

CONVERSORES MONOFÁSICOS TRIFÁSICOS COM ESTÁGIO CC – PROPOSTA E COMPARAÇÃO MULTICRITÉRIO

José A. A. Dias^{1,2}, Euzeli C. dos Santos Jr.², Cursino B. Jacobina²

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB

Rua 1º de maio, 720, Bairro Jaguaribe

CEP 58015-430 João Pessoa, PB; Brasil

Fax: ++55(83)3208-3088; Fone: +55(83)3208-3000

²Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande

Caixa Postal 10105; 58109-970 Campina Grande, PB; Brasil

Fax: ++55(83)3310-1015; Fone: +55(83)3310-1136

e-mail: arturad@ifpb.edu.br, [euzeli, jacobina]@dee.ufcg.edu.br

Resumo - O objetivo deste artigo é descrever três configurações de conversores estáticos, monofásico-trifásico, conhecidas na literatura técnica e compará-las com uma configuração proposta neste artigo. Todas as configurações em estudo não utilizam a conexão com o ponto central dos capacitores do barramento. Os seguintes critérios são utilizados para comparação: a) Distorção harmônica da corrente monofásica de entrada i_g e das tensões trifásicas, b) Mínima tensão de barramento, c) Corrente média dos braços, d) Perdas nas chaves, e) Número de módulos IGBT, f) possibilidade de diferentes relações de tensões, g) possibilidade partida suave, e h) Possibilidade de operação com frequência variável. Os critérios para comparação são determinados por simulação em regime permanente e dinâmica no software *Matlab-Simulink®*, para mesma condição de carga e tensão. Resultados experimentais para a configuração proposta são apresentados.

Palavras-Chave – Conversores monofásico-trifásicos, número reduzido de componentes.

SINGLE-PHASE TO THREE-PHASE CONVERTERS WITH DC LINK VOLTAGE – REVIEW, PROPOSAL AND COMPARISON MULTICRITERIA

Abstract- The aim of this paper is to describe three configurations of single-phase to three-phase converters known in technical literature and comparing them with a configuration proposed in this article. All configurations in the study did not use the connection to the central point of DC link capacitors. The following criteria are used for comparison: a) Harmonic distortion of input current i_g and three-phase lines voltages v_{23} and v_{31} , b) Minimum DC link voltage, c) Average arms current, d) Switches losses, e) Number of IGBT modules, f) Possibility of different voltages relationships, g) Possibility of soft start, h) Possibility of operation with variable frequency. The criteria for comparison are determined by steady state and dynamics simulation with

Matlab-Simulink®, for the same load and voltage condition. Experimental result for the proposed configuration is carried out and presented.

Keywords – Single-phase to three-phase converters, reduced number of components.

NOMENCLATURA

e_g	Tensão da fonte monofásica(RMS).
v_g	Tensão monofásico do conversor (RMS).
v_{jn}	Tensão da fase j da carga em relação ao neutro (RMS).
V	Fasores da tensão genérico.
V_g	Fasores da tensão da fonte monofásica.
I	Fasores de corrente.
E	Tensão do barramento CC.
q_j	Função de estado das chaves do braço j
$q_j = \begin{cases} 1 & \text{“1” se chave de cima fechada, “0” se chave aberta} \\ 0 \end{cases}$	
i_c	Corrente do capacitor.
i_{qj}	Corrente do braço j .
\bar{i}_{qj}	Corrente média de período de PWM do braço j .
\bar{i}_g	Corrente média de período de PWM monofásica de entrada.
\bar{i}_{sj}	Corrente média de período de PWM da fase j .
v_{no}	Tensão do neutro da carga em relação a referência do centro dos capacitores.
σ_j	Tempo de ligação da chave j .
T	Período do PWM.
β	Ângulo de sincronismo entre V_g e V_{jn} .
γ	Ângulo de sincronismo entre V_g e V_{23} .
l_f	Indutância do filtro de entrada monofásico ou do filtro paralelo.
r_f	Resistência do filtro de entrada monofásico ou do filtro paralelo.
n_e	Relação de espiras do transformador.
$V_{fase(RMS)}$	1 pu
P_{total}	3 pu

Artigo submetido em 02/06/2008. Revisões em 07/06/2009 e 17/10/2009. Aceito por recomendação do editor Fernando L. M. Antunes.

I. INTRODUÇÃO

A eletrificação rural é um incômodo para as concessionárias. É conhecido que retorno de investimentos iniciais em eletrificação rural é menor que em sistemas urbanos. Os elementos que levam a este baixo retorno é uma baixa densidade populacional, chegando em algumas regiões do Brasil a densidade de um consumidor por quilômetro quadrado e 0,5 kVA/km [13]. Este cenário faz nascer uma série de alternativas econômicas de distribuição de energia elétrica no meio rural, como é o caso das distribuições de energia bifásica e monofásica. Dentre as distribuições monofásica, destacam-se a Fase-Neutro (com 20% de investimento a menos que o bifásico) e Monofásico com Retorno pelo Solo (MRT) (com 30% de investimento a menos que o bifásico) [7].

Do ponto de vista de cargas elétricas nos sistemas de produção rurais, pode-se destacar motores elétricos, estufas, refrigeração, todas ligadas a processos de beneficiamentos, e irrigação. Esta última, a irrigação, merece destaque devido ao alto investimento nos equipamentos bem como pelo custo da energia elétrica que pode chegar até 30% do custo total de produção nas lavouras irrigantes [10]. Desta forma, um dos problemas encontrados nos sistemas elétricos nos meios de produção rural é a necessidade de utilização de cargas trifásicas e a disponibilidade somente de sistema monofásicos. Um exemplo clássico deste problema é que sistemas de irrigação por pivô central se tornam mais atrativos economicamente para potências maiores de 9kW [10], o que aponta para utilização de cargas trifásicas.

Muitas propostas de solução deste problema foram publicadas ao longo dos anos. As soluções históricas empregadas para resolver o problema da alimentação de cargas trifásicas a partir de fontes monofásicas são classificadas em três tipos segundo [15]:

- Autotransformadores e capacitores associados;
- Rotacionais [10];
- Convertidores estáticos [1-3], [5], [6], [8,], [9], [11], [12], [14], [15].

Das três soluções a que permite um melhor rendimento a um custo aceitável são os conversores estáticos com estágio CC. Tais conversores permitem um controle mais eficiente da tensão e frequência de saída bem como uma melhor qualidade de corrente de entrada (da fonte monofásica). Além do mais, conversores que não utilizam o ponto central dos capacitores do barramento CC, necessitam de somente um capacitor o que reduz o investimento inicial, o volume físico bem como não possuem desequilíbrio das tensões destes capacitores, o que torna o controle menos complexo pois não é necessário compensar este desequilíbrio. Assim, este trabalho se concentra nos conversores monofásico-trifásico com estágio CC sem conexão ao ponto central dos capacitores do barramento CC.

