

# CONVERSOR BOOST ACOPLADO À SAÍDA DE UM RETIFICADOR TRIFÁSICO DE 18kW UTILIZANDO O TRANSFORMADOR DE INTERFASE DE LINHA

Anis Chehab  
e-mail: anischehab@matrix.com.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
INEP  
88.040-970 FLORIANÓPOLIS - SC  
Brasil

Jair Urbanetz Junior  
e-mail: jairjr@cefetpr.br  
CEFET  
Depto de Eletrotécnica  
80.230-901 Curitiba – PR  
Brasil

Ivo Barbi  
e-mail: ivobarbi@inep.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina  
INEP  
88.040-970 FLORIANÓPOLIS - SC  
Brasil

**Resumo** - Este artigo trata do estudo de um retificador de 18kW com elevado fator de potência. O retificador utiliza o transformador de interfase de linha (LIT) para obter alto fator de potência e um conversor Boost para regular a tensão de saída. São apresentadas as principais equações para o dimensionamento do LIT e do conversor Boost, assim como resultados experimentais obtidos de um protótipo implementado em laboratório. Por fim apresentam-se as conclusões relativas ao trabalho realizado.

**Palavras-Chave**– Retificador Trifásico, Transformador de Interfase de Linha, Conversor Boost.

## BOOST CONVERTER ASSOCIATED IN THE OUTPUT OF A THREE-PHASE 18kW RECTIFIER USING A LIT

**Abstract** – This paper deals with the study of an 18kW high power factor rectifier. The rectifier uses the line interphase transformer (LIT) to obtain a high power factor and a Boost converter to regulate the output voltage. It is presented the main LIT and Boost converter design equations and the experimental results obtained from a laboratory prototype. Conclusions about the research are also presented.

**Keywords** - Three-phase Rectifier, LIT, Boost Converter.

### I. INTRODUÇÃO

Os conversores CA-CC convencionais, que utilizam uma ponte retificadora e um filtro capacitivo de elevado valor na saída, são largamente empregados como estágio de entrada de equipamentos eletrônicos. Este estágio drena da rede elétrica uma corrente não linear, com elevado conteúdo harmônico, contribuindo para a redução do fator de potência do equipamento.

Os sistemas eletrônicos de maior potência geralmente utilizam retificação trifásica para a conversão CA-CC. Portanto, torna-se relevante o estudo de técnicas que melhorem o desempenho de conversores trifásicos quanto ao fator de potência.

---

Artigo Submetido em 30/07/2002. Primeira Revisão em 12/09/2002. Segunda Revisão em 11/10/2003. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Carlos Alberto Canesin.

Em [1] Clemens Niermann utiliza-se das características dos sistemas de retificação trifásica de múltiplos pulsos para desenvolver uma solução passiva de relativo baixo volume e excelentes características para correção do fator de potência, como exemplo o transformador de interfase de linha (LIT). Esta solução tem o inconveniente de não proporcionar regulação na tensão de saída do retificador. Outras soluções podem ser encontradas em [2] a [5].

Neste artigo apresenta-se o estudo desenvolvido durante o projeto de um retificador trifásico de 18kW com alto fator de potência. São apresentadas as principais equações para o dimensionamento do LIT e do conversor Boost (acoplado à saída do retificador para regular a tensão no barramento CC), assim como resultados experimentais obtidos de um protótipo implementado em laboratório. Finalmente apresentam-se as conclusões relativas ao trabalho realizado.

### A. Vantagens e Desvantagens entre Técnicas Passivas e Ativas para Correção do Fator de Potência

Vantagens das técnicas ativas:

- Fator de potência praticamente unitário;
- Boa regulação da tensão de saída;
- Pequeno volume e peso.

Desvantagens das técnicas ativas:

- Elevado número de componentes;
- Menor confiabilidade;
- Maior custo.

