

# PROJETO, SIMULAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR CC-CC NÃO ISOLADO BOOST, UMA EXPERIMENTAÇÃO METODOLÓGICA

**Weldon C. E. Teixeira<sup>1</sup> ; Ghunter P. Viajante<sup>2</sup> ; Enes G. Marra<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Av. Universitária, n. 1488 - Quadra 86 - Bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário  
74605-010 – Goiânia – Goiás  
weldoneee@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Av. Universitária, n. 1488 - Quadra 86 - Bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário  
74605-010 – Goiânia – Goiás  
ghunter@ucg.br

<sup>3</sup>Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Av. Universitária, n. 1488 - Quadra 86 - Bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário  
74605-010 – Goiânia – Goiás  
enes@eee.ufg.br

**Resumo:** *Este trabalho apresenta a implementação de um conversor de tensão do tipo boost em malha fechada na forma de plataforma didática e tem como objetivo principal introduzir o ensino de Eletrônica de Potência sobre bases construtivistas em nível de mestrado, Almeida (2003). Assim, os aspectos teóricos e de simulação são tratados visando contribuir na implementação bem sucedida. Além disso, a metodologia proporciona a oportunidade de enfrentar as dificuldades tipicamente encontradas no projeto de fonte chaveada, introduzindo o aluno à vivência experimental. O trabalho não traz contribuições técnicas inovadoras ao campo de estudo visto que seu objetivo principal é oferecer uma atividade de aprendizagem orientada ao projeto, baseada em diretrizes e cronograma de projeto.*

**Palavras-chave:** *construtivismo, eletrônica de potência, simulação, ensino orientado ao projeto.*

## 1. INTRODUÇÃO

É fato que nesta primeira década do século 21, as exigências na formação de engenheiros têm se tornado cada vez maiores. A tese de doutorado de Almeida (2003) mostra que o curso de engenharia, até há pouco tempo, buscava transmitir informações acabadas. As disciplinas experimentais, por exemplo, baseavam-se muitas vezes em experiências repetitivas e burocratizadas, ou seja, os alunos não tinham a liberdade de experimentar segundo suas curiosidades. Além disso, hoje é exigido dos profissionais habilidades criativas bem desenvolvidas, além de conhecimentos sólidos. Neste sentido, Almeida (2003) propõe atividades diferenciadas sob uma base construtivista, buscando formar engenheiros mais críticos e mais habilitados a enfrentar novos desafios.

Do exposto, nota-se que a busca por novas metodologias de ensino é fundamental para atender estas novas exigências de mercado, entretanto, o modelo apresentado não pode ser aplicado diretamente nas disciplinas dos cursos de mestrado.

Geralmente, os cursos de mestrado têm buscado formar professores e iniciar o profissional na metodologia da pesquisa de forma inovadora em uma dada especialidade. No entanto, os alunos de mestrado dedicam maior parte do seu curso aos projetos de dissertações, o que retrata uma formação prioritária como pesquisador no mestrado. Por restrições de tempo, as disciplinas do mestrado têm sido abordadas do mesmo modo tradicional que na graduação, embora o aluno de mestrado já seja um profissional da área. Normalmente, são oferecidas diversas disciplinas que compõem a formação do Mestre, surgindo a possibilidade de inovar na sua metodologia de ensino.

A disciplina de *Eletrônica de Potência* do mestrado na Universidade Federal de Goiás (UFG) foi ministrada no ano de 2007 segundo a metodologia construtivista da aprendizagem orientada ao projeto, DONOSO-GARCIA et al. (2008), sendo que um dos produtos é este presente trabalho.

## 2. METODOLOGIA

A metodologia de trabalho consistiu na implementação de conversores de tensão CC-CC como atividade de vivência experimental. O trabalho implementado não substituiu as aulas previstas na ementa da disciplina de *Eletrônica de Potência*. Na verdade a viabilidade da execução do projeto só foi conseguida depois da exposição da teoria em sala de aula, mas, sendo consolidada com a execução de um projeto experimental que tenha relação teórica direta com o tema.

A duração da disciplina é de 6 meses, então, no último mês foi proposto o projeto a ser executado pelos mestrandos. Foram divididos em grupos de dois alunos e cada grupo tinha o objetivo de implementar um dos conversores CC, quais sejam: *buck*, *boost*, e *buck-boost*.

De forma resumida, o projeto do *boost* tinha que atender as seguintes características: tensão de entrada retificada podendo variar de 15 a 25V, tensão de Saída 25V, carga mínima 200mA, carga máxima 2A e frequência de chaveamento de 10kHz.

Como os trabalhos ficariam disponíveis para os alunos de *Eletrônica de Potência* de graduação, então, o grupo que implementou o conversor *boost* optou por realizar o projeto na forma de plataforma didática.

Além disso, a implementação deveria apresentar:

- Simulação;
- Projetar e construir os indutores;
- Reutilização de componentes eletrônicos sucateados;
- Respeito aos prazos estipulados;
- Produção de um artigo.

