

# CONVERSOR TRIFÁSICO MULTIPULSO COM REGULAÇÃO DA TENSÃO DE SAÍDA ATRAVÉS DE ESTÁGIOS CC/CC SEPIC

Angelo C. Lourenço<sup>1</sup>, Falcondes J. M. Seixas<sup>2</sup>, João C. Pelicer Junior<sup>2</sup>, Priscila S. Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IFMS - Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS, Brasil

<sup>2</sup>UNESP - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira - SP, Brasil

<sup>3</sup>UFT - Universidade Federal do Tocantins, Palmas - TO, Brasil

e-mail: angelo.lourenco@ifms.edu.br, falcon@dee.feis.unesp.br, joao1.pelicer@gmail.com, oliveirapriscila18@gmail.com

**Resumo** - O presente trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um conversor CA-CC trifásico formado por um retificador de 18 pulsos não isolado, de baixo peso e volume, e três conversores SEPIC que atuam como elementos intermediários, ou seja, um estágio CC-CC para a conexão com a carga, possibilitando tensão de saída regulada e, opcionalmente isolamento galvânico em alta frequência. O conversor proposto pode ser utilizado em substituição a estágios retificadores convencionais, de baixa qualidade de energia, como os utilizados em acionadores de velocidade variável (inversores), fontes CC entre outras. Os resultados experimentais obtidos mostram que o conversor apresenta reduzido conteúdo harmônico, com distorção harmônica total da corrente de entrada menor do que 9% e fator de potência em torno de 0,99 e fornece tensão de saída regulada.

**Palavras-Chave** - Distorção Harmônica, Fator de Potência, Retificador Multipulso, SEPIC.

## THREE-PHASE MULTIPULSE CONVERTER WITH REGULATED OUTPUT VOLTAGE BY SEPIC DC-DC STAGE

**Abstract** - This paper presents the study and development of a three-phase AC-DC converter performed by a 18-pulses non-isolated rectifier, that has low weight and size, and three SEPIC converters that work as intermediate elements, ie, a DC-DC stage to connect the load, providing regulated output voltage and high frequency isolation if necessary. The proposed converter could replace conventional rectifiers stages with low power quality, such as used in variable speed drives (inverters), DC sources among others. Experimental results show that the converter has reduced harmonic content, with total harmonic distortion of input current less than 9% and power factor around 0.99 and provides regulated output voltage.

**Keywords** - Harmonic Distortion, Power Factor, Multipulse Rectifier, SEPIC.

## NOMENCLATURA

CC	Corrente contínua.
D	Razão cíclica.
DHTi	Distorção harmônica total de corrente.
FP	Fator de potência.
SEPIC	Single-Ended Primary Inductance Converter.

## I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é fortemente afetada pelo uso de cargas não lineares, especialmente cargas eletrônicas. A grande maioria das cargas não lineares é composta por equipamentos de uso residencial e comercial, que em geral são de pequena potência. Porém, também estão presentes em aplicações industriais com impacto mais significativo ao sistema elétrico devido ao tamanho das cargas. Os principais equipamentos dessa categoria são os conversores CA-CC, que estão presentes em equipamentos como fontes ininterruptas de energia para aplicações em telecomunicações e sistemas de informação, acionadores de motores de corrente contínua e de corrente alternada com velocidade variável, conhecidos como inversores, que são utilizados em inúmeras aplicações industriais, como sistemas de bombeamento e refrigeração e acionamentos em geral.

Apesar de acionar motores de corrente alternada, que são cargas lineares, a interface dos inversores com o sistema elétrico é realizada pelo conversor CA-CC, que em geral é uma ponte retificadora trifásica de 6 pulsos ligada a um barramento CC capacitivo com características de fonte de tensão e impõe ao sistema elétrico uma corrente fortemente distorcida, resultando em elevada distorção harmônica total da corrente de entrada (DHTi) e baixo fator de potência (FP).

Dentre as principais soluções para redução do conteúdo harmônico pode-se citar a utilização de filtros sintonizados, filtros passivos e ativos, conversores com correção ativa do fator de potência (PFC - *Power Factor Correction*), híbridos e multipulsos.

Os retificadores multipulsos são uma importante ferramenta para redução da DHTi e aumento do FP. Eles utilizam transformadores ou autotransformadores com múltiplos enrolamentos especialmente conectados para fornecerem várias saídas trifásicas, e assim podem formar conversores de 12, 18 ou mais pulsos de acordo com cada estrutura.

Podem fornecer tensões médias de saída maiores, menores ou iguais à tensão da entrada [1]. Esses conversores possuem baixa distorção harmônica de corrente de entrada se comparados com os conversores convencionais [2], pois

---

Artigo submetido em 11/05/2016. Primeira revisão em 27/06/2016. Aceito para publicação em 10/08/2016, por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

reduzem os componentes harmônicos da corrente de forma passiva, a própria estrutura cancela componentes harmônicos, conforme o número de pulsos, permanecendo apenas os harmônicos característicos dados pela expressão  $p \cdot n \neq 1$ , onde  $p$  é o número de pulsos e  $n$ , o conjunto de números inteiros maior que 0 (zero) (1, 2, 3, ...). Assim, quanto maior o número de pulsos menores serão os componentes harmônicos presentes e menor a DHTi.

Os conversores multipulsos mais conhecidos são os isolados, porém, eles elevam significativamente o peso e volume do conjunto, que está relacionado diretamente à potência processada pelo núcleo do transformador em relação à potência disponível na saída. Essa relação é conhecida como taxa kVA, dada por:

$$kVA_{taxa} = \frac{S_{Nuc}}{P_S} = \frac{\frac{1}{2} \sum (V_{Enroln} \cdot I_{Enroln})}{P_S} \quad (1)$$

onde:

$S_{Nuc}$  - potência aparente processada pelo núcleo;

$P_S$  - potência ativa disponibilizada na saída;

$V_{Enrol}$  - tensão eficaz em cada enrolamento primário e cada secundário ( $n$ );

$I_{Enrol}$  - corrente eficaz em cada enrolamento primário e cada secundário ( $n$ ).

Quanto menor a taxa kVA menor será o tamanho necessário do núcleo do transformador e, conseqüentemente, menor peso e volume do mesmo.

Os transformadores isolados processam toda a potência do conversor, além das perdas internas, resultando em taxa kVA acima de 100%. Já os autotransformadores, não isolados galvanicamente, processam apenas uma parcela da potência, responsável pelas defasagens e ajustes de tensão, em alguns projetos as taxas kVA são inferiores a 20%, resultando em um núcleo com peso e volume significativamente reduzidos.