Vantagens das técnicas passivas:

- Maior robustez;
- Maior confiabilidade;
- Menor número de componentes;

Desvantagens das técnicas passivas:

- Maior volume e peso;
- Não possui regulação da tensão de saída.

O retificador apresentado reúne características das técnicas passiva e ativa (devido à união do LIT com o conversor Boost), para obter um circuito robusto, com alto fator de potência e boa regulação da tensão de saída.

### II. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O LIT

O transformador LIT, do inglês *line-side interphase transformer*, é um tipo de conexão trifásica que divide a corrente de cada fase em duas componentes deslocadas entre si, uma adiantada e outra atrasada de um determinado ângulo ( $\varphi$ ) em relação à corrente de fase.

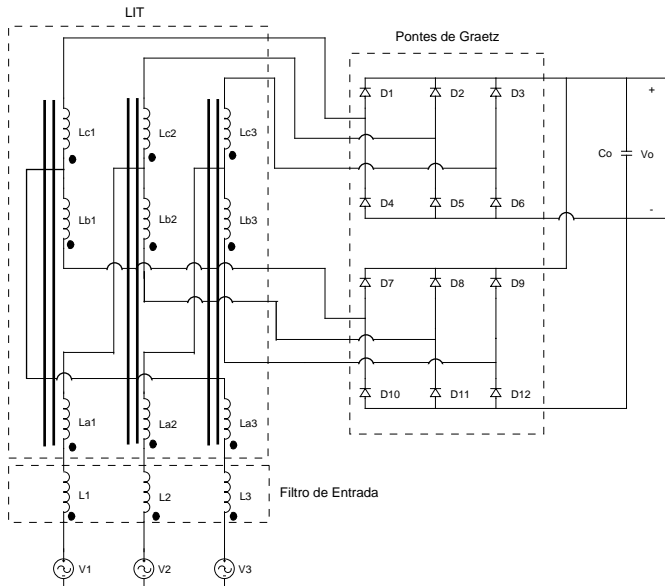


Figura 1 – Retificador de 12 pulsos empregando o LIT.

Este deslocamento é definido pelas relações de espiras entre os enrolamentos  $La_i$ ,  $Lb_i$  e  $Lc_i$  pertencentes a um mesmo transformador monofásico, onde  $i=1,2,3$  (figura 1). Desta forma, é possível obter-se dois sistemas trifásicos a partir de um. Tendo-se dois sistemas trifásicos, utilizam-se duas pontes retificadoras trifásicas (pontes de Graetz) para a obtenção de um sistema conhecido como retificador de doze pulsos. Desta forma, os componentes harmônicos mais significativos presentes na corrente de entrada são da ordem  $12n \pm 1$ , para  $n$  inteiro.

A figura 1 apresenta o circuito retificador de doze pulsos utilizando o transformador LIT com indutor de filtro na entrada, cuja finalidade é tornar a corrente de entrada com uma envoltória senoidal.

O LIT é constituído de três núcleos monofásicos com três enrolamentos cada, totalizando nove enrolamentos adequadamente interligados.

#### A. Estudo analítico

Algumas das equações descritas a seguir foram deduzidas nas demais referências bibliográficas, porém outras foram frutos deste trabalho. As principais equações para o projeto do LIT são apresentadas abaixo:

##### 1) Relação de espiras:

- $N_1$  é relação de espiras entre os enrolamentos  $Lb_i$  e  $La_i$ :

$$N_1 = \frac{\sqrt{3} - \operatorname{tg}(\varphi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \quad (1)$$

- $N_2$  é relação de espiras entre os enrolamentos  $Lc_i$  e  $La_i$ :

$$N_2 = \frac{\sqrt{3} + \operatorname{tg}(\varphi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\varphi)} \quad (2)$$

