

CONVERSOR BUCK-BOOST APLICADO A UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM A UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE INDUTOR VARIÁVEL

SEBASTIAN MARTINS, GABRIEL ALI, ÁLYSSON R. SEIDEL, RODRIGO V. TAMBARA, LEANDRO ROGGIA

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFSM
Av. Roraima, 1000 – Camobi, Santa Maria - RS*

E-mails: smartins012@gmail.com, seidel@ctism.ufsm.br, rodvarella@yahoo.com.br, roggia@ctism.ufsm.br

Abstract— This work proposes the use of two different techniques of inductance variation replacing the usual techniques for design of the inductor used in a buck-boost converter applied as a power point tracker in a photovoltaic system. The objective is to analyse and achieve volume reduction by applying these techniques, in addition to perform a comparison of efficiency with the usual techniques. The design of inductors and experimental results will be presented.

Keywords— Variable inductor, DC-DC converter, MPPT, fotovoltaics, buck-boost.

Resumo— Este artigo propõe a utilização de duas diferentes técnicas de variação de indutância substituindo as técnicas usuais para projeto do indutor utilizado no conversor *buck-boost* aplicado como rastreador do ponto de máxima potência em um sistema fotovoltaico. Objetiva-se analisar e atingir redução de volume com aplicação destas técnicas, além de realizar uma comparação de rendimento com as técnicas usuais. O projeto dos indutores e resultados experimentais serão apresentados.

Palavras-chave— Indutor variável, Conversor CC-CC, MPPT, fotovoltaico, buck-boost.

1 Introdução

O design de projeto circuitos aplicados à área da eletrônica de potência atualmente se depara com o difícil dilema de aliar alta performance de desempenho com o menor espaço volumétrico possível. Frente a isto, há o constante interesse na busca tanto por novos componentes como por novas técnicas de projeto que atinjam estes objetivos.

Os componentes magnéticos que constituem os filtros de saída dos conversores estáticos têm papel fundamental no desempenho e conversão de energia destes sistemas. O projeto dos mesmos afeta desde o desempenho em relação a perdas de energia e rendimento, como impactam também no custo final do sistema. Desta forma, a obtenção de um projeto otimizado de conversores estáticos passa também pelo projeto adequado de seus componentes magnéticos. (Brown, 2008)

Dentre as inúmeras aplicações, os conversores estáticos são comumente inseridos em sistemas fotovoltaicos com o intuito de gerenciar níveis de tensão e injetar a potência elétrica gerada por um conjunto de células às cargas (Azevedo, Cavalcanti, Oliveira, Neves, & Lins, 2008)

Além disso, estes conversores garantem o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) otimizando o sistema, sendo nesta aplicação, normalmente utilizados conversores CC-CC não-isolados. Isto é possível uma vez que estes conversores possuem a característica de variação de impedância de entrada em função da razão cíclica imposta na comutação dos dispositivos interruptores, sendo assim possível o casamento de impedâncias aplicando-se o princípio do teorema

da máxima transferência de energia (Azevedo et al., 2008).

Em conversores CC-CC clássicos não-isolados, é de praxe a presença de apenas um componente magnético, o indutor, aplicado no armazenamento de energia durante os períodos de comutação dos interruptores. Desta forma, a energia (E_s) armazenada pelo componente magnético é exponencialmente dependente do nível de corrente aplicado ao mesmo, além do valor de sua indutância (Brown, 2008).

$$E_s = \frac{1}{2} L I^2 \quad (1)$$

Este valor de corrente (I), em conversores estáticos é constituído de duas componentes distintas, seu valor médio (I_{DC}), e o fator de ondulação (ΔI). O comportamento de ondulação da corrente aplicada ao indutor é dependente da tensão aplicada ao período de cada estado dos interruptores, além do valor de indutância do mesmo.

$$\Delta I_{ON} = (V_{ON} * t_{ON}) / L \quad (2)$$

$$\Delta I_{OFF} = (V_{OFF} * t_{OFF}) / L \quad (3)$$

A partir das equações (2) e (3), fica claro que o fator de ondulação de corrente pode ser modificado apenas pela frequência de comutação (f_{sw}), pela razão cíclica de trabalho (D) ou pelo valor da indutância (L).