Assim, a utilização de conversores não isolados é uma forma de reduzir a DHTi e aumentar o fator de potência do conversor com peso e volume reduzidos comparados com os conversores isolados. Essas vantagens fazem com que esses conversores sejam utilizados em inúmeras aplicações, inclusive conversores embarcados como utilizados em aeronaves modernas, conhecidas como MEA (*More Electric airplanes*) [3]. Em aplicações industriais, eles podem ser utilizados em substituição às pontes retificadoras convencionais, conectando-os diretamente aos barramentos CC dos equipamentos mencionados anteriormente, técnica conhecida como *Retrofit* [4].

## II. RETIFICADOR DE 18 PULSOS NÃO ISOLADO

Para este trabalho será utilizado o conversor de 18 pulsos com conexão delta diferencial que apresenta taxa kVA de apenas 16,9% e DHTi de 8,9%, cujos principais parâmetros são mostrados na Tabela I [4].

O autotransformador possui três enrolamentos primários e doze enrolamentos secundários. Um diagrama simplificado com a ligação dos enrolamentos é apresentado na Figura 1.

Na saída do autotransformador são gerados três sistemas trifásicos defasados em  $20^\circ$  entre si que são conectados a pontes retificadoras trifásicas e assim são disponibilizadas três saídas retificadas de seis pulsos cada.

**TABELA I**  
**Dados Construtivos do Conversor Multipulso [4]**

Tensão de entrada	220V / 60Hz - Trifásico
Tensão de saída retificada	3 x 315V CC
Potência de saída	2,5kW
Primários ( $L_{AB}$ , $L_{BC}$ , $L_{CA}$ )	25 AWG/997 voltas
Secundários ( $L_{AB1e2}$ ; $L_{BC1e2}$ ; $L_{CA1e2}$ )	20 AWG/207 voltas
Secundários ( $L_{AB3e4}$ ; $L_{BC3e4}$ ; $L_{CA3e4}$ )	20 AWG/20 voltas
Pontes retificadoras	3 - E300359

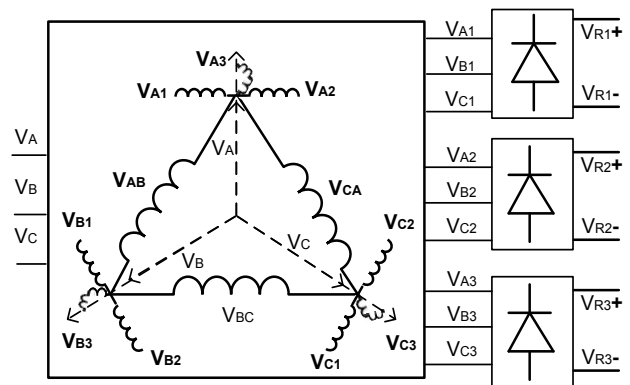


Fig. 1. Diagrama do retificador de 18 pulsos delta-diferencial.

Não é possível conectar diretamente as saídas retificadas, pois devido à defasagem entre elas, há diferenças instantâneas de tensão. Para absorver essas diferenças é necessário conectar elementos intermediários às saídas das pontes retificadoras, tradicionalmente são utilizados transformadores ou indutores chamados Transformadores Interfase (IPT - *Interphase Transformers*). Esses indutores, entretanto, elevam o peso e volume do conversor e não trazem outras vantagens ao mesmo.

Um problema adicional é que devido a sua construção, as três saídas do autotransformador podem apresentar diferenças de impedâncias, a Figura 2 mostra um detalhe das ligações dos enrolamentos secundários da fase A. Observa-se que a ligação com o secundário  $L_{BC1}$ , de 207 voltas do fio AWG 20, e resulta na defasagem de  $20^\circ$  da saída  $V_{A1}$ , o mesmo ocorre com a saída  $V_{A2}$ , ligada ao enrolamento  $L_{BC2}$  com defasagem oposta.

O valor das tensões  $V_{A1}$  e  $V_{A2}$  é dado por:

$$V_{A1} = V_{A2} = \frac{V_A}{\cos(20^\circ)} = 1,064V_A \quad (2)$$

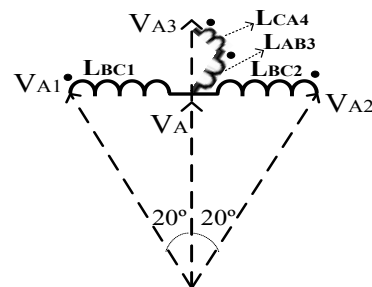


Fig. 2. Detalhe dos enrolamentos secundários - fase A.

Para compensar essa diferença de tensão, a saída  $V_{A3}$  é ligada aos enrolamentos  $L_{AB3}$  e  $L_{CA4}$  que possuem apenas 20 volts cada. Esses enrolamentos não promovem defasagem, apenas um ajuste na tensão. Apesar de pequena diferença na impedância, quando ligados em paralelo por meio de IPTs pode haver um desequilíbrio de corrente entre os três conversores, o que contribui para aumentar a distorção harmônica da corrente de entrada.

Outra possibilidade de conexão das saídas dos retificadores multipulsos é utilizando-se conversores CC-CC chaveados em alta frequência. Estudos realizados com conversores *Full-Bridge* [5] e *Boost* [6]-[8] demonstram as vantagens desses em comparação aos IPTs:

- Menor peso e volume;
- Possibilidade de regulação da tensão de saída, (Barramento CC), com malhas de controle de tensão;
- Equilíbrio das correntes, por meio de um controle individualizado em cada conversor;
- Possibilidade de isolamento em alta frequência, permitindo a utilização da topologia do autotransformador em aplicações que necessitem de isolamento galvânico.

O conversor *Full-Bridge* possui isolamento em alta frequência, porém sua característica de entrada é de fonte de tensão, para uma conexão adequada na saída do retificador multipulso é necessária a inclusão de um Filtro LC.

Já o conversor *Boost* possui característica de entrada de fonte de corrente, adequada à conexão com o retificador multipulso sem a necessidade de filtro de entrada, porém não permite isolamento galvânico e a característica de ganho estático é de elevador de tensão, o que pode limitar sua aplicação.

Um conversor que não foi explorado em aplicações com multipulso é o conversor SEPIC, que possui características que podem ser vantajosas na utilização com os retificadores multipulsos e por esse motivo será objeto deste trabalho.

### III. CONVERSOR SEPIC

O conversor SEPIC (*Single-Ended Primary Inductance Converter*) é um conversor CC/CC utilizado em aplicações PFC [9], [10], conversores híbridos [11], conversor para fontes renováveis de energia [12], acionadores para lâmpadas de LED [13] e outras aplicações na eletrônica de potência. Sua estrutura possui dois capacitores e dois indutores como mostrado na Figura 3, que o torna um conversor de 4ª ordem.