O objetivo deste trabalho é descrever e comparar três configurações de conversores monofásico-trifásico presentes na literatura técnica com uma configuração de dez chaves proposta. Uma comparação multicritério entre as mesmas num cenário de frequência constante e mesma condição de carga e tensão é realizada. Os seguintes critérios são utilizados na comparação:

- Distorção harmônica da corrente de entrada monofásica e da tensão trifásica da carga,
- Mínima tensão de barramento CC,
- Valor médio dos módulos das correntes dos braços,
- Perdas nas chaves,
- Números de módulos de IGBT,
- Possibilidade de diferentes relações de tensões,
- Possibilidade de partida suave,
- Possibilidade de operação em frequência variável.

Tais critérios influenciam as características técnicas, o investimento inicial e custo operacional. Para a configuração proposta é realizada além da simulação dinâmica a implementação experimental. Os critérios para comparação são determinados por simulação dinâmica através do software *Matlab-Simulink*® 7.6.0.

II. CONVERTOR DE DEZ CHAVES – (10C)

A configuração de dez chaves é a configuração padrão para os conversores estáticos monofásico trifásico, com fluxo bidirecional de potência. A mesma possui quatro chaves de entrada (retificador controlado em ponte completa) e seis chaves de saída (inversor trifásico em ponte completa), vista na Figura 1.

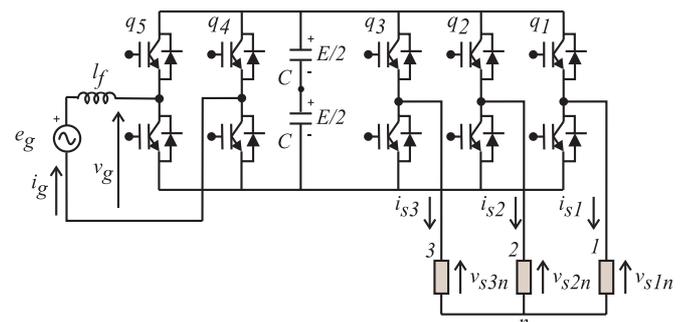


Fig. 1. Conversor CA/CA monofásico-trifásico configuração – (10C).

Esta estrutura permite :

- O controle de harmônico e fator de potência na entrada. [12];
- Controle do nível de tensão do barramento CC;
- Otimização do inversor trifásico e retificador de entrada de forma independente, utilizando estratégias de PWM para distribuição de roda livre [1], [2];
- Fluxo de potência bidirecional permitindo o aproveitamento reversivo de paradas de motores bem como a cogeração monofásica;
- Controle do fluxo conjugado de motores de indução.

É a estrutura que possui o maior número de componentes, mas que apresenta menor tensão do barramento CC. Possui cinco braços para controle, permitindo assim, um controle eficiente tanto da corrente de entrada quanto para a carga trifásica. Suas características principais são:

Os limites da tensão do barramento CC é dada por (1) e (2). Mostra-se na Tabela I a tensão do barramento para diferentes valores da tensão da fonte (v_g) e da carga (v_{jn}).

$$E \geq \sqrt{2}v_g \quad (1)$$

$$E \geq \sqrt{6}v_{jn} \quad (2)$$

Para $j=1,2$ e 3 .

TABELA I

Mínima tensão do barramento CC da configuração 10C com relação a tensão de saída

v_g/v_{jn}	1/4	1/2	1	2	4
E/v_{in}	2,449	2,449	2,449	2,828	5,656

Corrente média nas chaves dos braços 4 e 5 pode ser vista em (3) e dos braços 1, 2 e 3 em (4).

$$\bar{i}_{qj} = \frac{\sigma_j}{T} \bar{i}_g \quad \text{para } j = 4 \text{ e } 5 \quad (3)$$

$$\bar{i}_{qj} = \frac{\sigma_j}{T} \bar{i}_{sj} \quad \text{para } j = 1, 2 \text{ e } 3 \quad (4)$$

Corrente no capacitor é descrita por (5).

$$i_c = (q_5 - q_4)i_g - \sum_{j=1}^3 i_{sj}q_j \quad (5)$$

III. CONVERSOR DE OITO CHAVES

Os conversores com oito chaves são opções interessantes para a utilização em sistemas de baixo custo. A configuração abordada neste trabalho, denominada (8C), vista na Figura 2, foi proposta em [1] e [2], onde é feita comparações em termos de tensão do barramento CC e THD com estruturas de dez chaves. A mesma permite a operação com frequência variável e relação de tensão variável. Devido ao compartilhamento de braço apresenta tensão de barramento maior que a configuração 10C bem como correntes no braço compartilhado maiores.

Suas principais características são:

A tensão do barramento CC é expressa de (6) a (8) e na Tabela II é mostrado os níveis de tensão do barramento para alguns valores de v_g , v_{jn} .

$$E \geq \sqrt{2}v_g \quad (6)$$

$$E \geq \sqrt{6}v_{jn} \quad (7)$$

$$E > \sqrt{2} \sqrt{v_g^2 + 3v_{jn}^2 + 2\sqrt{3}v_g v_{jn}} \quad (8)$$

TABELA II

Mínima tensão do barramento CC da configuração 8C com relação a tensão de saída.

v_g/v_{jn}	1/4	1/2	1	2	4
E/v_{in}	2,803	3,156	3,864	5,278	8,106

A Corrente média no braço 3 é descrita em (9). A corrente do braço 4 é descrita em (3) para $j=4$. A corrente dos braços 1 e 2 são descritas por em (4), para $j=1$ e 2 .

$$\bar{i}_{q3} = \frac{\sigma_3}{T} (\bar{i}_g + \bar{i}_{s3}) \quad (9)$$

A Corrente no capacitor é descrita em (10).

$$i_c = q_4 i_g - q_3 (i_g + i_{s3}) - q_1 i_{s1} - q_2 i_{s2} \quad (10)$$

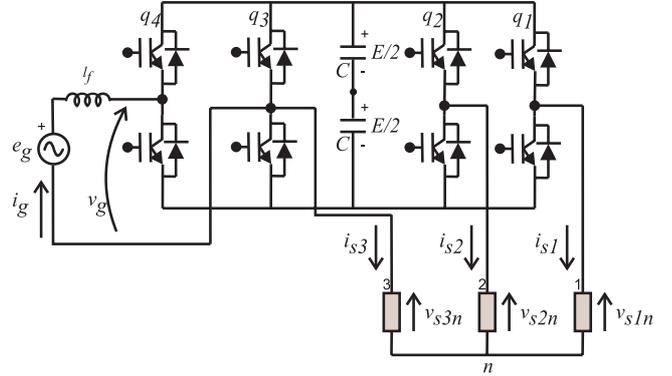


Fig. 2. Conversor em ponte completa na entrada com braço compartilhado - (8C).