Já a componente I_{DC} é independente dos valores de indutância e frequência, uma vez que está atrelado unicamente aos requisitos de fluxo de energia do conversor, mantendo o fluxo condizente com as tensões de entrada e saída e a potência de saída desejada.

Estas componentes de corrente, bem como o valor da indutância são variáveis de projeto, que impactam tanto na performance, quanto no custo do sistema, assim como o tipo de material e tipo de construção dos

núcleos que compõe o circuito magnético do indutor, que por sua vez são dependentes da aplicação em que se insere o conversor, além do objetivo de otimização, sendo este voltado para melhor rendimento ou menor volume (Brown, 2008; Hurley & Wölfle, 2013).

Este artigo visa apresentar um estudo acerca de duas novas técnicas de projeto magnético de indutores utilizados em um conversor CC-CC do tipo *buck-boost*, aplicado a um sistema fotovoltaico na obtenção do ponto de máxima potência (MPP), buscando a otimização de volume e rendimento, comparando os resultados obtidos com as técnicas usualmente utilizadas para este fim.

O artigo está organizado da seguinte forma: o capítulo 2 trata dos aspectos teóricos relacionados a aplicação de conversores CC-CC como MPPT em sistemas fotovoltaicos. O capítulo 3 trata de elucidar a teoria sobre as técnicas de indutância variável. O capítulo 4 trata da apresentação das etapas de projeto do conversor proposto utilizando as técnicas de indutância variável. O capítulo 5 trata da apresentação dos resultados experimentais, e por fim é apresentada a conclusão deste trabalho.

2 Considerações acerca dos conversores

Esta seção aborda os aspectos teóricos que regem o comportamento dos conversores CC-CC não isolados frente a sua utilização como MPPT de um sistema fotovoltaico. Além disso, são abordados os aspectos teóricos frente a indutância crítica do indutor utilizado no filtro de saída dos mesmos.

2.1 Operação e MPPT

Os conversores CC-CC possuem comportamentos condizentes com o modo de condução de corrente imposta sobre o indutor. As vantagens e desvantagens destes modos de condução são discutidas na literatura, onde comumente, para aplicações em sistemas fotovoltaicos, os conversores operam em modo de condução contínua (CCM). Este modo de operação é definido pelo parâmetro de indutância crítica (L_b) (Hamza, Qiu, & Jain, 2013; Kazimierczuk, 2012).

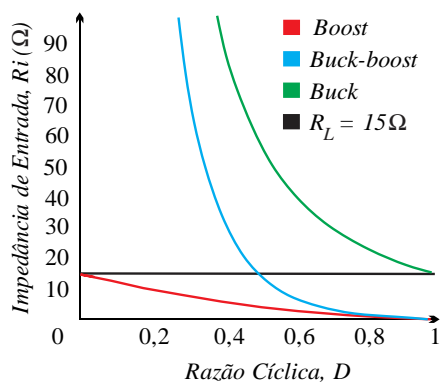


Figura 1. Impedância de entrada em função da razão cíclica para conversores CC-CC não-isolados

Para a aplicação de MPPT proposta neste trabalho a configuração de um conversor não-isolado conectado a uma carga (R_L) de impedância linear constante de 15Ω , com seus parâmetros garantindo operação em CCM, tem suas características de impedância de entrada em função da razão cíclica apresentadas na figura 1 (Coelho, Concer, & Martins, 2009). A partir da análise desta resposta, observa-se a incapacidade do conversor tipo *boost* rastrear o MPP para uma impedância ótima maior que o valor de impedância de carga. Para o conversor tipo *buck* o comportamento mostra-se oposto, sendo incapaz de emular em sua entrada impedâncias menores que o valor condizente à carga conectada a sua saída.