Para o conversor de doze pulsos,  $\varphi = 15^\circ$ , logo:

$$N_1 = 2,732 \text{ e } N_2 = 3,732$$

##### 2) Corrente eficaz nos enrolamentos:

- Corrente eficaz no enrolamento  $La_i$ :

$$I_{La_i} = \frac{P_o}{3 \cdot V_i} \quad (3)$$

- Corrente eficaz nos enrolamentos  $Lb_i$  e  $Lc_i$ :

$$I_{Lb_i} = I_{Lc_i} = \frac{0,3 \cdot P_o}{V_i \cdot \sqrt{3}} \quad (4)$$

##### 3) Tensão média na saída dos retificadores:

$$V_o = 2,12 \cdot V_i \quad (5)$$

##### 4) Tensão eficaz nos enrolamentos:

- Tensão eficaz no enrolamento  $La_i$ :

$$V_{La_i} = 0,063 \cdot V_o \quad (6)$$

- Tensão eficaz no enrolamento  $Lb_i$ :

$$V_{Lb_i} = 0,173 \cdot V_o \quad (7)$$

- Tensão eficaz no enrolamento  $Lc_i$ :

$$V_{Lc_i} = 0,236 \cdot V_o \quad (8)$$

##### 5) Potência nominal de cada transformador monofásico do LIT:

$$P_{LIT} = 0,1494 \cdot P_o \quad (9)$$

##### 6) Indutância de cada enrolamento do LIT e do filtro de entrada:

- Indutância do enrolamento  $La_i$ :

$$La_i = \frac{324,63 \cdot 10^{-6} \cdot V_o}{I_{La_i}} \quad (10)$$

- Indutância do enrolamento  $Lb_i$ :

$$Lb_i = \frac{2,423 \cdot 10^{-3} \cdot V_o}{I_{La_i}} \quad (11)$$

- Indutância do enrolamento  $Lc_i$ :

$$Lc_i = \frac{4,521 \cdot 10^{-3} \cdot V_o}{I_{La_i}} \quad (12)$$

- Indutância do filtro de entrada  $L_i$ :

$$L_i = \frac{2,39 \cdot 10^{-2} \cdot V_i}{f_{rede} \cdot I_{La_i}} \quad (13)$$

As equações apresentadas nesta seção permitem a realização da simulação e do projeto do transformador de interfase de linha.

### III. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O CONVERSOR BOOST

Como pode ser observado na equação (5), o LIT não regula a tensão de saída frente a variações de carga ou flutuações na tensão da rede elétrica. Uma forma de solucionar este inconveniente é inserir um conversor CC-CC entre a saída das pontes de Graetz e o capacitor de filtro  $C_o$ .

Quando é possível ter uma tensão de saída regulada ( $V_{ob}$ ) maior do que a disponibilizada pelo LIT ( $V_o$ ), o conversor Boost operando em condução contínua é uma excelente opção; já que, pela sua própria natureza, aproveita as indutâncias do LIT e do filtro de entrada para fazerem o papel do indutor Boost.

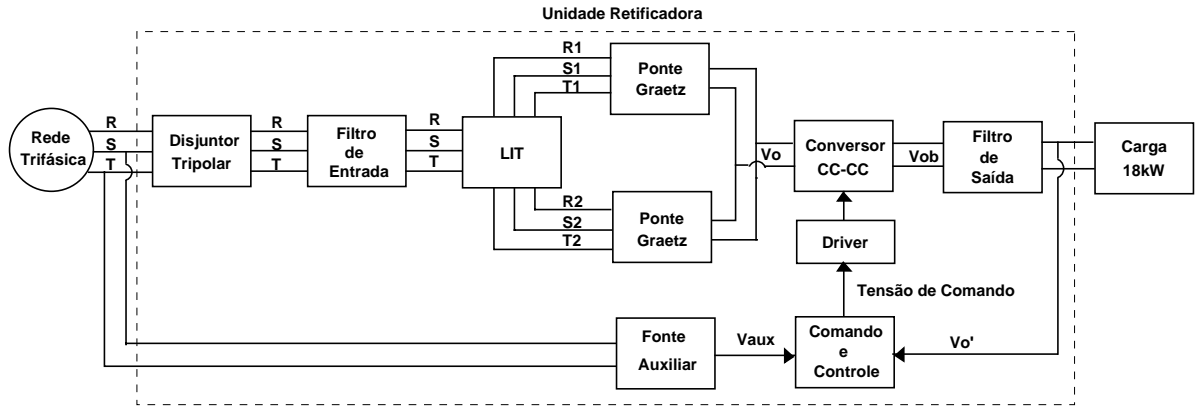


Figura 3 – Diagrama em blocos do retificador implementado em laboratório.