Apresenta entrada com característica de fonte de corrente, que permite conexão direta à saída de um retificador multipulso e saída fonte de tensão, que também simplifica a conexão às mais diversas cargas. Pode operar como abaixador ou elevador de tensão [14].

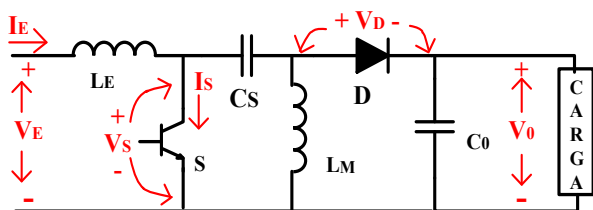


Fig. 3. Conversor SEPIC não isolado.

Essa estrutura pode ser naturalmente isolada substituindo o indutor do paralelo ( $L_M$ ) por um indutor acoplado, como mostrado na Figura 4.

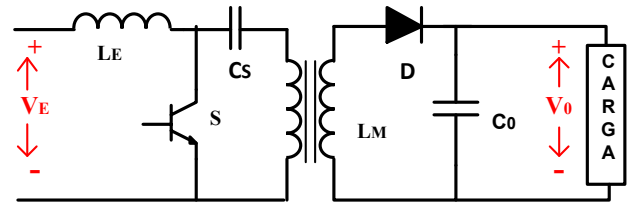


Fig. 4. Conversor SEPIC isolado.

A operação do conversor SEPIC será no modo de condução contínua. A característica de ganho estático  $G$ , é dada por.

$$G = \frac{V_0}{V_E} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (3)$$

onde  $n_1/n_2$  é a relação de espiras do indutor acoplado, ou seja, uma característica construtiva do conversor. No conversor SEPIC não isolado esse termo é excluído.

A razão cíclica ou ciclo de trabalho  $D$  está relacionada ao tempo de abertura e fechamento da chave  $S$ , sendo essa uma característica operacional do conversor, que pode ser controlada, permitindo que a tensão da saída ( $V_0$ ) seja regulada a valores definidos, mesmo com a ocorrência de transitórios de carga e distúrbios na tensão de alimentação ( $V_E$ ).

A partir desse estudo é proposto um novo conversor composto por um retificador multipulso e três módulos do conversor SEPIC não isolado e isolado como estágio CC-CC de saída, e será realizado um comparativo com os resultados experimentais de cada um.

A operação do conversor SEPIC não isolado apresenta um inconveniente. Lembrando que as saídas do retificador multipulso apresentam defasagem de  $20^\circ$ , o que resulta em diferenças instantâneas na tensão de entrada de cada conversor SEPIC. Quando as chaves estão fechadas, a corrente que circula através de um dos conversores pode retornar através de outro, o que pode ser impedido com a adição de um segundo diodo na saída, no ramo negativo. Quando as chaves estão abertas, também pode haver circulação de correntes entre conversores na saída da carga, portanto após os diodos. Para resolver este problema é necessário que a indutância de entrada seja dividida entre os dois ramos. A estrutura do conversor SEPIC não isolado alterada para conexão com retificadores multipulso é mostrada na Figura 5.

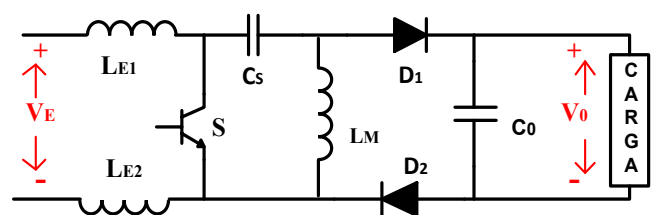


Fig. 5. Conversor SEPIC não isolado para conexão multipulso.

Os principais parâmetros de projeto do SEPIC isolado são idênticos ao do conversor não isolado, alterando o indutor paralelo, que deve ser substituído por um indutor acoplado.

O conversor isolado não precisa de adaptações para ser conectado nas saídas do retificador multipulso. É necessário apenas um diodo na saída, o que a princípio reduz as perdas e melhora o rendimento do circuito. Porém são verificados outros problemas relacionados ao indutor acoplado, especialmente as indutâncias de dispersão, que aumentam as perdas e elevam os esforços de tensão na chave S e no diodo D, sendo necessários circuitos adicionais para proteção das chaves (*Snubber*).

Os dados do projeto de cada conversor SEPIC não isolado estão na Tabela II.

#### IV. CONVERSOR MULTIPULSO SEPIC

A Figura 6 mostra o autotransformador de 18 pulsos com três módulos do conversor SEPIC não isolado. Nesta topologia a tensão da carga é igual à tensão de saída dos módulos e a corrente da carga é a soma das correntes dos três módulos.

Foi construído um protótipo do conversor proposto, mostrado na Figura 7. Para o acionamento dos IGBTs foi montada uma placa condicionadora com controle digital baseado em um microcontrolador/DSC 28027<sup>®</sup> responsável pela malha de controle e geração dos sinais utilizando a técnica *Pulse Width Modulation* (PWM). O diagrama simplificado da placa é mostrado na Figura 8.

Como as saídas dos três conversores SEPIC estão conectadas em paralelo, estão sob a mesma tensão de saída, assim apenas um controlador é necessário.

TABELA II

#### Dados de Projeto de cada Conversor SEPIC

Tensão de entrada e saída	310V CC
Potência de Saída	800W
Razão cíclica	0,5 (Micro controlador / PWM)
Indutor da entrada	25mH (Dividido em 2 x 12,5mH)
Indutor paralelo	8mH
Capacitor Série	4,1µF (Adotado 4,4µF)
Capacitor de Saída	26µF (Adotado 33µF)
Chave S	IGBT IRG4PF40 (40A / 1200V)
Diodos D1 e D2	MUR8100 (8A / 1000V)
Driver	SKHI 10/12 <sup>®</sup>

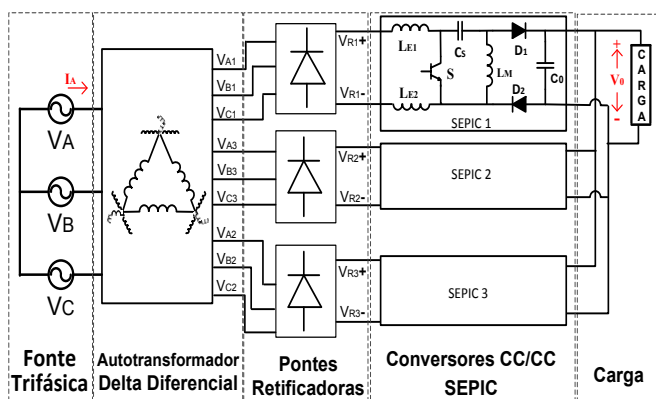


Fig. 6. Retificador de 18 pulsos com conversores CC-CC SEPIC não isolados.