Esta configuração operando de forma sincronizada (frequência constante) possibilita reduzir a corrente no braço compartilhado e/ou diminuir a de tensão do barramento CC. O diagrama fasorial das tensões fundamentais e as características de tensão mínima E em função do ângulo de sincronismo β , são mostrados na Figura 3.a e 3.b respectivamente. A tensão do barramento CC é expresso por (11) a (14). Na Figura 3.b é mostrado o gráfico do níveis de tensão do barramento para algumas relações v_g/v_{jn} . Observa-se que para valores β por volta de 60° o conversor possui tensão do barramento CC semelhante ao conversor 10 chaves (10C). Isto é uma característica importante se o conversor estiver num cenário onde não necessite de frequência variável.

$$E \geq \sqrt{2}v_g \quad (11)$$

$$E \geq \sqrt{6}v_{jn} \quad (12)$$

$$E \geq \sqrt{2} \sqrt{v_g^2 + 3v_{jn}^2 + 2\sqrt{3}v_g v_{jn} \cos(\frac{\pi}{2} + \beta)} \quad (13)$$

$$E \geq \sqrt{2} \sqrt{v_g^2 + 3v_{jn}^2 + 2\sqrt{3}v_g v_{jn} \cos(\frac{5\pi}{6} + \beta)} \quad (14)$$

IV. CONVERSORES DE SEIS CHAVES – 6C

As configurações com seis chaves apresentam uma redução substancial no número de componentes apesar de necessitar de tensões do barramento CC maiores que as configurações de 8 e 10 chaves. A redução de investimento em chaves utilizando módulos integrados de 6 chaves bem como redução em drivers são vantagens referentes a estas configurações. No entanto, na maioria delas há um aumento em investimento em capacitores, pois além da utilização do ponto central dos capacitores, a tensão do barramento CC é maior. Destaca-se a configuração 6C mostrada na Figura 4. Tal configuração só utiliza um capacitor e foi proposta em [11]. Devido a uma tensão trifásica da carga ser ligada diretamente à fonte monofásica, esta configuração opera somente de forma sincronizada, sem variação de frequência.

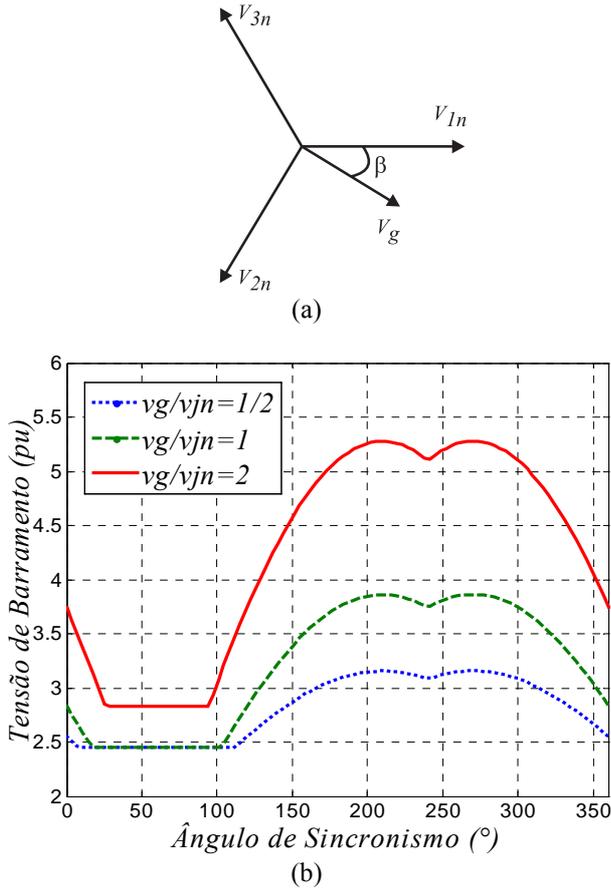


Fig. 3. (a) Diagrama fasorial das tensões trifásicas e monofásica. (b) Gráfico da tensão do barramento CC em função do ângulo de sincronismo β .

A configuração 6C que possui somente uma relação de tensão (tensão de linha da carga definida pela tensão da fonte monofásica), e deve operar de forma sincronizada (frequência constante). Suas características são:

A tensão do barramento CC é descrita por (15) e (16).

$$E \geq \sqrt{2}v_g \quad (15)$$

$$E \geq \sqrt{6}v_{jn} \quad (16)$$

A corrente no capacitor é expressa por (17).

$$i_c = q_3(i_g - i_{s2}) - q_2(i_g + i_{s3}) - q_1 i_{s1} \quad (17)$$

V. CONVERTOR PROPOSTO 10C-T

A configuração proposta 10C-T, vista na Figura 5, utiliza uma configuração de filtro universal para alimentação de cargas trifásicas a partir de fontes monofásicas. Um transformador é utilizado como agente de filtro série para controlar a tensão de linha v_{s23} . Dois indutores operam como componentes de um filtro paralelo, que controla a tensão de barramento CC e corrige o fator de potência da carga. É uma proposta para operação com frequência constante.

O ângulo de sincronismo entre os sistemas monofásico e trifásico é γ , ângulo de defasagem de v_{s23} em relação à e_g é visto na Figura 6. A variação de γ varia o fluxo de potência pelos componentes do conversor.

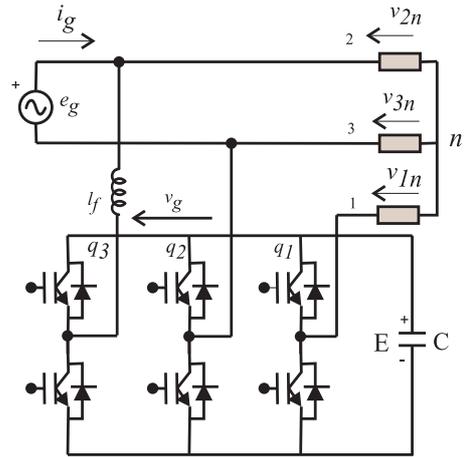


Fig. 4. Conversor ponte completa monofásica com 2 braços compartilhados - 6C.

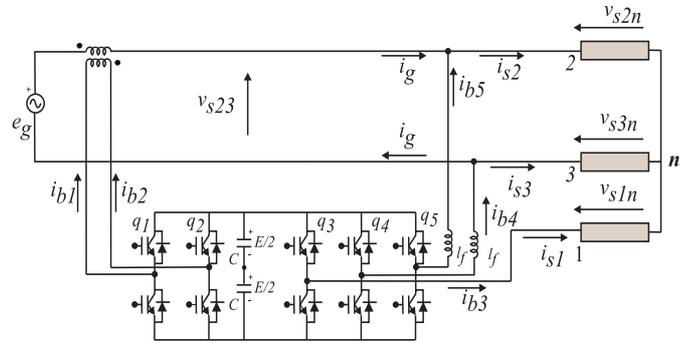


Fig. 5. Proposta de filtro ativo para conversor monofásico-trifásico com dez chaves - 10C-T.