A seguir estão apresentados os resultados obtidos pela execução do projeto do conversor *boost* elaborado pelos mestrandos.

## 3. O CONVERSOR BOOST, INTRODUÇÃO

Um conversor *boost* (*step-up* ou conversor elevador de tensão) é uma fonte do tipo SMPS (Switching-Mode Power Supply) e tem como característica principal a capacidade de levar a tensão de entrada a um nível igual ou maior na saída, POMILIO (2001).

A variação da tensão de saída causada pela mudança da tensão de entrada ou da carga conectada à saída do conversor é muitas vezes indesejada. Mas, esse problema pode ser

reduzido dinamicamente a níveis satisfatórios, dependendo da técnica utilizada, ao se aplicar as teorias de controle em malha fechada.

A topologia simplificada do conversor *boost* está apresentada na Figura 1.

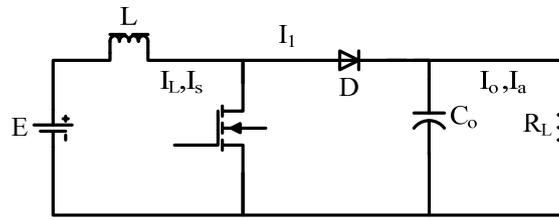


Figura 1. Topologia do conversor *boost*.

Este conversor apresenta um indutor na entrada, uma chave capaz de operar em altas frequências, um diodo para evitar que o capacitor descarregue durante o tempo no qual o transistor esteja em condução, um transistor, um capacitor na saída para manter a tensão de saída dentro de uma faixa desejada.

### 3.1 Aspectos Teóricos do Conversor *boost* Ideal

A capacidade de elevação da tensão de entrada do conversor *boost* pode ser observada diretamente da sua equação básica que relaciona a tensão de entrada com sua saída mediante a aplicação de uma frequência de chaveamento no transistor.

Para uma dada frequência de chaveamento, a Figura 2 mostra as formas de onda da tensão de entrada, tensão sobre o diodo, corrente de entrada e do indutor, tensão de saída e corrente de saída. Neste caso o *boost* está operando no modo de condução contínua. As curvas representam as formas de onda observadas sob condições que permitam a linearização das equações, ou seja, a frequência de chaveamento, valores da indutância e capacitância, RASHID (1999).

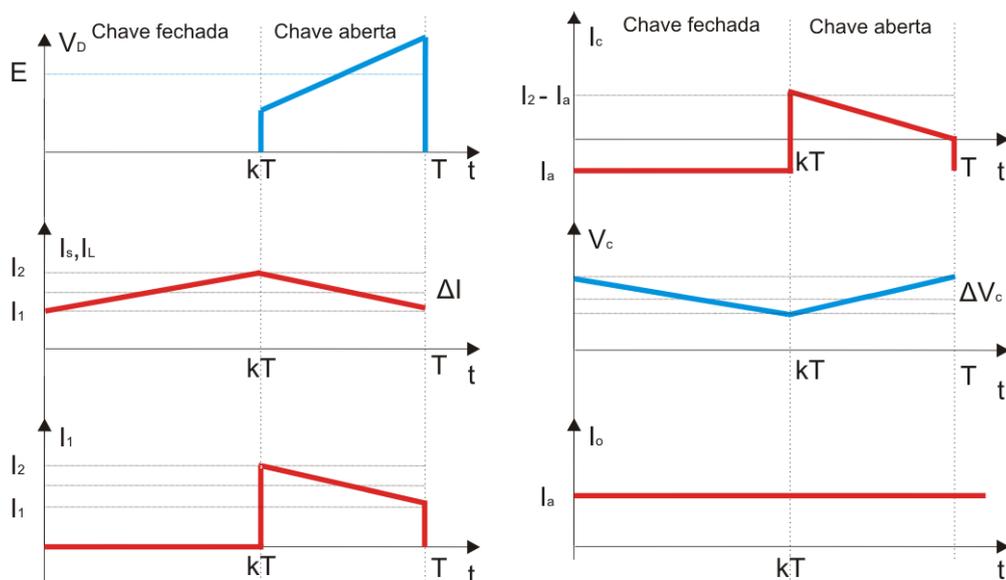


Figura 2. Gráfico da tensão sobre o diodo, corrente no indutor, corrente no diodo, corrente no capacitor, tensão de saída ou sobre o capacitor e corrente de saída.