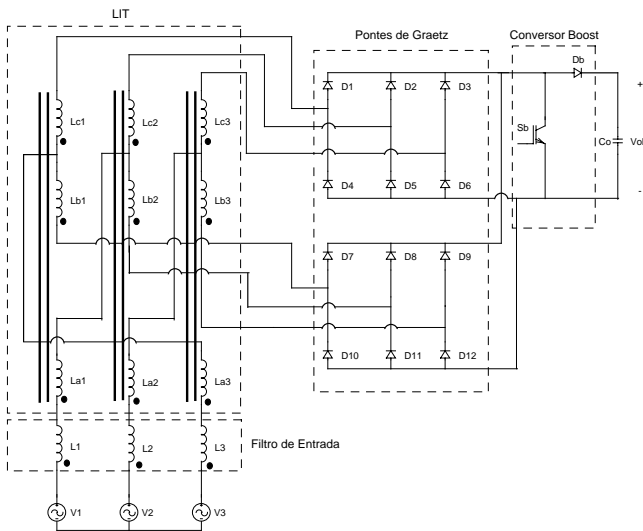


Figura 2 – Uso do conversor Boost para regular a tensão de saída do LIT.

Isto reduz o custo do equipamento e torna o projeto mais simples, já que não há a necessidade de um indutor em alta frequência que processe toda a potência de carga. Um esboço desta solução é apresentado na figura 2.

#### A. Estudo analítico

As principais equações para o projeto do conversor Boost e do filtro de saída são apresentadas a seguir:

##### 1) Razão cíclica nominal:

$$D = 1 - \frac{V_o}{V_{ob}} \quad (14)$$

##### 2) Corrente média no diodo Boost:

$$I_{Db_{\text{medio}}} = I_{ob} = \frac{P_o}{V_{ob}} \quad (15)$$

##### 3) Corrente de pico no diodo Boost:

$$I_{Db_{\text{pico}}} = \frac{I_{Db_{\text{medio}}}}{(1-D)} \quad (16)$$

##### 4) Corrente eficaz no diodo Boost:

$$I_{Db_{\text{eficaz}}} = \sqrt{1-D} \cdot I_{Db_{\text{pico}}} \quad (17)$$

##### 5) Corrente média no interruptor Boost:

$$I_{Sb_{\text{medio}}} = D \cdot I_{Sb_{\text{pico}}} \quad (18)$$

##### 6) Corrente de pico no interruptor Boost:

$$I_{Sb_{\text{pico}}} = I_{Db_{\text{pico}}} \quad (19)$$

##### 7) Tensão máxima sobre o diodo e o interruptor Boost:

$$V_{Db_{\text{max}}} = V_{Sb_{\text{max}}} = V_{ob} \quad (20)$$

##### 8) Corrente eficaz no capacitor de saída:

$$I_{Co_{\text{eficaz}}} = I_{ob} \cdot \sqrt{D+D^2} \cdot (1-D) \quad (21)$$

##### 9) Tensão máxima no capacitor de saída:

$$V_{Co_{\text{max}}} = V_{ob} \quad (22)$$

As equações apresentadas nesta seção permitem a realização da simulação e do projeto do LIT juntamente com o conversor Boost.

## IV. DIAGRAMA DE BLOCOS DO RETIFICADOR DE 18KW

Um diagrama de blocos completo do retificador estudado e implementado em laboratório é apresentado na figura 3.