Dentre os conversores analisados, o conversor *buck-boost* apresenta a capacidade de atingir valores de impedância de entrada tanto maiores quanto menores que a impedância conectada a sua saída, sendo assim o mais vantajoso na utilização de MPPT dentre os conversores analisados.

2.2 Indutância crítica

A figura 2 mostra o comportamento da indutância crítica em função da corrente no indutor do conversor. Para o projeto usual de um conversor em operação CCM (L_1), considera-se como parâmetro de projeto a condição de maior indutância sob maior corrente. Em operação normal, sob menores correntes, o conversor opera com menor ondulação e menor corrente no indutor. Desta forma é possível analisar a condição de indutância crítica necessária para garantir operação em CCM, que decresce de acordo com o aumento do nível de corrente aplicada ao indutor.

Na aplicação de MPPT é possível relacionar L_b com as variáveis de tensão e corrente do módulo fotovoltaico, com as seguintes considerações, para um conversor *buck-boost*:

$$L_b = \frac{(1-D)^2 R_L}{2 f_{sw}} \quad (4)$$

$$I_o = I_{in} \frac{1-D}{D} \quad (5)$$

$$V_o = V_{in} \frac{D}{1-D} \quad (6)$$

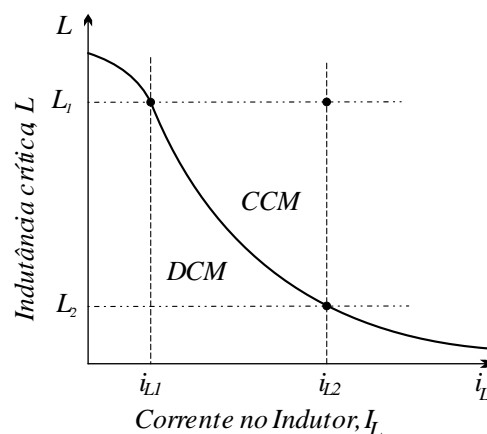


Figura 2. Indutância L_b em relação ao nível de corrente no indutor

$$R_L = \frac{V_o}{I_o} \quad (7)$$

$$L_b = \frac{D^2 v_{pv}}{2 f_{sw} i_{pv}} \quad (8)$$

Desta forma é possível afirmar que sob condições de maior irradiância, a indutância crítica será menor possibilitando assim o uso de menores valores de indutância neste ponto de operação. Esta condição, aliada ao parâmetro que rege o armazenamento de energia no indutor E_s torna possível a consideração da aplicação da técnica de indutância variável, onde com valores menores de indutância é possível a diminuição da energia armazenada, como mostra (1), que por sua vez é diretamente proporcional ao volume do núcleo, apresentando-se, assim, a possibilidade de redução do mesmo.

3 Técnicas de variação da indutância

Esta seção aborda as técnicas de variação de indutância empregadas no projeto posterior do sistema proposto. São demonstrados primeiramente os aspectos teóricos das técnicas de indutância variável através de saturação do núcleo frente a utilização de um enrolamento auxiliar e aplicação de corrente contínua em um indutor projetado com núcleo de ferrite duplo E. Outra técnica abordada é na utilização de núcleos *iron powder* toroidais, e a possibilidade de utilização da variação de permeabilidade para variação de indutância.

3.1 Indutor variável com núcleo de ferrite EE

Algumas técnicas de variação de indutância são abordadas na literatura, como é o caso da indutância variável por saturação do núcleo (Zhang, Member, Hurley, & W, 2011). Para a primeira técnica considerada neste trabalho a variação de indutância é possível, uma vez que, através da aplicação de corrente sobre um enrolamento auxiliar (N_c), varia-se o fluxo magnético total sob o núcleo, diminuindo sua permeabilidade relativa, resultando em um controle da indutância do enrolamento principal (N_L) (Perdigão, 2016).

A estrutura básica de um indutor variável com núcleo duplo E em ferrite é mostrada na figura 3. Durante a operação do conversor, sem aplicação de corrente CC no enrolamento auxiliar, o ponto de operação através da curva B-H do indutor é alocado na parte linear da mesma. Com a injeção de corrente DC no enrolamento auxiliar, este ponto é realocado para saturação, onde a permeabilidade magnética do núcleo é variável, como mostra a figura 4.