Supondo, desta forma, que a corrente no indutor cresça linearmente durante o intervalo de tempo no qual a chave semicondutora esteja fechada temos:

$$E = L \frac{I_2 - I_1}{t_1} = L \frac{\Delta I}{t_1} \quad (1)$$

que pode ser reescrita da seguinte forma,

$$t_1 = L \frac{\Delta I}{E} \quad (2)$$

considerando que a corrente caia linearmente no indutor durante o intervalo no qual a chave semicondutora esteja aberta, pode-se obter a seguinte relação:

$$E - V_o = -L \frac{\Delta I}{t_2} \quad (3)$$

que pode ser reescrito da seguinte forma,

$$t_2 = L \frac{\Delta I}{V_o - E} \quad (4)$$

Da relação entre o ciclo de trabalho e o tempo no qual a chave permanece fechada ou aberta temos para  $t_1$  e  $t_2$

$$t_1 = kT \quad (5)$$

$$t_2 = (1-k)T \quad (6)$$

Reescrevendo as equações (2) em função de (5) temos:

$$kT = \frac{L\Delta I}{E} \quad (7)$$

Reescrevendo as equações (4) em função de (6) temos:

$$(1-k)T = \frac{L\Delta I}{V_o - E} \quad (8)$$

Fazendo a razão entre (8) por (7) e deixando de forma conveniente,

$$\frac{V_o}{E} = \frac{1}{1-k} \quad (9)$$

A equação (9), cujo gráfico é mostrado na Figura 3, é a equação fundamental do *boost* tratado de forma ideal, tanto é que para  $k$  igual à unidade ter-se-ia tensão de saída infinita!

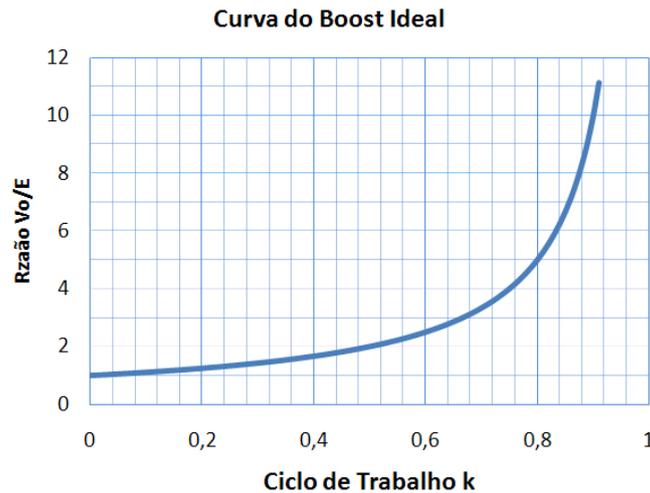


Figura 3. Gráfico da equação de um *boost* ideal.

Não se faz necessário tratar das condições de operação do *boost* em modo descontínuo, pois as características requeridas na implementação do *boost* incluem a condição de operação em modo contínuo. Isso implica no dimensionamento adequado do capacitor de saída e do indutor.

### 3.2 Aspectos do Conversor *boost* não ideal

Na execução do projeto de um dispositivo como o *boost*, no qual componha simulação e implementação, torna-se necessário conhecer as limitações de ganho do dispositivo. Isso pode ser conseguido através das equações de um modelo mais completo que traga alguma característica de não idealização.

Com esse propósito será obtida a equação de um modelo não ideal apresentado na Figura 4. Nota-se o acréscimo no circuito de uma resistência parasita correspondente à resistência do indutor. A inserção no modelo dessa resistência melhora muito a modelagem do circuito, pois a resistência do indutor participa dos dois estados de chaveamento, ERICKSON (2001).

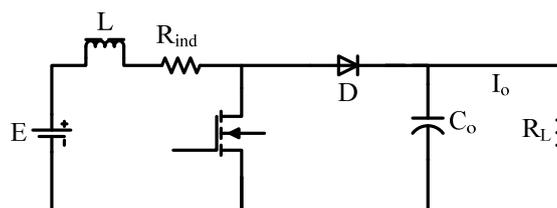


Figura 4. Topologia do conversor *boost* não ideal.

A Figura 5 mostra a topologia equivalente do circuito durante o intervalo de chave fechada.

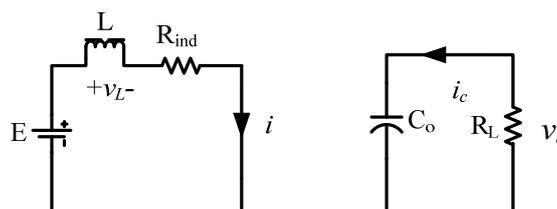


Figura 5. Topologia do conversor *boost* não ideal com chave fechada.

A Figura 6 mostra a topologia equivalente do circuito durante o intervalo de chave aberta.

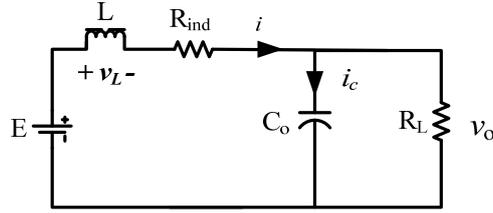


Figura 6. Topologia do conversor *boost* não ideal com chave aberta.