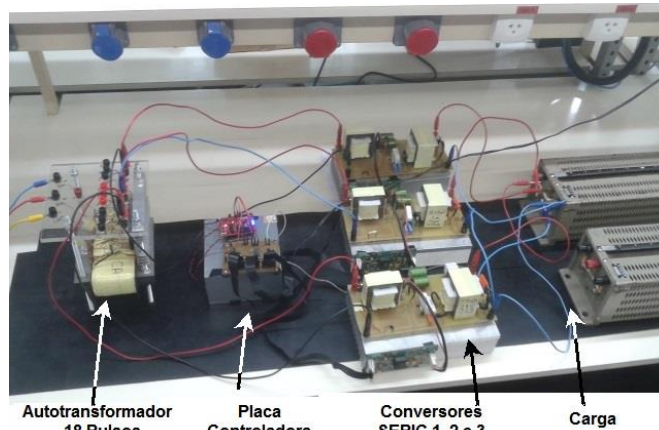


Fig. 7. Protótipo do conversor multipulso/SEPIC.

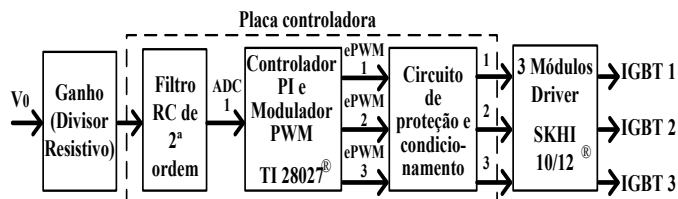


Fig. 8. Diagrama da placa controladora PWM.

Uma amostra da tensão de saída  $V_0$  é obtida por meio de um divisor resistivo, localizado na saída de um dos conversores. Este sinal é enviado à placa condicionadora. Para atenuar eventuais ruídos provenientes do chaveamento, é utilizado um filtro RC de segunda ordem. O sinal condicionado é enviado a uma porta ADC (conversor analógico digital) do microcontrolador, onde é configurado o compensador de tensão utilizando-se um controlador PI. O sinal de referência é enviado para três portas PWM distintas do microcontrolador, uma para cada conversor, que podem gerar o mesmo sinal (sincronizado) com defasamento (intercalado). O sinal nas portas PWM não possui tensão adequada para o acionamento dos IGBTs, por isso é necessário que o sinal passe por um circuito de proteção e condicionamento (Buffer) e por um driver, para então ser enviado aos IGBTs localizado no conversor SEPIC.

#### V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados ensaios laboratoriais com diversas condições de carga em regime permanente com carga variando de 25 a 100% e testes de desempenho dinâmico, onde foram aplicados degraus de carga e afundamento da tensão de entrada.

##### A. Ensaios em Regime Permanente

O teste a plena carga, mostra o desempenho do circuito ao fornecer a carga máxima do conversor, a eficiência e a qualidade da energia analisada pela corrente da entrada.

1) *Tensão e corrente na entrada*: As formas de onda da tensão e da corrente de uma fase na entrada são mostradas na Figura 9. Observa-se que a corrente da entrada possui a forma característica de conversor de 18 pulsos, com baixo deslocamento angular e reduzida distorção harmônica, confirmado pelo espectro harmônico mostrado na Figura 10.



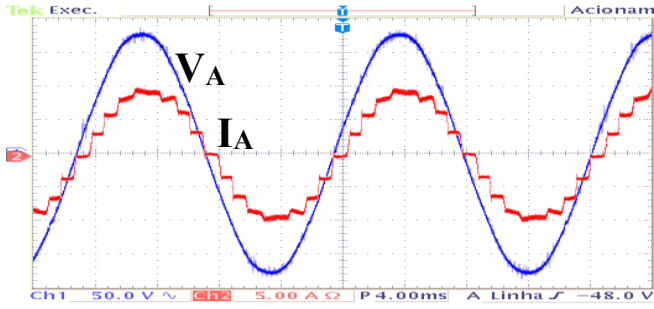


Fig. 9. Tensão e corrente a plena carga - fase A.

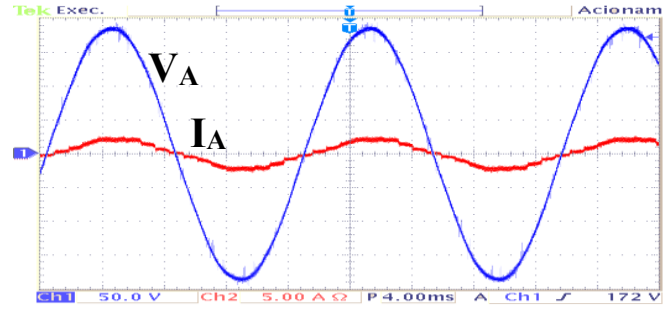


Fig. 11. Tensão e corrente a 20% de carga - fase A.

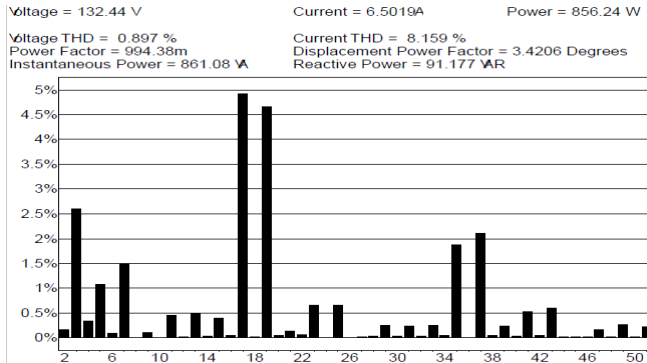


Fig. 10. Espectro da corrente a plena carga - fase A.

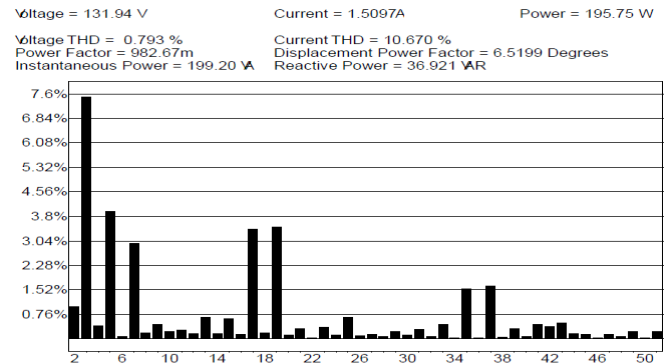


Fig. 12. Espectro da corrente a 20% de carga - fase A.

O espectro de frequências da corrente de entrada mostra que há uma forte redução nos componentes harmônicos de corrente com exceção dos componentes dados pela expressão  $18 \cdot n \pm 1$ , ou seja  $17^a$ ,  $19^a$ ,  $35^a$ ,  $37^a$ , ...