Para melhor compreensão do sistema, o bloco de comando e controle é composto por um circuito integrado (CI) UC3525, o qual tem a finalidade de gerar o sinal de comando para o interruptor, de forma a possibilitar o controle da energia entregue à carga e manter a tensão do barramento regulada. O controle é realizado no modo tensão e o compensador empregado é do tipo proporcional integral. O sinal de comando gerado pelo CI é enviado ao interruptor através de um driver que tem por finalidade isolar o pulso de comando e proporcionar proteção contra corrente de curto-circuito no interruptor.



Figura 4 – Filtro de entrada, LIT e Pontes de Graetz.



Figura 5 – Conversor, circuito de controle e driver.

No bloco do conversor CC-CC, além do conversor *Boost*, também se encontra um circuito de limitação de corrente durante a pré-carga dos capacitores de saída (formado por um contator e um resistor em paralelo), que evita a destruição dos semicondutores devido aos elevados picos de corrente durante a energização do retificador.

A fonte auxiliar é do tipo linear.

## V. ESPECIFICAÇÃO DE PROJETO E FOTOS DO PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

As especificações de projeto são apresentadas a seguir:

$V_1 = 127V \pm 20\%$  → Tensão de fase da rede

$V_{ob} = 350V$  → Tensão regulada de saída

$P_o = 18kW$  → Potência de saída

$f_{rede} = 60Hz$  → Frequência da rede

$f_c = 20kHz$  → Frequência de comutação

Nas figuras 4 e 5 são apresentadas as fotos do LIT e do conversor *Boost*, respectivamente:

## VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados os resultados experimentais obtidos em laboratório para uma potência de 18kW.

Nas figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11 são apresentadas as formas de onda da tensão e corrente em cada fase de entrada, assim como a análise harmônica das formas de onda de corrente.

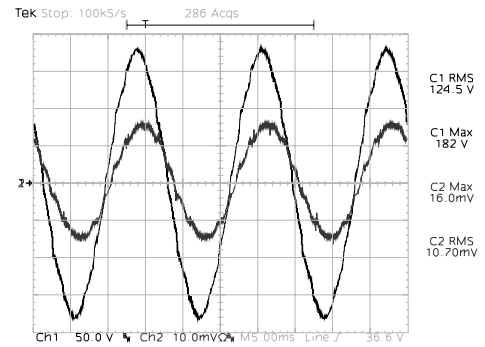


Figura 6 – Tensão e corrente na fase 1 (50V/div, 50A/div e 5ms/div).

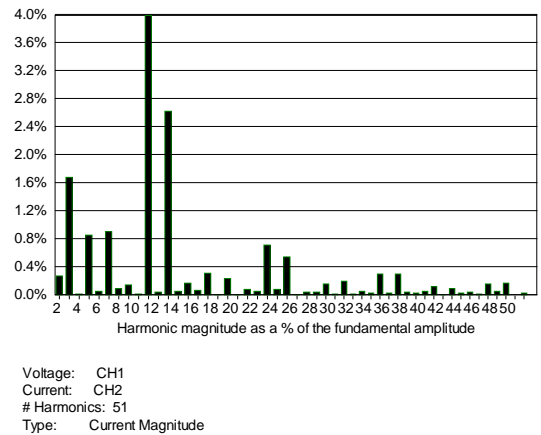


Figura 7 – Análise harmônica da corrente na fase 1.

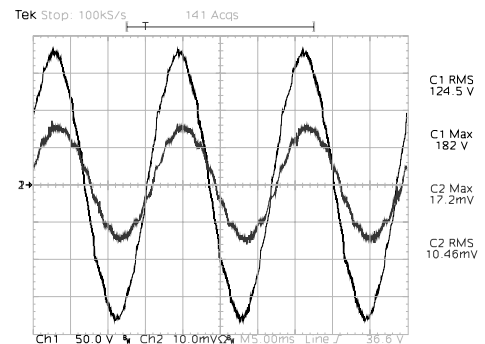


Figura 8 – Tensão e corrente na fase 2 (50V/div, 50A/div e 5ms/div).