Para um núcleo EE com entreferro, é observável a relação de indutância (L) e permeabilidade relativa do núcleo (μ_m) por (9).

$$L = \frac{0,4\pi N^2 A_e (10^{-8})}{l_g + \frac{MPL}{\mu_m}} [\text{Henrys}] \quad (9)$$

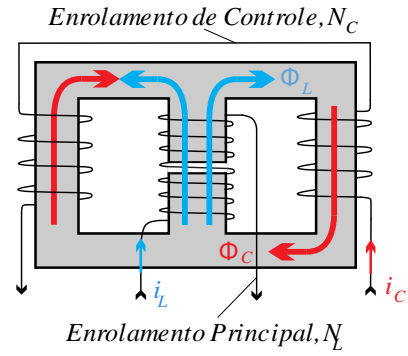


Figura 3. Funcionamento do indutor variável proposto

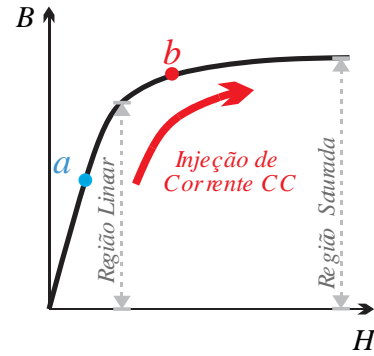


Figura 4. Ponto de operação do Indutor

Onde N é o número de espiras do enrolamento principal, A_e é a área transversal do núcleo em cm^2 , l_g é o comprimento do entreferro em cm, e MPL é o caminho magnético também em cm (Mclyman, 2011).

Desta forma, o número de espiras no enrolamento auxiliar, bem como o nível de corrente aplicada ao mesmo é dependente do ponto de operação necessário para a variação controlada da indutância, como mostra (10).

$$N_c = \frac{k B_{sat} l_{ext}}{0,5 \mu_{kB_{sat}} \mu_0 I_{dc,max}} \quad (10)$$

Onde l_{ext} corresponde ao comprimento do caminho magnético externo do núcleo, a variável k , que multiplicada pela densidade de fluxo onde ocorre saturação do núcleo (B_{sat}) garante a operação fora desta faixa, a variável $\mu_{kB_{sat}}$ corresponde à permeabilidade do material para esta mesma condição, sendo ainda definido a permeabilidade do vácuo e a máxima corrente CC aplicada ao enrolamento auxiliar ($I_{dc,max}$). Este método aproximado considera corrente nula em N_L e proporciona boa resposta (Perdigão, 2016).

3.1 Indutor variável com núcleo Iron Powder toroidal

A construção de componentes magnéticos com materiais *iron powder* é difundida na aplicação dos filtros de saída em conversores estáticos, tendo a principal característica de possuírem *gap* distribuído, alta resistividade e baixas perdas por histerese (Mclyman, 2011).

Além disso, apresentam uma alta densidade de fluxo necessária para atingir a saturação, que aliado ao

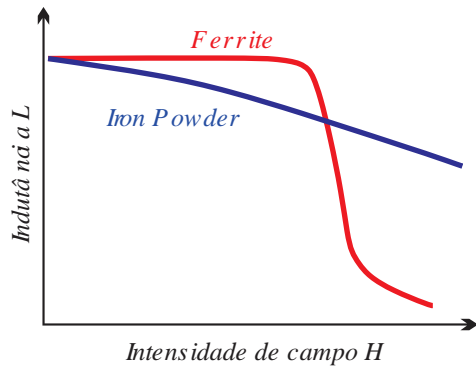


Figura 5. Comparação de variação de indutância para os materiais ferrite e iron powder

gap distribuído, produz um material com permeabilidade relativa baixa, que por sua vez apresenta uma resposta a aplicação de campo magnético mais estável a variação do que a do ferrite (Hurley & Wölfle, 2013; Mcllyman, 2011)

Esta variação de permeabilidade, como já comentada anteriormente, reflete-se na variação da indutância. A figura 5 mostra uma comparação entre a resposta quanto a variação da indutância frente a aplicação de um campo magnético em núcleos de ferrite e núcleos iron powder.