A Distorção Harmônica Total da corrente é de 7,37%, e o fator de potência é 0,994.

As correntes nas demais fases apresentam resultados similares. Um resumo com os dados coletados é apresentado na Tabela III. A potência processada pelas três fases totaliza 2556 W e a potência consumida na carga é de 2343 W, assim o rendimento do conversor a plena carga é de 0,917.

Outras condições de carga foram testadas para verificar o comportamento do conversor quanto à composição harmônica da corrente de entrada. A Figura 11 mostra a tensão e corrente de entrada com apenas 20% da carga. Nessas condições a DHTi foi de 10,6%, foi verificada uma redução no FP, que ficou em 0,983, como mostrado no espectro harmônico na Figura 12.

Essa redução, no entanto, se deve mais ao aumento no ângulo de defasagem entre tensão e corrente, que é maior em cargas reduzidas devido à indutância de magnetização do autotransformador. As demais fases apresentaram resultados semelhantes.

2) *Tensão e corrente na carga:* A tensão de saída a plena carga apresenta um nível DC com valor de 312 V. A ondulação (Ripple) é menor que 1%, conforme Figura 13.

TABELA III

Resultados do Ensaio do Conversor a Plena Carga

	Tensão V	Corrente A	Potência W	DHTi %	FP
Fase A	132,4	6,51	856,5	8,1	0,994
Fase B	131,1	6,43	837,8	8,4	0,993
Fase C	133,8	6,48	861,9	8,1	0,992
Carga	312,0	7,51	2343,1	-	-

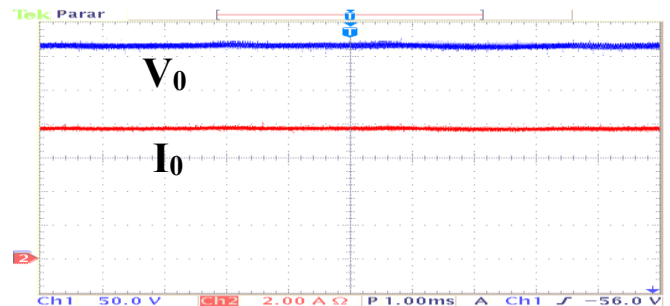


Fig. 13. Tensão e corrente na carga.

3) *Tensão e corrente no indutor de entrada:* A corrente no indutor de entrada de cada conversor SEPIC é afetada pela ondulação da tensão provenientes das pontes retificadoras de 6 pulsos. A Figura 14 mostra a tensão e corrente no indutor de entrada de um conversor SEPIC. Essa variação em baixa frequência pode levar a problemas de estabilidade do circuito, especialmente em condições de carga reduzida onde o valor instantâneo mínimo da corrente pode se aproximar de zero, o que poderia levar o conversor a operar no modo de condução descontínua e perder as características de ganho estático especificadas.

Não foram observados problemas nos ensaios realizados, mesmo em condições de carga reduzida. As correntes nos demais conversores apresentam forma de onda e valores médios similares.

4) *Tensão nas chaves semicondutoras - IGBT e Diodo:* A tensão sobre as chaves de um conversor SEPIC é mostrada na Figura 15. Durante o período em que estão abertas, as chaves suportam a soma da tensão de entrada e de saída.

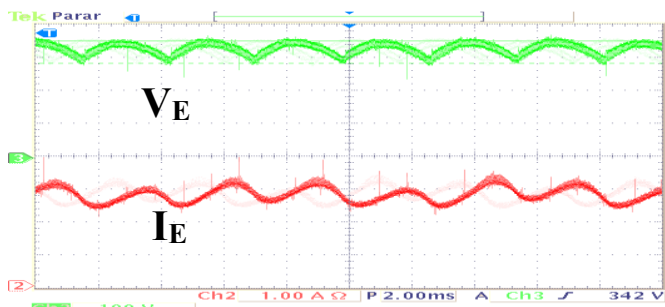


Fig. 14. Tensão e corrente na entrada do conversor SEPIC.

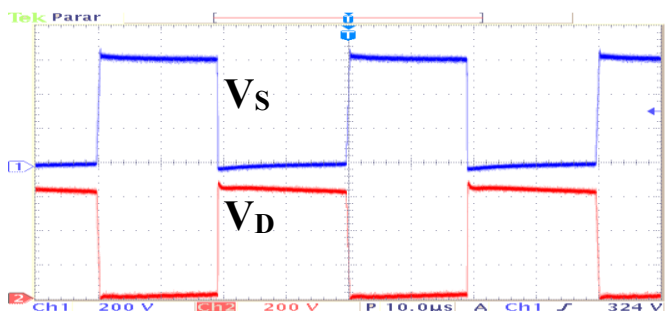


Fig. 15. Tensão sobre o IGBT e o diodo de um conversor SEPIC.

É verificado um pequeno transitório no início deste período, que eleva esse valor a um valor que não é prejudicial às chaves, não sendo necessários circuitos adicionais de proteção.

#### B. Ensaios de Desempenho Dinâmico

Os ensaios de desempenho dinâmico têm por objetivo verificar a regulação da tensão da saída do conversor.

1) *Variação de carga*: Foram realizados testes com variação da carga de 50 para 100% da carga. O aumento da corrente resulta em aumento da queda de tensão nos diversos elementos do circuito (autotransformador, pontes retificadoras e no conversor SEPIC). Para que não ocorra redução na tensão de saída, o controlador PI realiza a compensação, aumentando a razão cíclica. A tensão de saída retorna ao valor inicial após um transitório, conforme mostra a Figura 16.

2) *Afundamento da tensão de entrada*: Foram realizados testes com redução da tensão de entrada a cerca de 80% da nominal, por meio de um autotransformador.

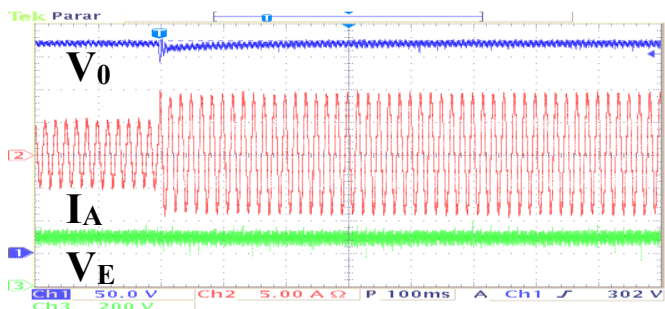


Fig. 16. Tensão na carga, corrente na entrada e tensão no indutor SEPIC - Degrau 50%.