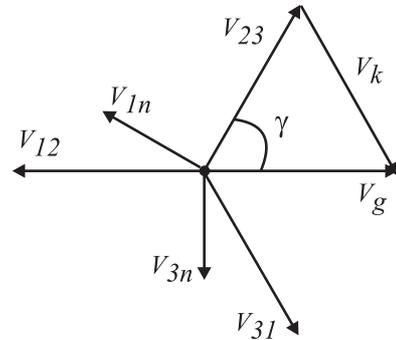


Fig. 6. Diagrama fasorial dos sistemas monofásico e trifásico.

A partir do circuito de regime permanente da configuração proposta, visto na Figura 7, é possível determinar os pontos de operações de mínima corrente nas chaves e menor tensão de barramento. Tal circuito de regime permanente é uma aproximação da configuração original operando somente com as componentes fundamentais. As equações de (18) a (27) modelam matematicamente o circuito em regime permanente. As tensões de pólo e as correntes dos braços podem ser determinadas por método iterativo para qualquer condição operacional existente.

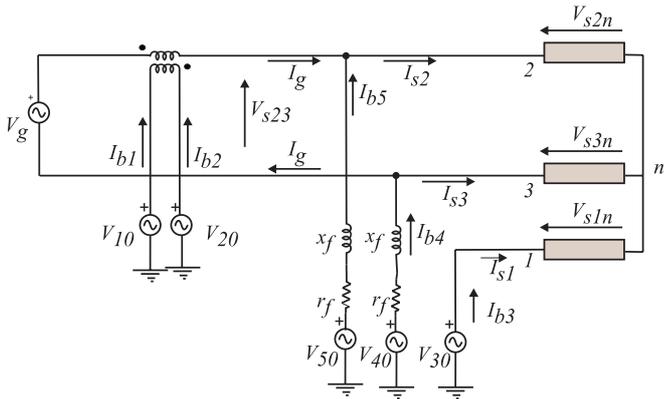


Fig. 7. Modelo de regime permanente da configuração proposta.

$$V_{10} + V_{20} = 0 \quad (18)$$

$$V_{20} - V_{10} = \frac{V_g - V_{23}}{n_e} \quad (19)$$

$$V_{40} = V_x \quad (20)$$

$$V_{50} - V_{40} = (r_f + jx_f)(I_{b5} - I_{b4}) + V_{23} \quad (21)$$

$$V_{30} - V_{40} = -(r_f + jx_f)I_{b4} - V_{31} \quad (22)$$

$$I_{b2} = I_g n_e \quad (23)$$

$$I_{b1} + I_{b2} = 0 \quad (24)$$

$$I_{b3} = I_{s1} \quad (25)$$

$$I_{b4} = I_g + I_{s3} \quad (26)$$

$$I_{b5} = I_{s2} - I_g \quad (27)$$

Onde V_x é a referência genérica para todas as tensões de pólo, e vai depender da estratégia do PWM adotada.

A Figura 8 mostra a tensão de barramento CC versus ângulo de sincronismo γ . Observa-se que a tensão de barramento CC é influenciado por γ e por n_e . Através do ângulo de sincronismo pode-se também variar a corrente dos braços quatro e cinco. Na Figura 9, é mostrado a média dos módulos das correntes dos braços versus γ . É possível mostrar por uma relação fasorial simples que o ângulo de sincronismo que minimiza a corrente média dos braços é exatamente o ângulo de fase da carga. Desta forma, ângulo de sincronismo de operação eficiente depende do fator de potência da carga e da relação de espiras do transformador utilizado.

Na Tabela III, são encontrados as condições operacionais que conduzem à uma tensão de barramento e corrente de braço ambas mínimas, fatores estes que minimizam as perdas nos módulos de IGBTs.

TABELA III

Condição de operação para de tensão de barramento e corrente de braço mínimas, para relação de tensão $v_g/v_{in}=1,73$ e fator de potência 0,5 e 0,8.

Fator de potência	0,5	0,8
n_e	0,5	0,5
E/v_{in}	2,7	2,6
I_f (pu)	0,1	0,1
γ (°)	32	30

Na Figura 10 é encontrado o gráfico do fluxo de potência aparente pelo transformador em função do ângulo de defasagem. Observa-se que é possível reduzir muito o fluxo de potência pelo transformador, reduzindo o ângulo de defasagem. Este procedimento acarreta aumento das perdas nos módulos de IGBTs para cargas com baixo fator de potência. Por exemplo, para uma carga de 10kW operando com $\gamma=2^\circ$ o fluxo de potência aparente pelo transformador é de 0,1pu (0,333kVA), no entanto a corrente média dos braços em (pu) aumenta 10% para uma carga com fator de potência 0,7, ver Figura 9. Assim, é possível reduzir as perdas no transformador, reduzindo o ângulo de defasagem, em detrimento das perdas nos módulos de IGBTs. Além do mais, o transformador está sendo acionado em ponte completa, podendo utilizar uma estratégia de PWM para impor tensão no mesmo a três níveis E , 0 e $-E$. Desta forma, as perdas no ferro se tornam muito próxima à senoidal puro [4].

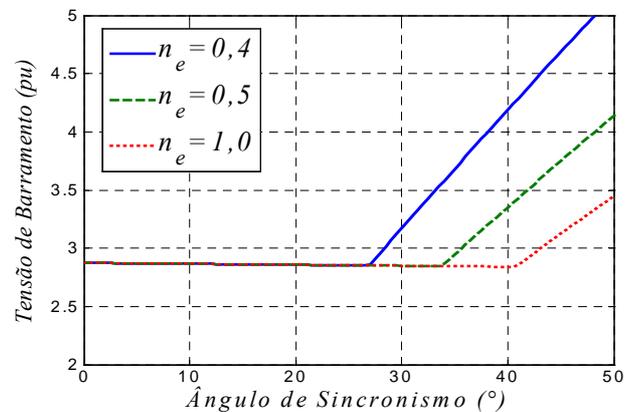


Fig. 8. Tensão de barramento CC versus γ , para $v_g/v_{in}=1,73$ e para algumas relações de espiras do transformador.

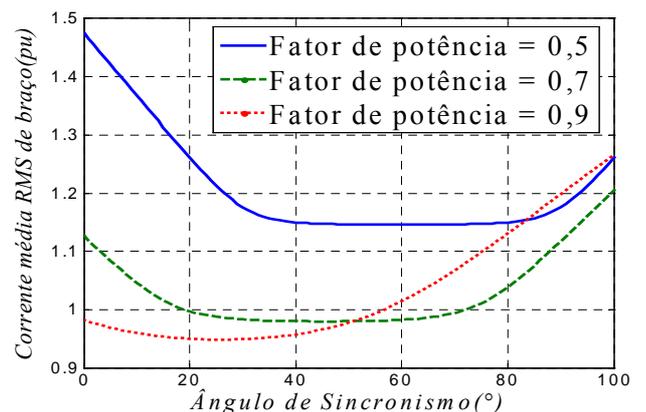


Fig. 9. Média do módulo das correntes dos braços, para fatores de potência 0,5, 0,7 e 0,9.