Do circuito da Figura 5 são escritas as expressões (10) e (11) para a corrente no indutor e tensão no capacitor de saída respectivamente:

$$v_L(t) = E - i(t)R_{ind} \quad (10)$$

$$i_c(t) = -\frac{v_o(t)}{R_L} \quad (11)$$

Fazendo-se uma aproximação para pequenos *ripples* podemos escrever (12) e (13):

$$v_L(t) = E - IR_{ind} \quad (12)$$

$$i_c(t) = -\frac{V_o}{R_L} \quad (13)$$

Do circuito da Figura 6 são escritas as expressões (14) e (15) para a corrente no indutor e tensão no capacitor de saída respectivamente:

$$v_L(t) = E - i(t)R_{ind} - v_o(t) \quad (14)$$

$$i_c(t) = i(t) - \frac{v_o(t)}{R_L} \quad (15)$$

Fazendo-se uma aproximação para pequenos *ripples* pode-se escrever (16) e (17):

$$v_L(t) = E - IR_L - V_o \quad (16)$$

$$i_c(t) = I - \frac{V_o}{R_L} \quad (17)$$

A Figura 7 mostra as formas de onda da tensão sobre o indutor e da corrente através do capacitor referentes às equações (14), (15), (16) e (17).

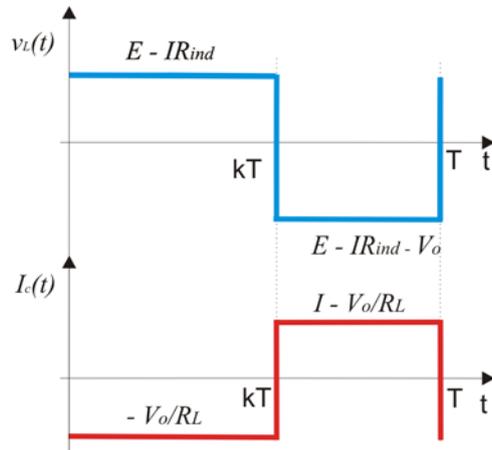


Figura 7. Formas de onda da tensão no indutor e corrente no capacitor.

Como a tensão média sobre o indutor e a corrente média através do capacitor tem valores nulos, então vale as relações (18) e (19):

$$E - IR_{ind} - (1-k)V_o = 0 \quad (18)$$

$$-\frac{V_o}{R_L}k + (1-k)I = 0 \quad (19)$$

Isolando I da equação (19), substituindo na equação (18) e isolando-se  $V_o/E$ :

$$\frac{V_o}{E} = \frac{1}{(1-k) \left\{ 1 + \frac{R_{ind}}{(1-k)^2 R_L} \right\}} \quad (20)$$

A Figura 8 mostra o gráfico para alguns valores do ciclo de trabalho e a razão entre  $R_{ind}$  e  $R_L$ .

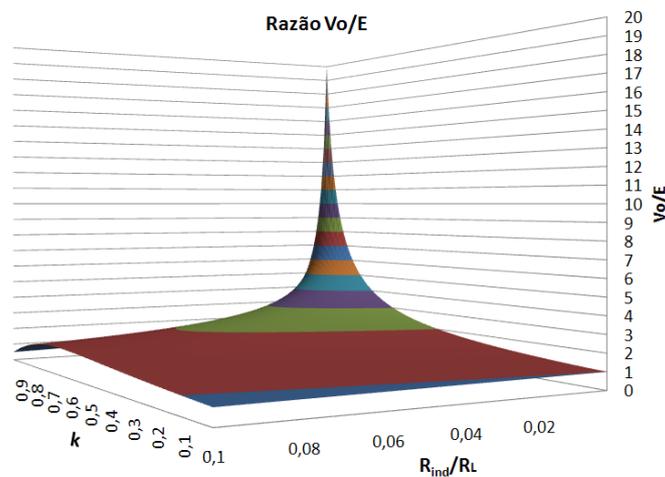


Figura 8. Gráfico da equação do *boost* para o ciclo de trabalho variando no intervalo [0,1] e razão entre  $R_{ind}$  e  $R_L$  variando no intervalo [0,0,1].

Nota-se no gráfico da Figura 8 que no caso no qual a razão entre a resistência do indutor e a resistência de carga se torna zero a curva correspondente a esse plano se torna a mesma curva do gráfico da Figura 3.

### 3.3 Dimensionamento dos Componentes

#### 3.3.1 Dimensionamento do capacitor de saída.

Para que a tensão de saída do *boost* tenha erro de no máximo de 2% para frequência de 10kHz. Utilizou-se utilizar o seguinte equacionamento, RASHID (1999):

$$C_{o\min} = \frac{I_{o\max} \cdot k \cdot \tau}{\Delta V_o} \quad (21)$$

$$C_{o\min} = 160\mu F \quad (22)$$

#### 3.3.2 Dimensionamento da indutância

O dimensionamento da indutância está baseado no fato que o *boost* deverá operar em modo de condução contínuo. Neste caso deverá atender a equação abaixo, RASHID (1999):

$$L_{\min} = \frac{E^2 (V_o - E)}{2 \cdot f \cdot V_o^2 \cdot I_{o\min}} \quad (23)$$

A Figura 9 mostra o gráfico da indutância em função da tensão de entrada.