É possível afirmar que a variação de indutância apresentada por um indutor construído com material iron powder é inerente ao nível de corrente aplicado a seu enrolamento principal. As técnicas de projeto, usualmente tem o objetivo de garantir um funcionamento satisfatório dentro de uma faixa de operação, onde haja uma variação aceitável de acordo com a aplicação do mesmo.

A consideração de aplicação deste material na técnica de indutância variável, parte então deste princípio, onde deseja-se obter a faixa de variação desejada considerando a própria variação inerente à curva do material, sem que haja aplicação de enrolamentos auxiliares e corrente CC externa em sua construção. (Hurley & Wölfle, 2013).

De maneira geral os fabricantes dispõem de diferentes permeabilidades para uma mesma dimensão de núcleo, ilustrado pela figura 6.

Para a análise inicial de possibilidade de variação de indutância, observando as curvas de materiais disponíveis, é possível traçar uma relação entre a permeabilidade inicial do material desejado a ser aplicado no indutor variável. Desta forma, para materiais com menor permeabilidade há menor variação de indutância

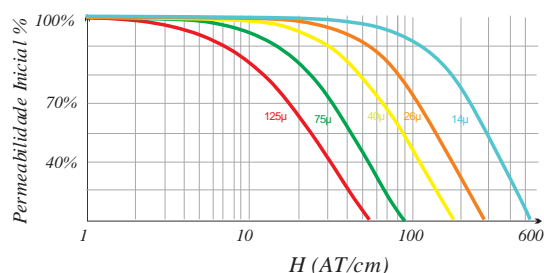


Figura 6. Variação de permeabilidade para cinco opções de núcleos iron powder

considerando certo nível de corrente. Em contrapartida, para materiais com maiores valores de permeabilidade há maior variação de indutância, considerando este mesmo nível de corrente aplicada ao indutor, que se reflete na intensidade de campo aplicada ao núcleo.

Sendo assim, para projetos onde é necessário uma grande faixa de variação de indutância é de interesse a utilização de materiais com maior permeabilidade inicial, o que acontece de maneira contrária, caso o projeto seja mais conservador, e necessite uma faixa pequena de variação.

Com isso, há a consideração de menor indutância possível para máxima potência do conversor. Em outras palavras, nesta técnica o que se deseja é obter a máxima aproximação possível da curva de indutância crítica do conversor, com a curva de variação da indutância do material, como mostra a figura 7.

Em comparação com a técnica anterior, esta não possui a vantagem de obter-se uma variação controlada da indutância, onde esta é feita de maneira estimada.

4 Projeto do conversor

Esta seção demonstra o projeto aplicado das técnicas mencionadas no capítulo anterior para implementação em um conversor buck-boost como MPPT de um sistema fotovoltaico.

4.1 Projeto com indutância fixa

A tabela I informa as características de projeto do conversor buck-boost proposto, sob duas condições críticas de irradiância, máxima e mínima, aplicadas por um emulador fotovoltaico. São analisadas as indutâncias críticas, corrente média sobre o indutor, bem como o valor teórico de razão cíclica e impedância de entrada para atingir o MPP.

TABELA I. VARIAÇÃO DE L_b EM FUNÇÃO DA IRRADIÂNCIA

Irradiância	R_f	L_b	I_{dc}	Razão Cíclica
200 W/m ²	17,58 Ω	81,06 μ H	1,83 A	48 %
1000 W/m ²	3,68 Ω	32,92 μ H	6,66 A	66 %

