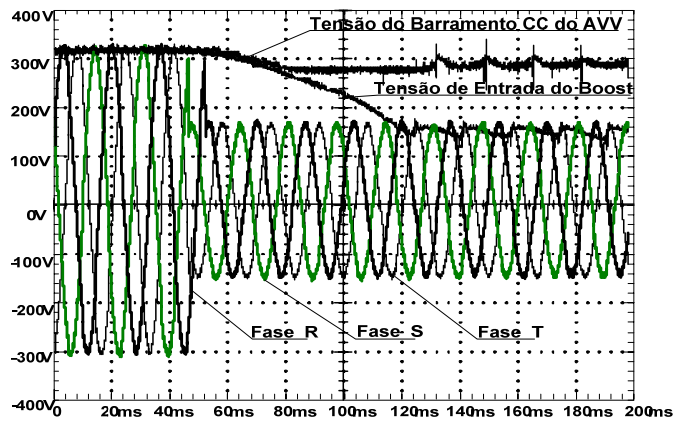


Fig. 6. Tensão na barra cc e tensão de entrada do *boost* durante afundamento de tensão do tipo A para 0,5pu com o conversor *boost* conectado.

O conversor *boost* é ainda capaz de mitigar afundamento de tensão do tipo E, permanente, para 0 pu, como pode ser visto na figura 8. Pela figura, vê-se que o conversor *boost* opera pouco acima de seu limite mínimo de tensão de entrada especificado no projeto, em cerca de 160V (valor médio) e mantém a tensão do barramento cc do AVV em cerca de 0,94pu (figura 9), não permitindo seu desligamento.

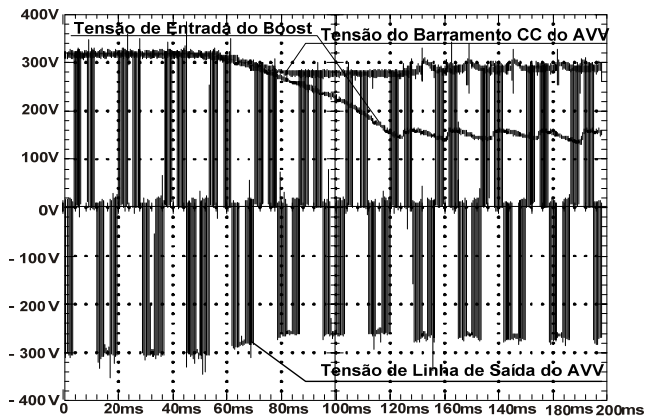


Fig. 7. Tensão de saída e na barra cc do AVV durante afundamento de tensão tipo A para 0,5pu com o boost conectado.

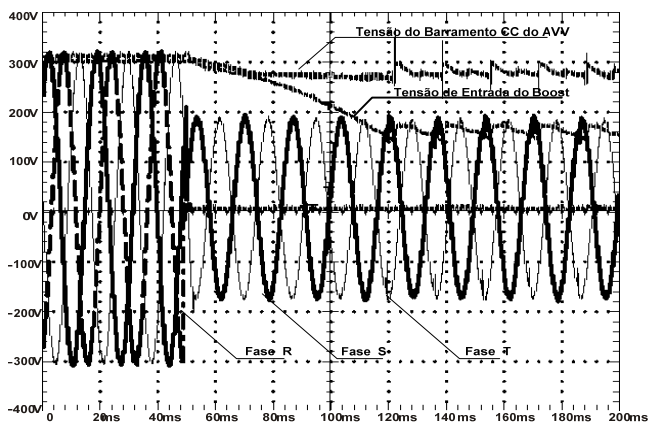


Fig. 8. Ensaio: Tensão do barramento CC e tensão de entrada do boost durante um afundamento de tensão do tipo E para 0pu com o conversor boost conectado.

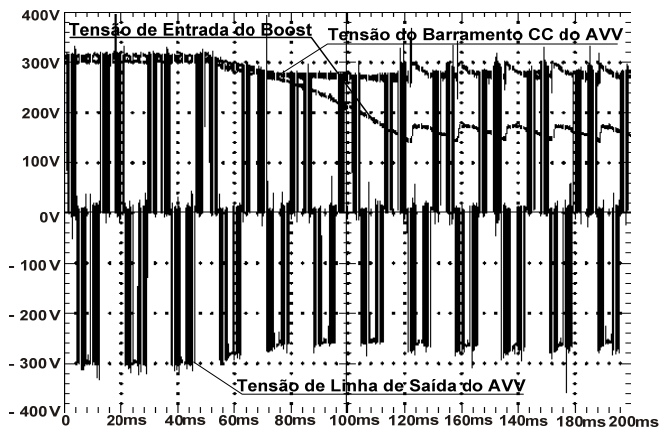


Fig. 9. Tensão de saída e no barramento CC do AVV durante um afundamento tipo E para 0pu com o boost conectado.

## VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas as etapas de projeto de um conversor *boost* utilizado para mitigar afundamentos de tensão em acionamentos de velocidade variável. As malhas de corrente e tensão foram projetadas de modo a satisfazer os critérios de estabilidade da teoria de fontes chaveadas. A malha de tensão foi projetada com uma frequência de corte bem inferior à malha de corrente, considerando-se a não linearidade da carga. Os resultados teóricos se mostraram

bastantes satisfatórios no tocante à estabilidade do conversor, sua imunidade a ruídos e altos ganhos estáticos para minimizar o erro estático. Foram ainda feitos ensaios de afundamentos de tensão dos tipos A e E, com e sem o uso do conversor *boost*. Os testes comprovam que o conversor pode mitigar afundamentos de tensão do tipo A para até 0,5 pu de valor de tensão remanescente, valor este limitado pela especificação da razão cíclica máxima do conversor. Foi observado ainda, que o conversor *boost* pode mitigar também qualquer afundamento de tensão do tipo E, mesmo os de máxima magnitude quando as duas fases atingidas sofrem interrupção. Dentre todos os tipos de afundamentos de tensão, o afundamento tipo A é o mais severo. Dentre os assimétricos, o tipo E é o mais severo. Assim, se o conversor *boost* consegue mitigar afundamentos do tipo E de severidade máxima ( $V=0pu$ ), poderá mitigar todos os outros tipos de afundamentos assimétricos.

Pelos motivos acima colocados, conclui-se que o conversor *boost* é uma solução técnica bastante eficiente para mitigar afundamentos de tensão assimétricos (tipos B–G) severos em magnitude e duração, e afundamentos de tensão simétricos (tipo A) de magnitudes para até 0,5pu, ou tão intensos quanto permitir a especificação de sua razão cíclica máxima, e por todo o tempo em que durem os fenômenos.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] K. Stockman, F. D'hulster, M. Didden, R. Belmans. "Embedded Solutions to Protect Textile Processes against Voltage Sags". 37th Annual Meeting of the Industry Applications Conference. Vol.4, 13-18 Oct. 2002. pp. 2561 – 2566.
- [2] I.C. de Albuquerque, R.P.S. Leão, "Evaluating ASD Performance under Short Duration Voltage Variation", *IEEE Transm. & Distr. Conference, IEEE/PES T&D 2002 Latin America*, São Paulo, 2002. v.1. pp.1 – 6.
- [3] P.C.A. Leão, K.D. Rodrigues, J.C. de Oliveira, "Conversores de Freqüência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Temporários de Tensão ("Voltage Sags")", *Revista Controle & Automação*, Vol.14 no.1, Jan./Mar. 2003.
- [4] M.H.J. Bolen, L.D. Zhang, "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 36, no. 333, May/June 2000.
- [5] C.M.C. de Brito, R.P.S. Leão, F.L.M. Antunes, "Avaliação da Proteção e do Acionamento de um Motor de Indução e de Métodos para Melhoria de sua Suportabilidade sob Afundamentos de Tensão", *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 1, p. 9-16, 2005.
- [6] A. van Zyl, R. Spée, "Short Term Energy Storage for ASD Ride-Through", *Industry Applications Conference, 1998, 33rd IAS Annual Meeting*, Volume 2, Issue, 12-15 Oct 1998 Page(s):1162-1167 vol.2A.
- [7] Von Jouanne, P.N. Enjeti and B. Banerjee, "Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 4, July/August 1999.
- [8] N. X. Melo. "Conversor Boost para Mitigação de Afundamentos de Tensão em Acionamentos de Velocidade Variável", Universidade Federal do Ceará – UFC, 2007.
- [9] I. Barbi. "Eletrônica de potência: Projetos de Fontes Chaveadas". Edição do Autor. Florianópolis. 2001.
- [10] L. Dixon. "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies". *Application Note U-140*, Unitrode.
- [11] G. Garcera; E. Figueiras; A. Mocholí. "Novel Three-Controller Average Current Mode Control of DC–DC PWM Converters with Improved Robustness and Dynamic Response". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15, No. 3. May 2000.
- [12] W. Tang; F.C. Lee; R.B. Riddle. "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control". *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 8. No. 2. April 1993.