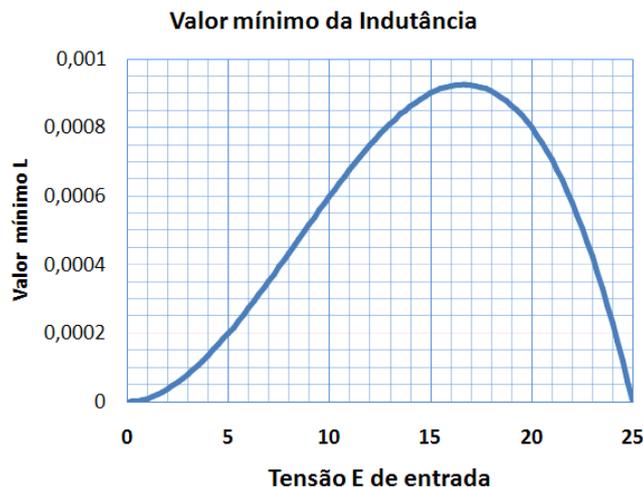


Figura 9. Gráfico da equação do indutor em função da tensão de entrada do *boost*.

Substituindo os valores anteriores em (23), derivando e calculando o valor da tensão de entrada que a indutância mínima necessária seja máxima, obtêm-se:

$$L_{\min} = 925,92\mu H \quad (24)$$

### 3.3.3 Dimensionamento do Indutor

O adequado dimensionamento dos elementos magnéticos pode ser fator determinante para o funcionamento adequado de um conversor CC-CC, POMILIO (2001).

Para o dimensionamento do indutor foram observadas as seguintes características:

#### 3.3.3.1 Cálculo do entreferro necessário

Para obtenção da extensão do entreferro é necessário o conhecimento da indutância. Os cálculos para obtenção da indutância mínima, para manter o conversor sempre no modo de condução contínua, podem ser vistos na seção 3.3.2, dado pela equação (23).

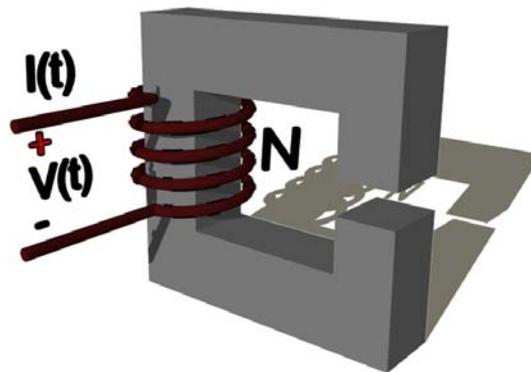


Figura 10. Indutor com N espiras.

Seja um indutor conforme o apresentado na Figura 10. Ao se aplicar um sinal de tensão  $v(t)$  em seus terminais leva a circulação de uma corrente  $i(t)$ , através de suas bobinas. A circulação de corrente no indutor gera um campo magnético que tem como caminho preferencial para as linhas de campo o núcleo que passa pelo interior do solenóide, conforme Figura 11.

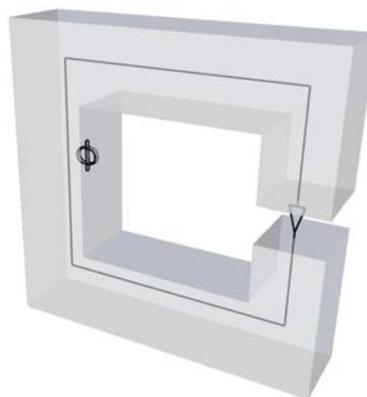


Figura 11. Campo magnético no interior do núcleo de ferrite.

O circuito magnético equivalente é mostrado na Figura 12.

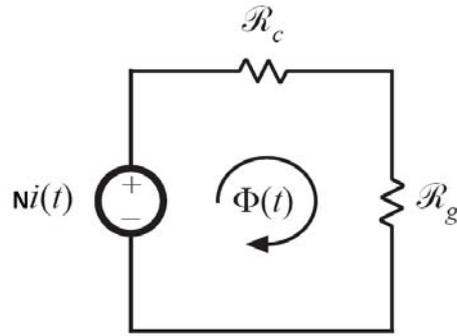


Figura 12. Circuito magnético equivalente.