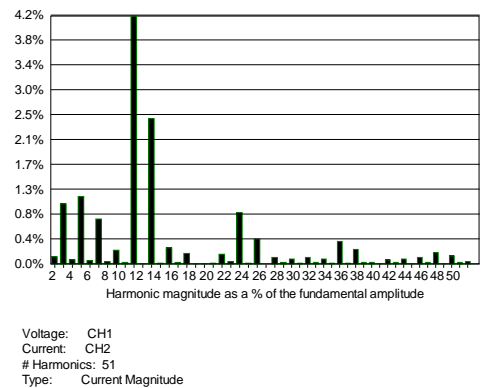


Figura 9 – Análise harmônica da corrente na fase 2.

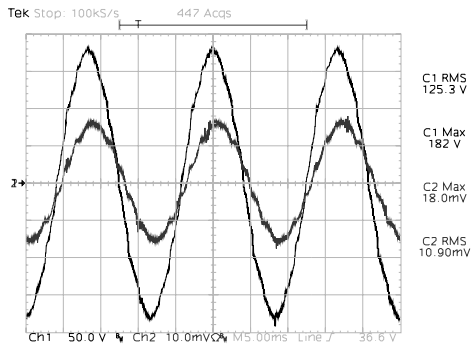


Figura 10 – Tensão e corrente na fase 3 (50V/div, 50A/div e 5ms/div).

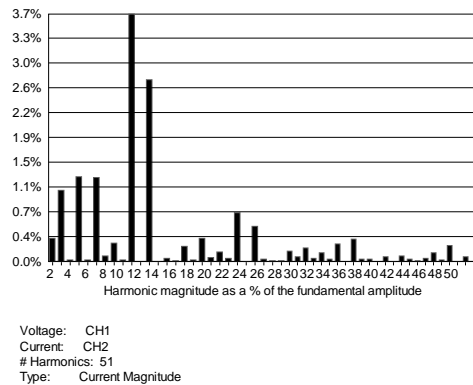


Figura 11 – Análise harmônica da corrente na fase 3.

Através de software, obteve-se as seguintes informações a partir das figuras apresentadas anteriormente:

$$\begin{aligned} TDH_1 &= 5,36\%, \quad FP_1 = 0,958 \text{ e } \theta_1 = 15,60 \\ TDH_2 &= 5,39\%, \quad FP_2 = 0,969 \text{ e } \theta_2 = 13,60 \\ TDH_3 &= 5,25\%, \quad FP_3 = 0,964 \text{ e } \theta_3 = 14,20 \end{aligned}$$

Pode-se verificar que a forma de onda da corrente apresenta baixo conteúdo harmônico, estando bem próxima a uma senóide. A presença dos indutores de filtro ocasiona um defasamento ( $\theta_i$ ) entre as componentes fundamentais da corrente e tensão de cada fase, contribuindo para a redução do fator de potência. Aqui se pode destacar um compromisso existente na fase de projeto: quanto maior o valor dos indutores de filtro, menor é o valor de TDH das correntes de fase, porém menor é o FP devido ao aumento do deslocamento entre a tensão e a corrente.

Nas figuras 12 e 13 apresentam-se os esforços de tensão no interruptor e no diodo *Boost*, respectivamente.

Pode-se verificar que a tensão em ambos os semicondutores é bem comportada, não havendo sobretensões, mesmo para o elevado nível de potência processada com comutação dissipativa. O grande segredo está nas placas paralelas utilizadas para conectar o conversor aos capacitores de saída, já que estas formam capacitores que eliminam o efeito das indutâncias parasitas presentes no circuito de potência do conversor. Na prática foram utilizados 2 capacitores em paralelo para compor o filtro de saída.