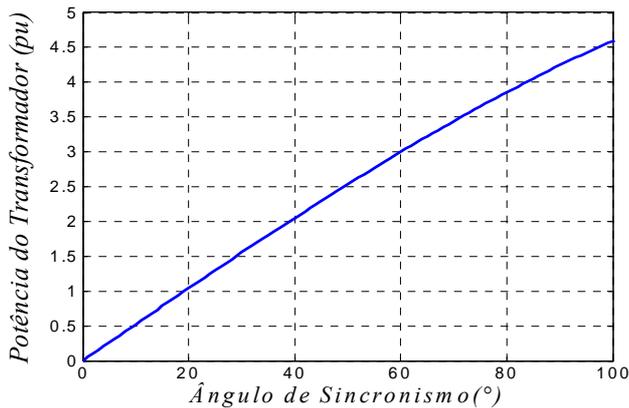


Fig. 10. Potência aparente em (pu) fluindo pelo transformador em função do ângulo de defasagem.

A. Controle da configuração

O controle utilizado nas simulações e experimento prático pode ser visto na Figura 11. Os braços 1 e 2 controla a tensão de linha v_{s23} e os braços 4 e 3 controlam de forma sincronizada tensão de linha v_{s31} . O controle destas duas tensões da carga são realizadas em malha fechada, com os controladores v_{s23} e v_{s31} . Os braços 4 e 5 controla a tensão de barramento CC, também em malha fechada, com ênfase no fator de potência unitário na fonte. Todos os controladores se baseiam num controle de corrente trifásico desbalanceado, nas seqüências positiva e negativa [3]. Tal controle necessitou de quatro sensores de tensão e três de corrente.

B. Resultados de simulação dinâmica e experimentais

Foi realizada simulação dinâmica com a *software Matlab-Simulink*® ver. 7.6.0 e ensaio experimental para os seguintes dados:

- * VSI e 5 braços de 2 IGBTs cada;
- * Frequência de modulação = 10kHz;
- * Plataforma experimental baseada em PC, programação baseada em linguagem C;
- * Transformador monofásico $n_e = 1,0$ (núcleo toroidal) de 100 VA;
- * Carga de 500 W linear (fator de potência = 0,6 indutivo)
- * $V_g = 220V$, $V_{23} = 220V$ ($v_g/v_{jn} = 1,73$) $\gamma = 35^\circ$
- * 4 Capacitores de 2200 μF 400V
- * Indutância de filtro $l_f = 0,1pu$;
- * $E_{(referencia)} = 450V$ ($E/v_{jn} = 3,54$) (E_{min} obtido por simulação 3,18 pu);
- * Ganhos dos controles das tensões v_{s23} e v_{s31} : $k_p = 10$, $k_i = 3000$;
- * Ganhos do controle de tensão de barramento: $k_p = 0,25$, $k_i = 30$;
- * Ganhos do controle de corrente: $k_p = 700$, $k_i = 30000$;
- * Filtros utilizados nas leituras das tensões de linha: primeira ordem com frequência de corte 1500 rad/s.
- * Todas as medidas no ensaio experimental foram realizadas por aquisição de dados via sensores na própria plataforma.

A plataforma pode ser vista na Figura 18 no Apêndice.

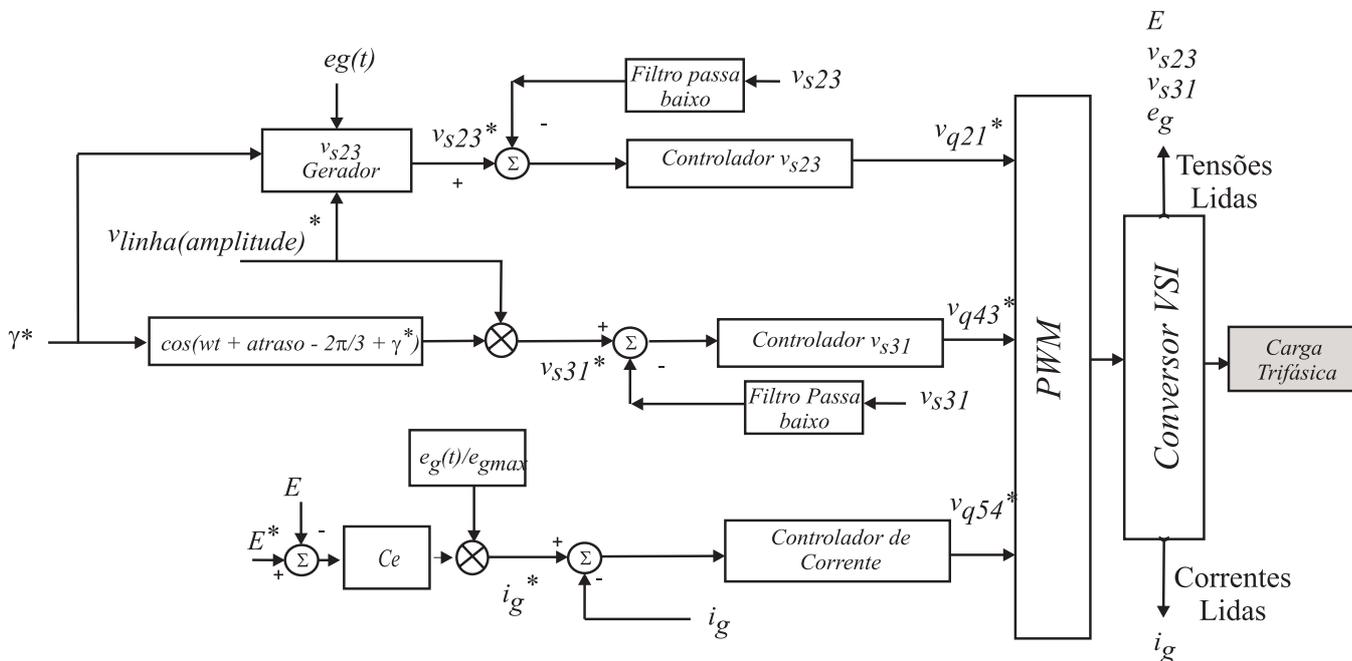
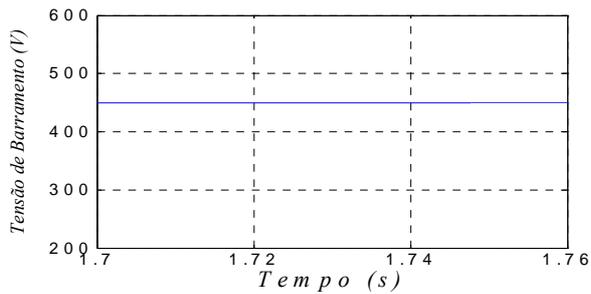
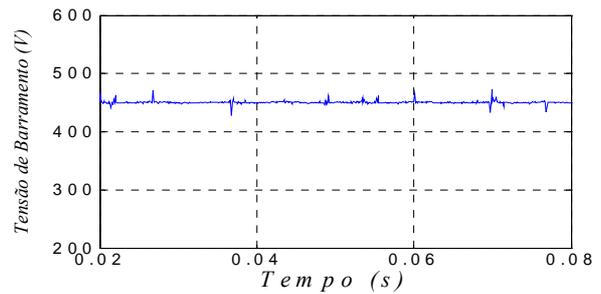


Fig. 11. Controle da configuração proposta – 10C-T.