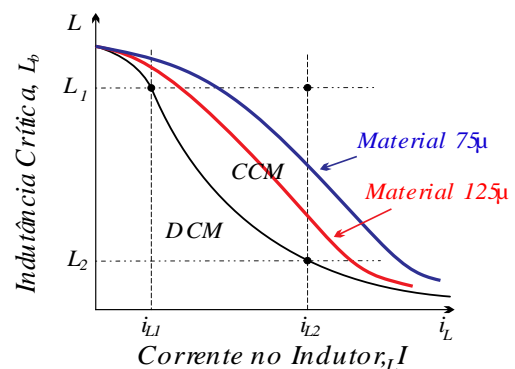


Figura 7. Comparação de variação de indutância para os materiais ferrite e iron powder

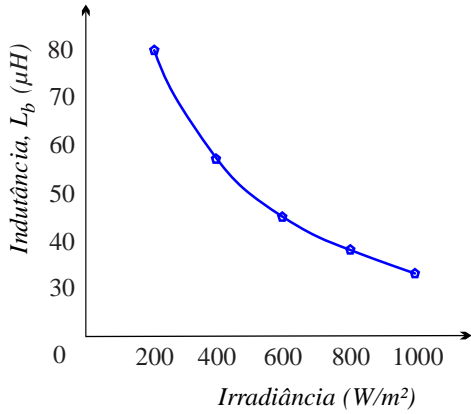


Figura 8. Variação da indutância crítica em função da irradiância.

Considerando tensão fixa sob condições de temperatura constante, em MPP, v_{pv} apresenta 17,9 V. Para uma irradiância de 1000 W/m² a corrente i_{pv} apresenta valor igual a 4,84 A, enquanto que para menor a irradiância considerada, i_{pv} apresenta valor igual a 0,996 A. Considerando (8) sob uma frequência de comutação de 25 kHz é possível traçar a faixa de variação da indutância, de acordo com a irradiância, ilustrado pela figura 8.

O projeto magnético convencional considera a indutância crítica do menor nível de irradiação, sob a condição de maior potência. Desta forma é garantido o modo CCM para toda faixa de operação do conversor.

Para o projeto com a utilização de um núcleo de ferrite duplo E, essa indutância é fixa para toda faixa de operação, e seu projeto é amplamente difundido na literatura (Barbi, 2001; Hurley & Wölfle, 2013; Mclyman, 2011). A partir de seus parâmetros de área da janela A_w , e área efetiva da seção transversal A_e . Com isto é possível dimensionar o tamanho do núcleo a partir do produto dos mesmos

$$A_e A_w = \frac{L I_{max} I_{DC}}{K_w B_{sat} J} \quad (11)$$

que por sua vez é dependente da indutância a ser projetada (L), da corrente máxima de pico (I_{max}), e da corrente média presente no indutor (I_{DC}) considerando um fator de ocupação máximo da janela ($K_w = 0,5$), densidade de fluxo onde ocorre a saturação ($B_{sat} = 0,3 T$) e densidade de corrente no condutor ($J = 450 A/cm^2$) (Barbi, 2001).

Para a utilização de um núcleo *iron powder* considera-se o projeto descrito em (Magnetics, 2017) onde a partir da corrente de pico máxima e indutância mínima desejável é possível a obtenção da energia que corresponde ao núcleo desejável no catálogo do fabricante a partir de (1). Como há uma variação de indutância inerente a aplicação de campo magnético neste tipo de núcleo, considera-se a indutância mínima como sendo a indutância crítica apresentada no ponto de operação de 200 W, garantindo assim a operação CCM em toda faixa, mesmo com variação de indutância. Observa-se também a preferência por materiais de permeabilidades menores para uma menor faixa de

variação. A tabela II mostra as características físicas dos indutores projetados.

4.2 Projeto com indutância variável

Para o conversor *buck-boost* proposto neste trabalho, considera-se a faixa de variação de indutância que garanta o modo de condução crítica (BCM) sob toda faixa de irradiância. Com isso obtêm-se a faixa de variação de indutância entre 81,06 μH para mínima potência (200 W/m²) e 32,92 μH para máxima potência (1000 W/m²).

O projeto de um indutor variável que atinja os valores de indutância para a faixa de L_b do conversor considera então, as duas técnicas referidas no capítulo 3.