Do circuito magnético equivalente mostrado na Figura 12 obtemos a equação (25):

$$Ni = \Phi (\mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_g) \quad (25)$$

Como a valor da relutância do caminho magnético é muito menor que o valor da relutância do entreferro, então aquela poderá ser desconsiderada para determinação do tamanho do entreferro. O que resulta na equação (26).

$$Ni = \Phi \mathfrak{R}_g \quad (26)$$

Sabendo-se que o valor da relutância do entreferro depende de sua extensão, de sua área de secção transversal e da permeabilidade magnética do ar, então pode se reescrever a equação (26) conforme a equação (27).

$$Ni = \Phi \frac{l_g}{\mu_o A_c} \quad (27)$$

Para campo e área constantes, vale a expressão (28) que pode ser substituída na equação (28), conforme (29).

$$\Phi = BA_c \quad (28)$$

$$Ni = \frac{Bl_g}{\mu_o} \quad (29)$$

Como não se sabe o número de espiras do indutor, então o valor de N da equação (29) poderá ser substituído na expressão da indutância da equação (30), conforme equação (31).

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_g} = \frac{\mu_o A_c N^2}{l_g} \quad (30)$$

$$L = \frac{\mu_o A_c}{l_g} \left( \frac{Bl_g}{i\mu_o} \right)^2 \quad (31)$$

Isolando  $l_g$  e simplificando obtemos a expressão do valor do entreferro, equação (32).

$$l_g = \frac{\mu_o L i^2}{B^2 A_c} \quad (32)$$

No caso crítico para corrente máxima, significando também campo magnético máximo, a equação (32) pode ser reescrita na forma da equação (33).

$$l_g = \frac{\mu_o L i_{máx}^2}{B_{máx}^2 A_c} \quad (33)$$

### 3.3.3.2 Cálculo do número de voltas

O número de espiras do indutor pode ser obtido usando a equação (29) ou conforme a equação (34), ERICKSON (2001).

$$N = \frac{L I_{máx}}{B_{máx} A_c} \quad (34)$$

O valor típico adotado para  $B_{máx}$  ao se usar *ferrite* é de 0,3T, BARBI *et al* (2002). A corrente máxima pode ser obtida através da equação (35), RASHID (1999).

$$I_{máx} = \frac{I_o V_o}{V_s} + \frac{V_s (V_o - V_s)}{2 V_o f L} \quad (35)$$

O número de voltas e o comprimento do entreferro são essenciais para o dimensionamento de um indutor com bom desempenho, mas muitos outros aspectos podem ser observados para um desempenho melhor, ERICKSON (2001).

## 3.4 Simulação

Na simulação em malha fecha foi utilizado o circuito integrado *SG3524* de maneira a alterar o ciclo de trabalho proporcional à diferença entre a tensão de referência e a tensão amostrada na saída do *boost* com um ganho sobre o erro.

A Figura 13 mostra o circuito simulado.

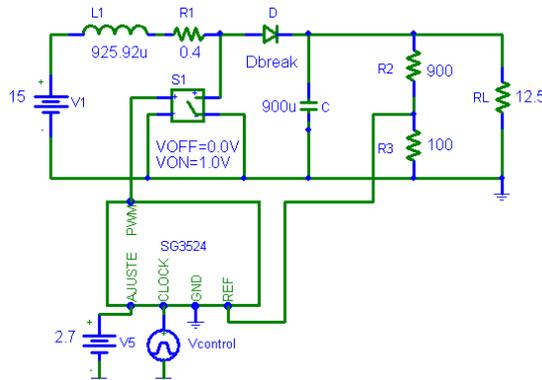


Figura 13. Topologia do *boost* simulada no *Spice*.

### 3.4.1 Corrente sobre o indutor no caso crítico de carga máxima e tensão de entrada mínima

A Figura 14 mostra a curva da corrente no indutor no caso crítico de tensão de entrada mínima e carga máxima de 2A.

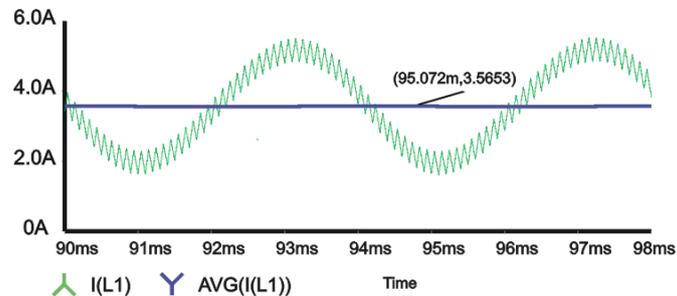


Figura 14. Curva da corrente e da corrente média no indutor.

### 3.4.2 Resultados da tensão média de saída em função da entrada

A Figura 15 mostra o gráfico da tensão média de saída em função da tensão de entrada  $E$  para carga máxima, média e mínima.



Figura 15. Valores obtidos da simulação para tensão média de saída em função da tensão de entrada

## 3.4 Resultados Experimentais

### 3.4.1 Corrente no indutor no caso crítico de carga máxima e tensão de entrada mínima

A Figura 16 mostra o gráfico da corrente do indutor com tensão de entrada mínima e carga máxima de 2A, além do sinal PWM de chaveamento.