Novamente, para que não ocorra redução na tensão de saída o controlador PI realiza a compensação, aumentando a razão cíclica, a tensão de saída retorna ao valor inicial. Para compensar a redução da tensão de entrada, a corrente da entrada aumenta, conforme mostra a Figura 17. A potência total do conversor é mantida. Esta compensação é particularmente útil na aplicação em *retrofit*, de inversores. Dependendo do nível do afundamento, o inversor aciona uma proteção, desligando o motor e parando a linha de produção. Com a compensação, a operação do motor é mantida, reduzindo prejuízos com paradas não programadas. No entanto, em caso de afundamentos mais severos e com demorados, deve-se acionar alguma proteção, pois a corrente elevada pode causar danos ao conversor SEPIC. O conversor do protótipo contam com um fusível de 5 A.

#### VI. CONVERSOR MULTIPULSO SEPIC ISOLADO

A utilização do conversor SEPIC isolado com conversores multipulsos pode trazer vantagens adicionais como permitir a utilização dos conversores baseados em autotransformadores em aplicações que requerem isolamento galvânico como sistemas de telecomunicações, aplicações médicas e outros. O isolamento é obtido substituindo o indutor paralelo por um indutor acoplado sendo realizado em alta frequência, com peso e volume reduzidos quando comparados aos sistemas com transformadores convencionais, onde o isolamento é realizado em baixa frequência.

A Figura 18 apresenta a conexão dos conversores SEPIC isolados ligados em paralelo. Assim como ocorre com o conversor não isolado, a tensão da carga é igual à tensão de saída dos módulos e a corrente da carga é a soma das correntes dos três módulos.

#### VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados novos ensaios laboratoriais, procurando as mesmas condições para o conversor SEPIC isolado. A princípio observou-se que os resultados foram muito próximos aos do conversor não isolado.

1) *Tensão e corrente na entrada*: As formas de onda da tensão e da corrente de uma fase na entrada são mostradas na Figura 19. A corrente da entrada apresenta reduzida distorção harmônica, confirmado espectro harmônico mostrado na Figura 20. A Distorção Harmônica Total da corrente é de 7%, e o fator de potência é 0,994.

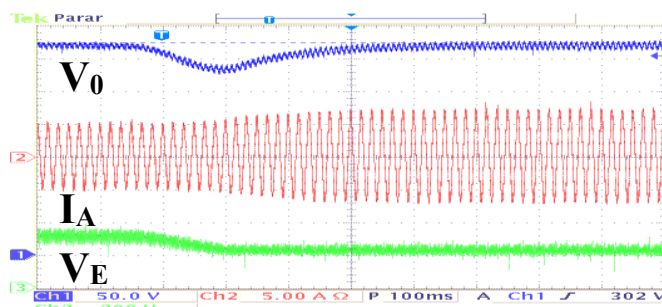


Fig. 17. Tensão na carga, corrente na entrada e tensão no indutor SEPIC - Afundamento da tensão de entrada com compensação.

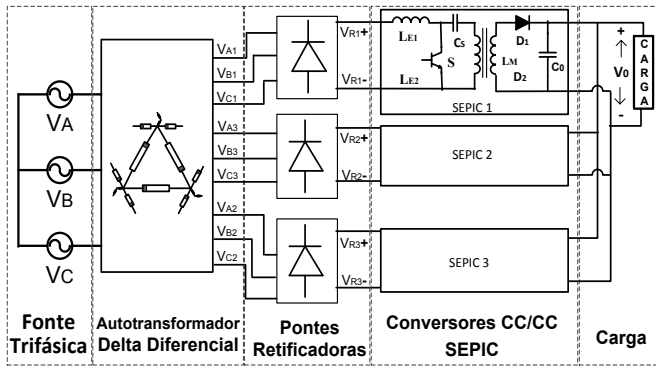


Fig. 18. Retificador de 18 pulsos com conversores CC-CC SEPIC isolados.

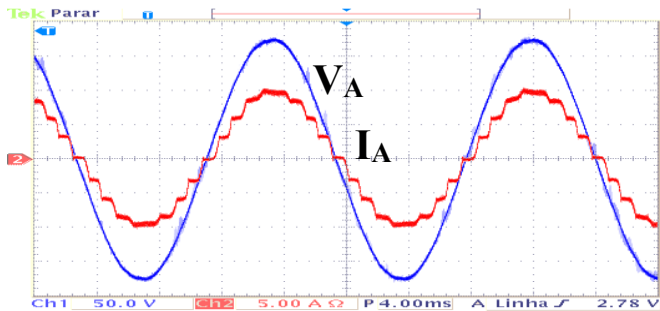


Fig. 19. Tensão e corrente a plena carga - fase A.

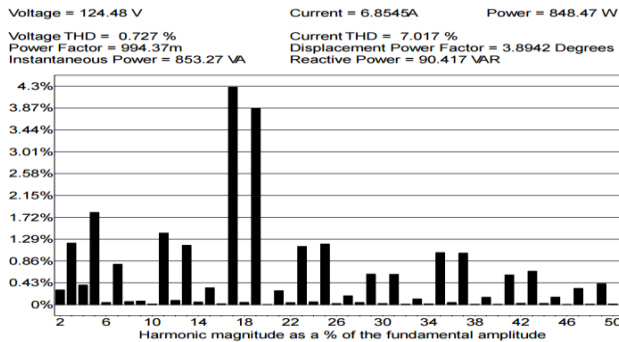


Fig. 20. Espectro da corrente a plena carga - fase A.

As correntes nas demais fases apresentam resultados semelhantes, um resumo com os dados coletados é apresentado na Tabela IV.

A potência processada pelas três fases totaliza 2497 W e a potência consumida na carga é de 2298 W, assim o rendimento do conversor a plena carga é de 0,907, pouco abaixo do rendimento do conversor não isolado.

A tensão na saída apresenta uma pequena redução no valor médio da saída, que foi de 306 V, conforme a Figura 21. Este valor pode ser compensado por um aumento de menos de 1% na razão cíclica (D), ou no número de voltas do enrolamento secundário do indutor acoplado.

TABELA IV

**Resultados do Ensaio do Conversor a Plena Carga**

	Tensão V	Corrente A	Potência W	DHTi %	FP
Fase A	124,5	6,85	848,5	7,0	0,994
Fase B	125,9	6,58	820,3	7,3	0,989
Fase C	124,6	6,58	828,8	7,1	0,989
Carga	306,0	7,41	2298,1	-	-

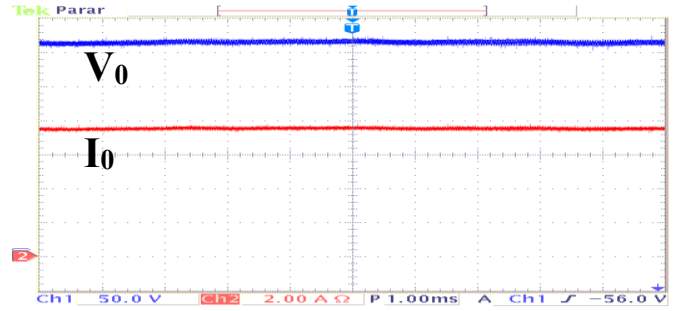


Fig. 21. Tensão e corrente na carga.