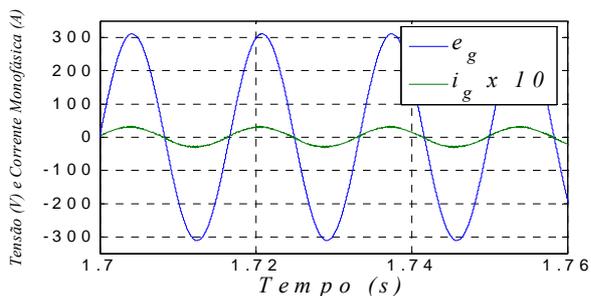


(a)

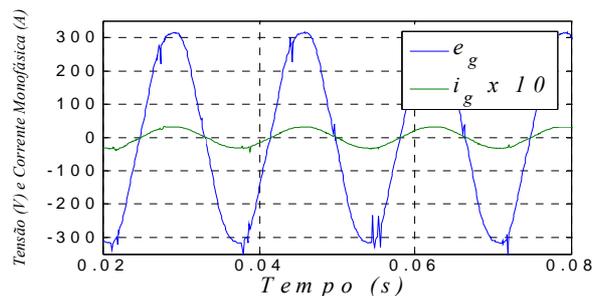


(b)

Fig. 12. Tensão de barramento CC (a) Resultado de simulação dinâmica. (b) Resultado experimental.

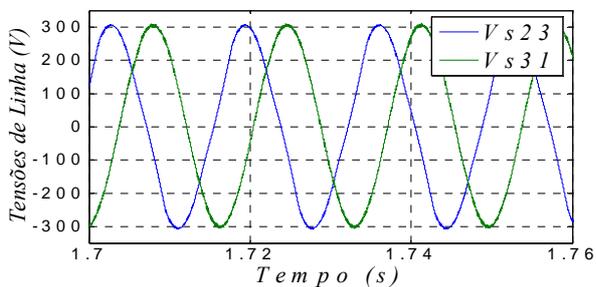


(a)

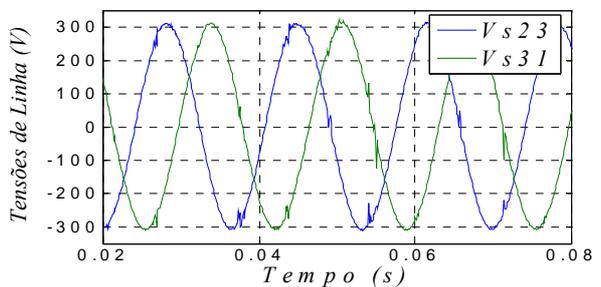


(b)

Fig. 13. Tensão e corrente ($10 \times i_g$) da fonte monofásica (a) Resultado de simulação dinâmica. (b) Resultado experimental.



(a)



(b)

Fig. 14. Tensão de linha trifásica na carga v_{23} e v_{31} (filtradas com filtro 1ª ordem com frequência de corte 1500 rad/s) (a) Resultado de simulação dinâmica. (b) Resultado experimental.

As leituras de corrente e tensões do ensaio experimental foram adquiridas por sensores utilizados no próprio controle da configuração.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram que os resultados experimentais concordam com a simulação dinâmica. Nas Figuras 12 e 13 é mostrado que o controle da tensão de barramento atuou de forma satisfatória, impondo a referência e corrigindo o fator de potência da carga. Na Figura 14 os controles das tensões de linha atuaram também de forma eficiente, as tensões estão equilibradas e na sequência correta. Os valores das tensões de linha mostrados são valores filtrados com filtro de 1ª ordem com frequência de corte de 1500 rad/s.

VI. COMPARAÇÃO MULTICRITÉRIO DAS CONFIGURAÇÕES ABORDADAS

Uma comparação é realizada com as quatro configurações abordadas, 10C, 8C com ($\beta=75^\circ$), 6C e a configuração proposta 10C-T com ($\gamma=36^\circ$). Nas configurações 10C, 8C e 6C foram utilizadas as indutâncias de filtro recomendada na literatura técnica de $l_f=0,2\text{pu}$ [12], já a proposta foi utilizada $l_f=0,1\text{pu}$. Todas operando com relação de tensão $v_g/v_{jn}=1,73$ (tensão de linha igual à tensão da fonte monofásica e com frequência constante). Uma carga comum de 1kW (linear) com fator de potência de 0,8 e frequência de modulação

10kHz, com estratégia modulação senoidal, foram utilizados na comparação.

A seguir serão descritos os critérios e o método de determinação de suas medidas.

A. Critério da distorção harmônica

O descritor deste critério é o índice de distorção harmônica percentual (THD%) até o 50° harmônico

Método de determinação: Função embarcada do *Matlab-Simulink*® para determinação dos primeiros 50° harmônicos e cálculo do THD%.

a- THD% ig.

b- THD% da tensão de linha v_{s23} .

c- THD% da tensão de linha v_{s31} .

Influência do critério: No desempenho técnico da configuração.

B. Tensão mínima de barramento CC

É a menor tensão de barramento para a relação comum de comparação $v_g/v_{jn}=1,73$.

Método de determinação: Determinado pela tensão mínima experimental que provoca o mínimo índice de distorção harmônica nas tensões de carga e corrente monofásica.

d- Tensão mínima de barramento E/v_{jn} .

Influência do critério: Influencia o investimento inicial em módulos de IGBT e capacitores, Influencia no custo operacional (perdas nos módulos de IGBTs).

C. Corrente média de braço

Valor médio do módulo de todas as correntes dos braços alimentando a carga comum de comparação.

Método de determinação : Determinação em regime permanente.

e- Corrente média de braço (pu).

Influência dos critérios: Influencia no investimento inicial dos módulos de IGBT e no custo operacional (perdas dos módulos de IGBTs).

D. Perdas nos módulos duais IGBT

Perdas médias estimadas em (Watts) dos módulos de IGBT, operando na frequência de modulação comum de comparação e para uma temperatura de junção comum. Tais perdas correspondem às perdas por condução do IGBT e diodo de roda livre, perdas de bloqueio do IGBT, disparo do IGBT e recuperação reversa do diodo.

Método de determinação: Função embarcada do *Matlab-Simulink*® 7.6.0 com as funções de perdas instantâneas determinadas experimentalmente para um módulo IGBT CM50DY-24H acionado pelo *driver* SKHI-10.

f- Perdas percentuais (%).

Influência do critério: Influencia no custo operacional.