Na figura 14 apresentam-se a tensão e a corrente na carga.

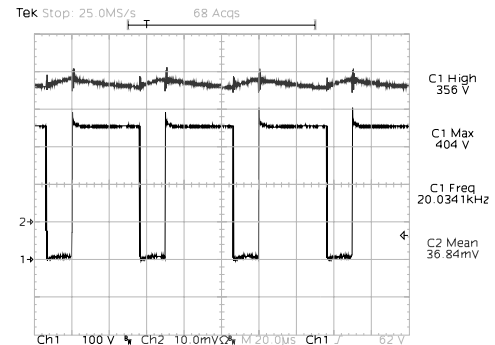


Figura 12 – Tensão no interruptor *Boost* e corrente na entrada do conversor (100V/div, 20A/div e 20µs/div).

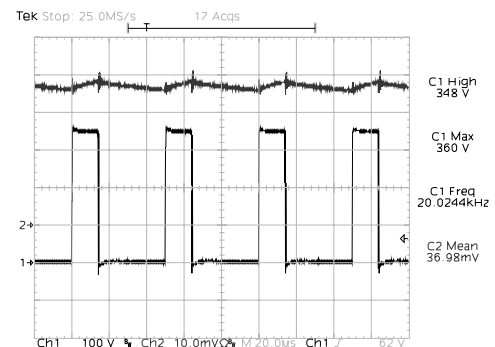


Figura 13 - Tensão no diodo *Boost* e corrente na entrada do conversor (100V/div, 20A/div e 20µs/div)

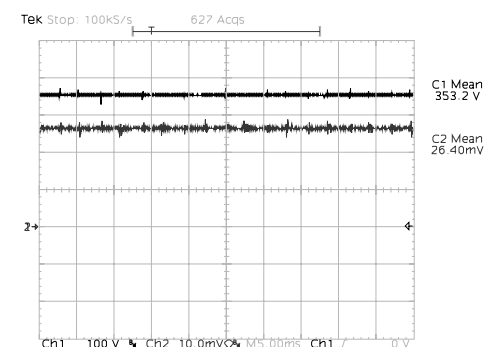


Figura 14 – Tensão e corrente na carga (100V/div. e 20A/div.).

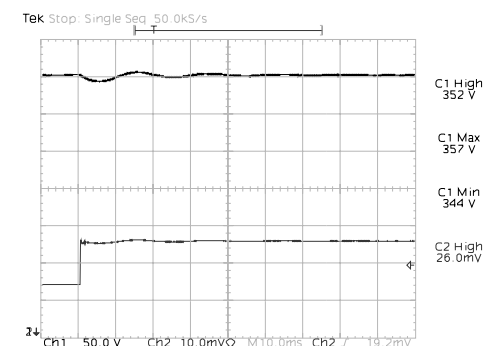


Figura 15 – Tensão e corrente na carga durante transitório de 50% a 100% da carga (50V/div, 20A/div e 10ms/div).

Por último, na figura 15 é apresentado o comportamento da tensão de saída frente a um degrau de carga, de 50% a 100% da carga nominal. Pode-se verificar que a malha de

tensão respondeu de forma adequada e não houve presença de *overshoots*. A regulação dinâmica ficou em torno de 2,3%, o que representa uma excelente resposta já que a carga do retificador, na prática, será um inversor (Aplicação na área de UPS – *Uninterruptable Power Supply*), o qual é projetado para operar em malha fechada de tensão.

O rendimento atingido foi em torno de 95,2% a plena carga.

## VII. CONCLUSÕES

O conversor CA-CC, utilizando o transformador LIT, é uma estrutura não isolada, com peso e volume relativamente baixos, visto que a potência processada em cada núcleo monofásica do LIT é próxima de 15% da potência total da carga.