Essa redução na tensão de saída também é um indicativo da redução no rendimento do conversor.

A principal mudança observada no circuito são os esforços de tensão sobre as chaves. Devido às características construtivas, o indutor apresenta um coeficiente de acoplamento não ideal, que se apresenta na forma de uma indutância de dispersão. A energia armazenada nessa indutância durante o período de condução (chave fechada) tende a ser dissipada em um transitório durante a abertura da chave, resultando em um elevado esforço de tensão, que pode ser visto na Figura 22.

Os valores de pico da tensão durante o transitório podem superar o valor nominal da chave resultando em queima do componente.

Para evitar o problema foi adicionado um circuito de proteção do tipo *Snubber* RCD no IGBT e um *Snubber* RC no diodo.

Os picos de tensão foram reduzidos, preservando as chaves, mas houve prejuízo para o rendimento do circuito, como já observado. Uma forma de reduzir as perdas e melhorar o rendimento é a adoção de técnicas não dissipativas, como circuitos ressonantes [15], que poderão ser realizados em trabalhos futuros.

**VIII. CONVERSOR MULTIPULSO COM SEPIC ISOLADO E SECUNDÁRIOS EM SÉRIE**

Outra forma de conexão das saídas dos conversores SEPIC é com saídas conectadas em série, conforme a Figura 23.

Essa alternativa só é possível com o conversor SEPIC isolado. Esta solução foi proposta pela primeira vez para conversores *Full Bridge* [5].

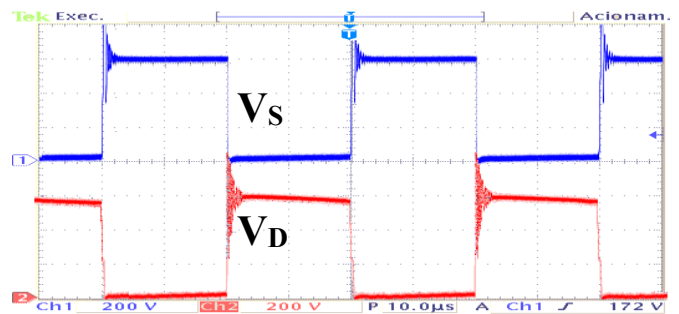


Fig. 22. Tensão sobre o IGBT e sobre o diodo - SEPIC isolado.

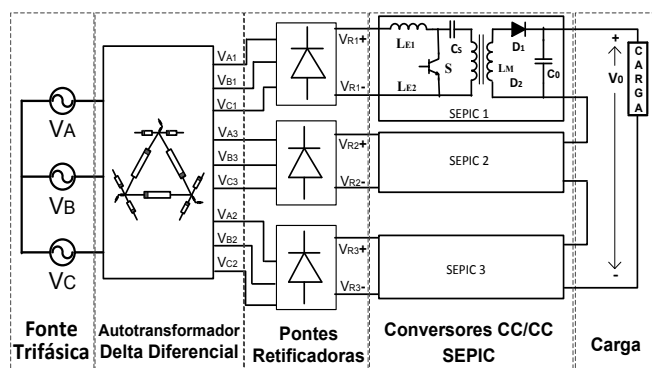


Fig. 23. Retificador de 18 pulsos com conversores CC-CC SEPIC isolados e saídas conectadas em Série.

Na conexão série, a tensão de saída de cada estágio SEPIC é 1/3 da tensão desejada na carga. Já a corrente em cada enrolamento secundário é a mesma da carga, com isto obtém-se o equilíbrio natural de correntes de saída dos três conversores reduzindo a DHTi e melhorando o FP sem a necessidade de técnicas de controle de corrente e elementos adicionais no circuito, o que torna o controle do sistema mais simples, robusto e de menor custo.

Como o conversor triplica a tensão de saída, pode ser uma opção para aplicações que requerem elevada tensão na carga, mantendo reduzidos os esforços de tensão sobre as chaves.

Esta técnica será melhor explorada em trabalhos futuros.

## IX. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A Tabela V mostra um comparativo com as principais características e resultados obtidos para os conversores tratados neste trabalho.

O conversor de 18 pulsos tradicional, com a conexão das saídas realizada por IPTs apresenta bons resultados de DHTi e FP, porém, por utilizar apenas técnicas passivas, não garante equilíbrio nas correntes nas três saídas trifásicas. A tensão de saída não pode ser regulada, é definida no projeto do autotransformador e está sujeita a distúrbios na tensão de entrada. Este conversor não pode ser em aplicação que requerem isolamento.

O uso dos conversores CC/CC agrega vantagens às estruturas, a regulação de tensão de saída e o equilíbrio das correntes nas três saídas trifásicas do autotransformador, o que melhora a DHTi e evita problemas de sobrecarga em uma das saídas.

O isolamento é outra característica possível em alguns dos conversores como *Full Bridge* e SEPIC. É realizado em alta frequência, o que agrega pouco peso e volume ao conversor. Deve-se salientar que os conversores CC/CC aumentam a complexidade do circuito, visto pelo número de chaves ativas, componentes passivos e circuitos de controle e proteção adicionais, o que também contribui para reduzir o rendimento do conjunto.

## X. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas propostas de utilização do conversor SEPIC com o estágio CC-CC de um conversor de 18 pulsos e os resultados obtidos de ensaios realizados nas topologias estudadas.

Entre as vantagens observadas na utilização do conversor SEPIC estão redução de peso e volume, quando comparado com os IPTs, equilíbrio das correntes nas três saídas do retificador de 18 pulsos, isolamento em alta frequência e regulação da tensão de saída para valores iguais, maiores ou menores que a tensão de entrada, pelo fato do conversor SEPIC ser um abaixador ou elevador de tensão.

Para validar os estudos realizados neste trabalho foi construído um protótipo com potência de 2,4 kW e tensão média na carga de 310 V. Através dos ensaios observou-se que o conversor atendeu às expectativas apresentando baixa DHTi, em torno de 7,3% e elevado FP, cerca de 0,99. Com rendimento superior a 92%, mesmo com cargas reduzidas as principais características foram mantidas. Os ensaios dinâmicos demonstraram que o conversor SEPIC agrega vantagens que os retificadores multipulsos não contavam, especialmente a regulação de tensão de saída e equilíbrio das correntes nas saídas.