E. Outros critérios abordados

Alguns critérios importantes são determinados por inspeção da configuração física em estudo.

g- Número de módulos de IGBT (Influencia o investimento inicial e o custo operacional).

h- Possibilidade de diferentes relações de tensões (Maior abrangência de aplicação da configuração).

i- Possibilidade de partida suave (possibilidade de uma *startup* eficiente da configuração).

j- Possibilidade de acionamento com frequência variável (possibilidade de controle de máquinas trifásicas de indução).

Na Tabela IV é apresentado o quadro geral de desempenho das configurações em cada critério abordado.

TABELA IV

Tabela de desempenho das configurações nos critérios abordados

	10C	10C-T	8C	6C
a	1,08	1,27	1,09	2,3
b	1,46	2,08	1,54	0
c	1,46	1,59	1,77	1,85
d	2,83	3,54	2,83	3,54
e	1,44	0,98	1,24	1,15
f	10,25	9,37	7,45	6,96
g	5	5	4	3
h	sim	sim	sim	não
i	sim	sim	sim	não
j	sim	não	sim	não

Nos itens (a), (b) e (c), a proposta apresentou desempenho de distorção harmônicas de corrente da fonte monofásica e tensões satisfatórias e semelhantes às outras configurações. Baixas componentes de 3° e 5° harmônicos na tensão de linha v_{23} controlada pelo filtro série foram observadas, contribuindo para o aumento do THD do item (b). Isto se deve ao desequilíbrio da configuração bem como à interação entre o controle de tensão v_{23} e do controle de tensão de barramento CC. O impacto nas correntes de fase foi muito pequeno, neste caso, por volta de 2,5% para 3° harmônico e 1% para 5° harmônico o que é aceitável.

Em termos de tensão de barramento, item (d), há um aumento neste ponto de operação no sentido de reduzir as correntes dos braços e assim, reduzir as perdas nos braços.

Em termos de perdas nos módulos duais de IGBTs, item (f), a configuração proposta é muito atrativa em relação as configuração 10C. No entanto a configuração 8C ainda possui perdas menores devido a somente oito chaves e tensão de barramento igual a 10C. A diminuição das perdas nas chaves em relação à 10 C é causada pelo fato de somente uma parte do fluxo de potência cruzar o conversor, o que não é observado nas configurações 10C. A proposta possui ainda a vantagem da possibilidade de partida suave.

Quando ao transformador, no ponto de operação que foi realizada a comparação, somente metade da potência total da carga cruzou este componente. O transformador monofásico de núcleo toroidal utilizado na prática experimental contribuiu com uma perda suplementar de 1% do total.

Assim, a configuração proposta é indicada para o seguinte cenário:

- Reduzido custo operacional, pois possui perdas nos módulos de IGBTs reduzidas.
- Corrente da fonte monofásica de boa qualidade.

- Tensões da carga de boa qualidade.
- Partida suave.
- Sem frequência variável (caso de muitas aplicações rurais).

No Apêndice, é mostrado o resultado das simulações das configurações 10C, 8C e 6C. Todas as simulações foram realizadas no software *Matlab-Simulink*® 7.6.0, com passo fixo de 10^{-6} . Quaisquer das simulações podem ser adquiridas junto ao autor principal.

VII. CONCLUSÕES

Foram descritas três configurações de conversores monofásico-trifásico com barramento CC de capacitor único encontradas na literatura técnica. Foi apresentada uma

proposta de conversor operando em paralelo com o sistema monofásico aproveitando a configuração de filtro universal, dez chaves. Através do modelo de regime permanente foram determinadas a tensão de barramento mínima e a corrente média dos braços. Tal modelo orientou o estabelecimento de pontos operacionais de correntes de braços e tensão de barramento CC mínimas. As características técnicas do conversor se mostraram aceitáveis. Os resultados experimentais concordaram com os resultados de simulação dinâmica. Em seguida, foi definido um cenário para sua aplicação. Cargas trifásicas que não precisem de frequência variável, que necessitem de partida suave, e que o custo operacional é mais importante que o investimento inicial.

APÊNDICE

Resultado de simulações dinâmicas das configurações 10C, 8C e 6C, utilizadas para a comparação multicritério.

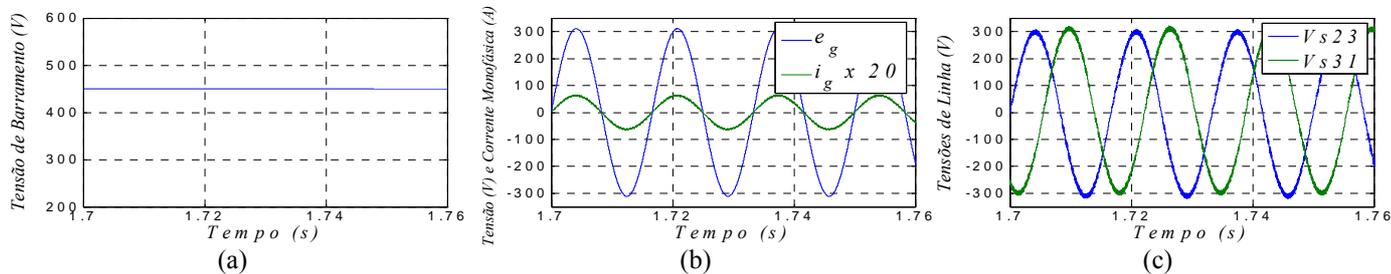


Fig. 15. Resultado da configuração 10C, (a) Tensão de barramento CC. (b) Tensão e corrente da fonte monofásica. (c) Tensões trifásicas de linha v23 e v31 (filtradas com filtro 1ª ordem com frequência de corte 1500 rad/s).

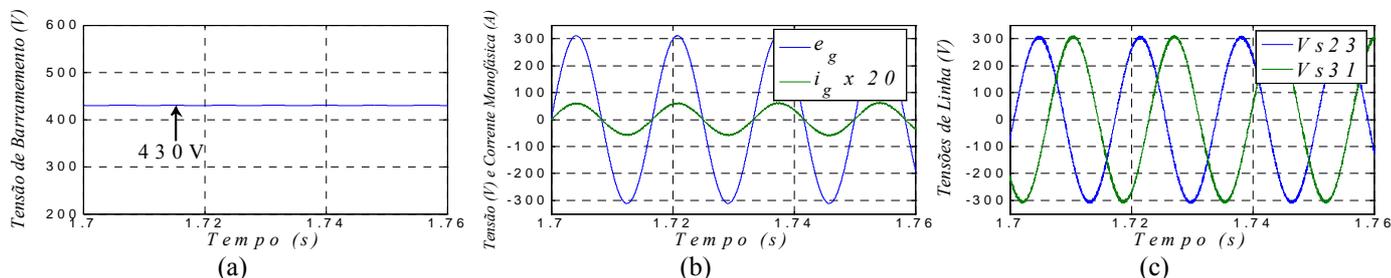


Fig. 16. Resultado da configuração 8C, (a) Tensão de barramento CC. (b) Tensão e corrente da fonte monofásica. (c) Tensões trifásicas de linha v23 e v31 (filtradas com filtro 1ª ordem com frequência de corte 1500 rad/s).