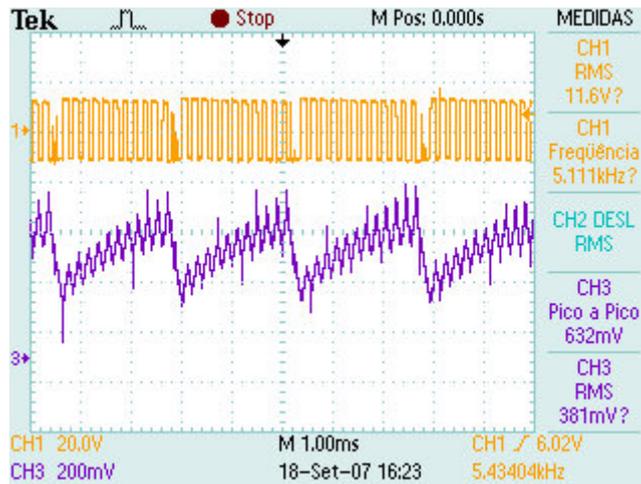


Figura 16. Corrente no indutor.

### 3.4.4 Resultados da tensão média de saída em função da entrada

A Figura 17 mostra as tensões de saída para carga máxima, média e mínima para tensão aplicada na entrada entre 15 e 24 volts.

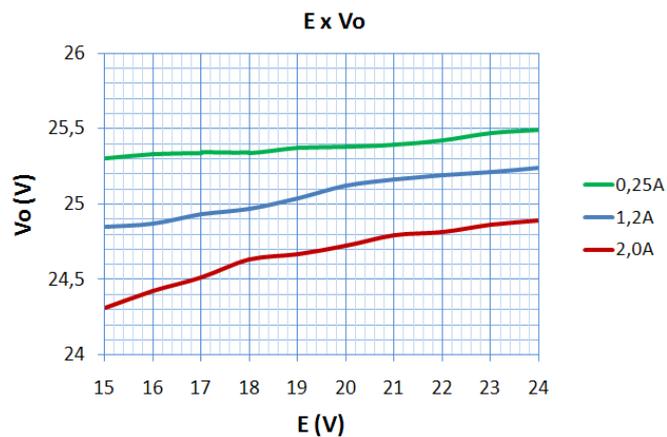


Figura 17. Tensões de saída do *boost*.

A Figura 18 mostra a forma de onda da tensão de saída do conversor *boost*.

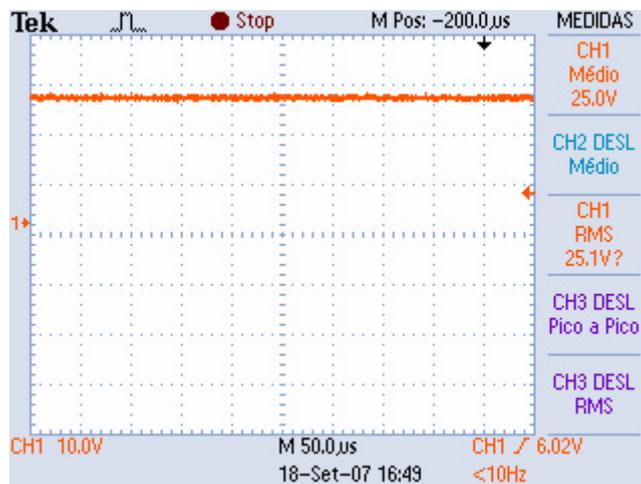


Figura 18. Curva da tensão de saída do *boost*.

A Figura 19 mostra foto da plataforma didática do conversor *boost* implementado.