A utilização do conversor SEPIC isolado agrega vantagem adicional, o isolamento em alta frequência, que possibilita a utilização dos conversores não isolados em aplicações que requerem isolamento galvânico como sistemas de telecomunicações, aplicações médicas e outras.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) e à Universidade Estadual Paulista (UNESP) que proporcionaram recursos e toda a estrutura que possibilitaram a realização deste trabalho.

**TABELA V**  
**Resultados Comparativos dos Conversores**

	Regulação de tensão de saída	Isolamento em alta frequência	Equilíbrio das correntes	Número de chaves.(S / D)	Rendimento a plena carga	DHTi %	FP
Conversor 18-pulsos - IPTs [4]	NÃO	NÃO	NÃO	0 / 0	0,97	11,1	0,986
Conversor 18-pulsos - <i>Boost</i> [7]	SIM	NÃO	SIM	3 / 6	0,94	8,8	0,99
Conversor 18-pulsos - <i>Full Bridge</i> [6]	SIM	SIM	SIM	12 / 12	0,9	8,4	0,994
Conversor 18-pulsos - SEPIC não isolado	SIM	NÃO	SIM	3 / 6	0,92	8,4	0,994
Conversor 18-pulsos - SEPIC isolado	SIM	SIM	SIM	3 / 3	0,9	7,2	0,994



## REFERÊNCIAS

- [1] D. A. Paice, *Power Electronic Converter Harmonics: Multipulse Methods for Clean Power*, IEEE Press, Nova Iorque, 1996.
- [2] B. Singh, S. Gairola, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, "Multipulse AC-DC converters for improving power quality: A review". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, nº 1, pp 260-281, Janeiro 2008.
- [3] T. Yang, S. Bozhko, G. Asher, "Functional Modelling of Symmetrical Multi-pulse Auto-Transformer Rectifier Units for Aerospace Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, nº 9, pp 4704-4713, Setembro 2015.
- [4] P. S. Oliveira, F. J. M. Seixas, L. S. C. Silva, "A New Design Methodology for Multipulse Rectifiers with Delta Auto-Connected Transformers and a Retrofit Application in Adjustable Speed Drives (ASDs)", in *10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON*, pp 1-8, 2012.
- [5] F. J. M. Seixas, I. Barbi "Retificador Trifásico Isolado em Alta Frequência e com Baixa Distorção de Corrente na Rede", *Eletrônica de Potência –SOBRAEP*, vol. 7, nº 1, pp. 22-29, Novembro 2002.
- [6] S. Choi, "A Three-Phase Unity-Power-Factor Diode Rectifier With Active Input Current Shaping", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, nº 6, pp 1711-1714, Dezembro 2005.
- [7] F. J. M. Seixas, I. Barbi "A new 12 kW three-phase impulse high power factor AC-DC converter with regulated output voltage for rectifier units", in *21st International Telecommunication Energy Conference - INTELEC '99*, pp 1-8, 1999.
- [8] R. C. Fernandes, F. J. M. de Seixas, "Proposta de Conversor CA-CC Trifásico de Múltiplos Pulsos com Estágio Elevador de Tensão Controlado em Corrente por Histerese Constante", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 17, nº 2, pp. 538-545, Maio 2012.
- [9] D. C. Martins, A. H. Oliveira, I. Barbi, "Retificador Trifásico Isolado com Correção do Fator de Potência Empregando o Conversor CC-CC SEPIC em Condução Contínua", *Eletrônica de Potência –SOBRAEP*, vol. 6, nº 1, pp. 8-15, Dezembro 2001.
- [10] S. Ounie, A. Mohammadpour, A. Nejadpak, M. R. Zolghadri, "Design and Analysis of Three-Phase Variable Hysteresis Controlled Single Stage SEPIC Based Rectifier", in *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems - EPECS '09*, pp 1-5, 2009.
- [11] J. O. Soares, C. A. Canesin, L. C. Freitas, F. A. S. Gonçalves, "Retificador Trifásico Híbrido Operando com Controle Digital e Modulação por Histerese", *Eletrônica de Potência –SOBRAEP*, vol. 13, nº 4, pp. 241-249, Novembro 2008.
- [12] R. Gules, W. M. Santos, F. A. Reis, E. F. R. Romaneli, A. Badin, "A Modified SEPIC Converter With High Static Gain For Renewable Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, nº 11, pp. 5860-5871, Novembro 2014.
- [13] I. Burgardt, E. Agostini Jr, C. H. I. Font, C. B. Nascimento, "A Flicker-free Power Leds Driver Based On The Non-isolated SEPIC Rectifier Using A Regenerative Snubber", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 20, nº 1, pp 31-39, Fevereiro 2015.
- [14] I. Barbi, D. C. Martins, *Conversores CC-CC Básicos Não-Isolados*, 2ª edição, Edição dos Autores, Florianópolis, 2006.
- [15] V. A. Bonfa, P. J. M. Menegh, J. L. F. Vieira, D. S. L. Simonetti, "Multiple Alternatives of Regenerative Snubber Applied to SEPIC and CUK Converters". in *28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, pp 123-128, 2002.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Angelo César de Lourenço** nasceu em Maringá, Brasil, em 1976. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, UFMS, Campo Grande, em 1998, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista, UNESP em 2001, onde ele está atualmente em curso para obter o grau de Doutorado.

Atualmente é Professor do Instituto Federal de Mato Grosso do Sul, IFMS, Campo Grande. Suas áreas de interesse de pesquisa incluem acionamentos de máquinas elétricas, correção do fator de potência e conversores multipulsos.

**Falcondes José Mendes de Seixas** nasceu em Jales, São Paulo, Brasil, em 1965. Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins em 1988, e os graus de Mestre e Doutor em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, em 1993 e 2001, respectivamente.

Atualmente é Professor Assistente no Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Ilha Solteira. Seus interesses de pesquisa incluem correção do fator de potência, fontes chaveadas, e conversores multipulsos.

**João Carlos Pelicer Júnior** nasceu na cidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, em 1989. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, em 2012, onde também obteve o grau de Mestre em 2014.

Atualmente é Professor do Instituto Federal de São Paulo, IFSP, Sorocaba, e estudante de doutorado da Universidade Estadual Paulista, UNESP. Suas áreas de interesse de pesquisa incluem os temas correção de fator de potência, fontes chaveadas, qualidade da energia e conversores multipulsos.

**Priscila da Silva Oliveira** nasceu em Fernandópolis, São Paulo, Brasil. Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista, UNESP, em 2007, onde também obteve o grau de doutora em 2011 e desenvolveu um trabalho de pós doutorado entre 2011 e 2013.

Atualmente é Professora do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Tocantins em Palmas. Seus interesses de pesquisa incluem eletrônica de potência e qualidade de energia elétrica.