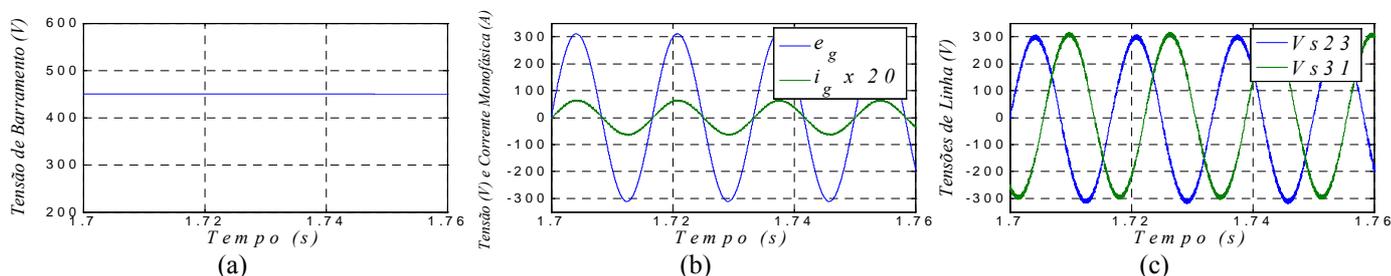


Fig. 17. Resultado da configuração 6C, (a) Tensão de barramento CC. (b) Tensão e corrente da fonte monofásica. (c) Tensões trifásicas de linha v23 e v31 (filtradas com filtro 1ª ordem com frequência de corte 1500 rad/s).



Fig. 18. Plataforma utilizada para ensaio experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. B. Jacobina, M. B. de R. Correia, A. M. N. Lima and E. R. C. da Silva “Ac Motor drive systems with a reduced-switch-count converter”, *IEEE- Transactions on Industry Application*, vol. 39 no. 05, pp. 1333-1342, september 2003.
- [2] C. B. Jacobina, E. C. dos Santos and M. B. de R. Correia Sistemas distribuído de geração de energia elétrica com gerador de indução interligado com a rede monofásica. *SOBRAEP- Revista Eletrônica de Potência*, vol. 19, no. 1, 2005.
- [3] C. B. Jacobina, M. B. de R. Correia, T. M. Oliveira, A. M. N. Lima and Edison R. C. da Silva “Current control of unbalanced electrical systems”, *IEEE- Transactions on Industrial electronics*, vol. 48 no. 03, pp. 517-525, june 2001.
- [4] C. Simão, N. Sadowski, N. J. Batistela. and J. P. Bastos. “Analysis of histeresis losses in iron sheets under arbitrary voltage wave form”, *SOBRAEP- Revista Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 04, 2008.
- [5] E. N. Tshivhilinge and M. Malengret. “A practical control of a cost reduced single-phse to three-phase converter”, *IEEE- Iternational Symposiun Industry Electronics – 99*, vol.2, pp. 445-449, july 1998.
- [6] H. Douglas and M. Malengret. “Symetrical PWM with a split-capacitor single-phase to three-phase converter for rural electrification”, *IEEE- International Symposium on Industrial Electronics* vol. 1, pp. 289-293, july 1998.
- [7] Norma para seleção de sistemas MRT (RER – 05) CEPEL – Centro brasileiro de pesquisa em energia elétrica, ELETROBRAS- Centrais brasileiras SA.
- [8] M. D. Bellar, B. K. Lee, B. Fahimi and M. Ehsani. “An AC motor drive with power fator control for low cost applications”, *IEEE – Applied Power Eletronics Conference*, vol. 1, 2001.
- [9] M. D. Bellar, J. L. Silva Neto at al. “Tology selection of AC motor drive systems with soft-stating for rural application”, *IEEE-Power Electronics Specialists Conference- 2005*, vol. 36, pp. 2698-2704, 2005.
- [10] O. F. Delly, C. H. R. Ferenc, C. A. Teixeira, G. P. Dias. “Uso de motores monofásicos acoplados mecanicamente em série, em irrriação por pivô central”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 19, no. 1, pp. 139-144, 2005.
- [11] P. Enjeti, A. Rahman and R. Jakkli. “Economic single-phase to three-phase converter topology for fixed and variable frequency output”, *IEEE- Transactions on power eletronics*, vol. 8, no.3, pp. 329-335, july 1993.
- [12] P. Enjeti, A. Rahman and R. Jakkli. “A new single-phase to three phase converter with active input current shaping for low cost ac motor drives”, *IEEE- Transactions on power eletronics*, vol. 29, no. 4, pp.806-813, july 1993.
- [13] S. Campana, F. D.Oliveira, A. A. Soares at al. “Inversores de frequência – Uma alternativa racional ao uso de energia elétrica em sistemas de irrigação de pivô central”, *NA. 3 Energia Meio Rural*, 2000.
- [14] R. J. Cruiser, C. F. Landy and Mc Culloch. “Evaluation of a reduce topology phase-converter for rural áreas in Southern África”, *IEEE-AFRCON 1999*, vol. 2, pp. 859-864, 1999.
- [15] W. A. Moncrief. “Practical Application and selection of single-phase to three-phase converters”, *IEEE- Rural Electric Power Conference*, vol.-, pp.d3-1-, april 1996.

DADOS BIOGRÁFICOS

José Artur Alves Dias nascido em 1963 em Fortaleza, Ceará, Brasil. Graduou-se em Engenharia elétrica (1990), mestre em Engenharia Industrial (1997), atualmente (2010) doutorando em Engenharia elétrica na Universidade Federal de Campina Grande. É professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB) desde 1993, onde leciona as disciplinas de máquinas elétricas e automação. Assuntos de interesse: Acionamento de Máquinas de Indução, Geração de indução auto-excitada, Modelagem e Simulação de Máquinas de Indução.

Euzeli Cipriano dos Santos Junior nasceu em Picuí, Paraíba, Brasil, em 1979. Obteve diploma de engenheiro e de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil em 2004 e 2005 respectivamente. O Diploma de Doutor em Engenharia Elétrica em 2007 pela Universidade Federal de Campina Grande. Participou como pesquisador visitante no Electric Machines & Power Electronics Laboratory na Texas A&M University, College Station, Texas, Estados Unidos entre 2006 e 2007. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. Seus interesses de pesquisa são Acionamentos elétricos, Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência.

Cursino Brandão Jacobina nascido em 1955 em Correntes, Pernambuco, é engenheiro eletricista (1978) pela Universidade Federal da Paraíba, mestre (1980) e doutor (1983) pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, França. De 1978 até março de 2002 foi professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba. Desde abril de 2002 é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande. Suas áreas de interesse são: Eletrônica de Potência, Acionamento de Máquinas Elétricas, Sistemas de Controle e Identificação de Sistemas.