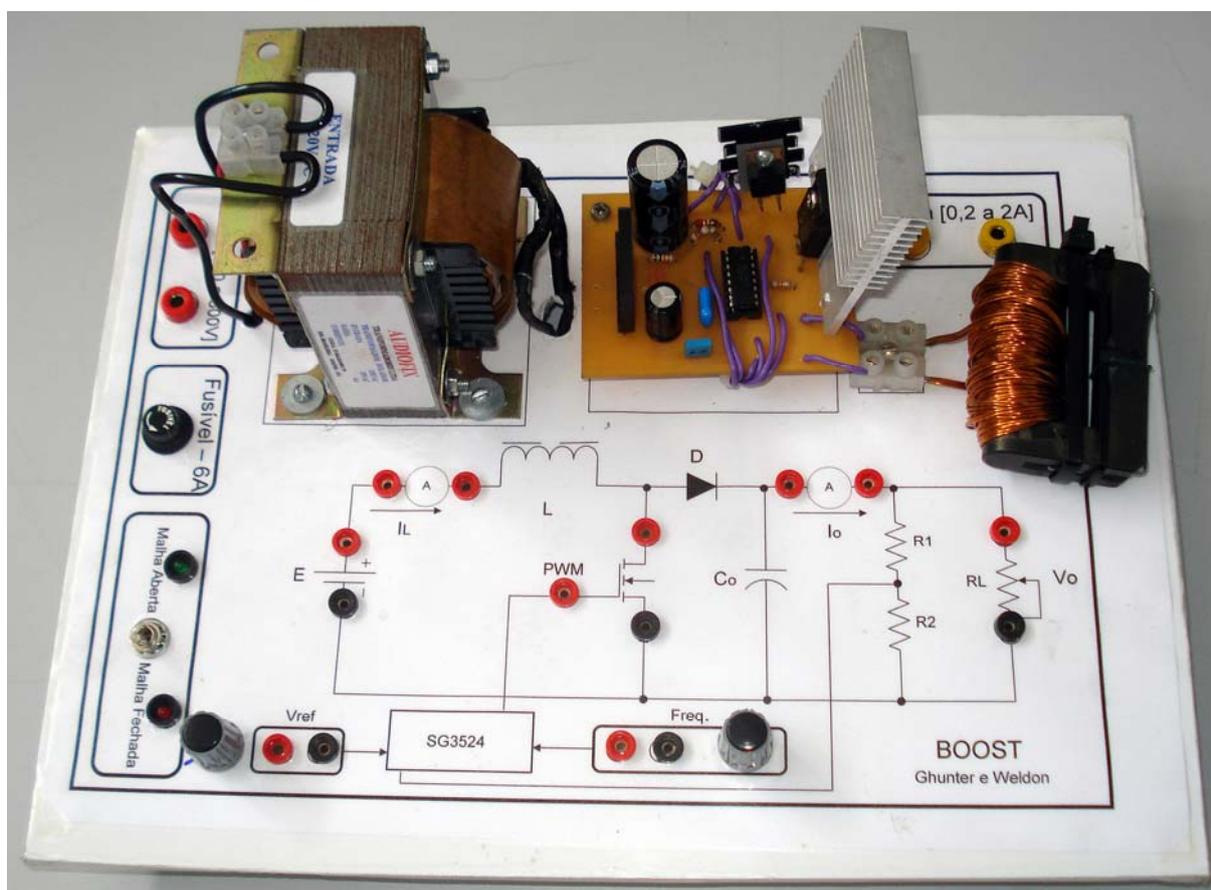


Figura 19. Foto da plataforma didática do conversor *boost*.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação do projeto, na forma de plataforma didática, se mostrou uma ótima alternativa posto que, além de introduzir uma nova metodologia de ensino da disciplina de Eletrônica de Potência, trouxe inúmeras inovações, tais como:

- Instigação dos mestrandos a investigação e experimentação;
- Trabalhos práticos: dimensionamento e construção de indutores;
- Investigação bibliográfica;
- Simulação;
- Fação de artigos científicos;
- Disponibilização das plataformas didáticas para os alunos de graduação que por sua vez ficam estimulados por saber que foram produzidos dentro da própria universidade;
- Reutilização de muitos componentes eletrônicos, tais como: resistores, chaves semicondutoras, núcleos magnéticos para construção dos indutores, etc;
- Baixo custo dos projetos.
- As plataformas didáticas produzidas são “abertas”, ou seja, não funcionam como uma caixa preta, como normalmente são aquelas adquiridas com altos custos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, N. **Ensino de Engenharia sobre Bases Construtivistas: Um Estudo de Caso na Disciplina de Laboratório de Sistemas Térmicos. 2003.** Doutorado em Educação – Faculdade de Educação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BARBI I.; FONT C.H.I.; Alves R.L. **Projeto Físico de Indutores e Transformadores**, Introdução, p. 3, 2002.
- DONOSO-GARCIA, P. F.; CORTIZO, P. C., MORAIS, L. M. F. **Ensino Orientado ao Projeto: Uma Experiência para o Ensino de Eletrônica nas Disciplinas de Laboratório de Eletrônica e Eletrônica de Potência. 2008.** Revista Eletrônica de Potência, vol. 13, n. 2, Maio de 2008.
- ERICKSON R. W. **Fundamentals of Power Electronics**, cap. 14, p. 539; Cap. 3, p. 39, 2001.
- POMILIO J.A. **Eletrônica de Potência.** Cap. 5, pp. 5-8, 2001, endereço eletrônico: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>, último acesso, 25/06/2008.
- RASHID M.H. **Eletrônica de Potência, circuitos, dispositivos e aplicações**, pp. 393-395, 1999.

### **PROJECT, SIMULATION AND IMPLEMENTATION OF A NOT ISOLATED CC-CC BOOST CONVERTER, A METHODOLOGICAL EXPERIMENTATION - 2008**

***Abstract:** This work presents the implementation of a close-loop boost energy converter as a didactical setup in order to introduce the teaching of Power Electronics in constructivist bases in the master degree course (Almeida, 2003). Hence, theoretical and simulation aspects are both treated aiming to achieve a successful implementation. Furthermore, this methodology provides an opportunity to face practical drawbacks typically found in power electronic source design, introducing the student to a hands-on experience. This work does not bring any technical innovative contribution to the field of work once the main aim is to propose a problem-based learning activity, based on design guidelines and a project schedule.*

***Key-words:** constructivism, power electronics, simulation, problem based learning.*