Como o conversor opera com doze pulsos, a estrutura apresenta baixo conteúdo harmônico. O componente harmônico de maior amplitude é o 11<sup>o</sup>, e apenas harmônicos de ordem  $12n \pm 1$ , para  $n$  inteiro, estarão presentes de forma significativa na corrente de entrada.

A colocação de indutores de filtro na entrada do retificador reduz a taxa de distorção harmônica total. Porém se for utilizado um valor muito elevado para estes indutores, haverá um atraso da corrente em relação à tensão, o que representa um aumento no ângulo de deslocamento, desta forma reduzindo o fator de potência. O emprego de capacitores no lado CA do retificador poderia solucionar este problema, porém acredita-se que não seja necessário, já que o FP do retificador é bastante elevado mesmo com este deslocamento.

O conversor *Boost* e o LIT, associados, operam de forma satisfatória.

Durante os experimentos obteve-se fator de potência bastante elevado em cada fase, assim como reduzidas taxas de distorção harmônica.

O conversor apresentou uma excelente regulação de saída e um elevado rendimento, em torno de 95,2%.

O sistema completo mostrou-se bastante eficaz quando se deseja um retificador com elevado fator de potência, simples e robusto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Niermann, C. “*New rectifier circuits with low mains pollution and additional low cost inverter for energy recovery*”. EPE. 1989. P. 1131-1136.
- [2] Barbi, I. et al. “*Emprego de transformadores e autotransformadores para a diminuição do conteúdo harmônico gerado por conversores estáticos de potência*”. Florianópolis, 1998. Publicação interna – INEP – UFSC.
- [3] Aragão, W. C. P. “*Fonte de alimentação trifásica de alto fator de potência e estágio único, utilizando transformador de interfase de linha e conversor CC-CC, isolado e de alta frequência*”. Florianópolis, 1998. Tese de doutorado em engenharia elétrica – INEP – UFSC.

- [4] Muñoz, C. A. “*Retificação trifásica com alto fator de potência usando uma conexão especial de transformadores para a redução de harmônicas de corrente*”. Florianópolis, 1997. Tese de doutorado em engenharia elétrica – INEP – UFSC.

- [5] Seixas, F. J. M. “*Conversor CA-CC de 12kW com elevado fator de potência e tensão de saída regulada utilizando autotransformador com conexão diferencial de múltiplos pulsos*”. Florianópolis, 1999. Projeto de tese de doutorado em engenharia elétrica – INEP – UFSC.

- [6] Chehab, A. & Barbi, I. “*Proposta de uma unidade retificadora trifásica de 18kW com elevado fator de potência*”. Florianópolis, 2001. Relatório interno – INEP – UFSC.

- [7] Urbanetz, J. Jr. “*Sistema trifásico de 10kW com alto fator de potência e controle de luminosidade, para um grupo de lâmpadas fluorescentes*”. Florianópolis, 2002. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica – INEP – UFSC.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Anis Chehab**, nasceu em Fortaleza-CE em 1977. Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará – UFC, em 1999. No mesmo ano cursou um semestre letivo do curso de Telecomunicações na Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. Em 2002 recebeu o título de Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC na área de Eletrônica de Potência. Desde Março de 2002 trabalha na Microsol Tecnologia Ltda, indústria cearense de nobreaks e estabilizadores, como engenheiro de desenvolvimento.

**Jair Urbanetz Junior**, nasceu em Curitiba-Pr em 1967. Formou-se em Engenharia Industrial Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-Pr, em 1995. Obteve o título de Especialista em Gerência da Engenharia de Manutenção pelo CEFET-Pr em 1999 e o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC na área de Eletrônica de Potência, em 2002. Desde 1996 é professor do CEFET-Pr no Departamento de Eletrotécnica.

**Ivo Barbi**, nasceu em Gaspar-SC em 1949. Formou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1973. Obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1976 e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, França, em 1979. Fundou a Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência e o Instituto de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Santa Catarina. Desde 1992, é Editor Associado na área de Conversores Estáticos de Potência do IEEE Transactions on Industrial Electronics.