A consideração da aplicação destas técnicas para atingir o objetivo de redução de volume, parte do princípio mostrado em (1).

Considerando inicialmente a aplicação da técnica de indutância fixa, sob máxima potência L_b e I_{DC} correspondem a 81,06 μH e 6,66 A, a energia armazenada pelo indutor corresponde a 1,79 mJ.

Aplicando a técnica de variação de indutância, sob a condição de máxima potência onde L_b e I_{DC} correspondem a 32,92 μH e 6,66 A, a energia armazenada pelo indutor corresponde a 0,73 mJ.

Comparando estes dados fica claro a possibilidade de redução do volume do núcleo em aproximadamente 60%, uma vez que com a variação da indutância, haverá a redução da energia armazenada pelo indutor.

Inicialmente emprega-se as considerações apresentadas para o projeto de um indutor variável em núcleo duplo E de ferrite, com enrolamento auxiliar e injeção de corrente, sendo possível assim o controle exato dos valores de indutância requeridos. Destaca-se que a injeção de corrente é feita, para efeitos de teste, através de uma fonte de bancada.

TABELA II. NÚCLEOS INDUTOR FIXO

Núcleo	Volume [mm³]	Peso [g]	A_w [mm²]	A_e [mm²]
EE 42/21/20	23300	56	157	240
T77894A7	4150	26	156	65,4

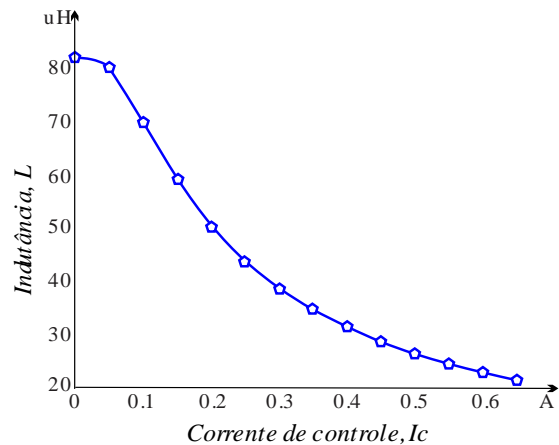


Figura 9. Variação da indutância em função da injeção de corrente

A redução de volume do núcleo utilizado nesta técnica é possível observando (11), onde, em virtude da injeção de corrente no enrolamento auxiliar, sob condição de máxima potência, a indutância a ser considerada será a mínima que garanta BCM neste ponto de operação. Com isso, o índice $A_e A_w$ será reduzido, possibilitando assim empregar um núcleo com dimensões menores.

Com a aplicação de (9) obtém-se um número de 100 espiras para o enrolamento auxiliar, distribuídos igualmente nas extremidades do núcleo, com nível de corrente CC em 0,6 A para máxima variação de indutância. A figura 9 mostra a faixa de variação resultante. Para a aplicação desta técnica é possível a construção do indutor aplicando um núcleo de ferrite EE30/15/14.

Aplicando a técnica de indutância variável utilizando núcleo *iron powder* toroidal, inicialmente considera-se o valor de indutância de 81,06 μH para mínima potência (200 W/m^2). Observa-se então a capacidade de variação da indutância. Esta possibilidade passa pela escolha do material com maior permeabilidade inicial, observando maior variação de indutância com menores níveis de corrente.

Considerando a variação de indutância natural a aplicação de corrente no enrolamento principal, é possível a utilização de um núcleo com menores dimensões. A máxima variação neste caso é obtida através de método teórico, utilizando a equação da curva de variação de permeabilidade disponibilizada pelo fabricante. Desta forma obtém-se o valor máximo de variação da indutância, e observa-se a energia armazenada para escolha do núcleo, resultando em um núcleo *iron powder* 77310A7, com permeabilidade inicial de 125 μ .

A tabela III mostra as características físicas dos indutores projetados. A figura 10 mostra a comparação dos resultados frente a utilização núcleos com permeabilidades iniciais diferentes para a aplicação no conversor. Com o material utilizado, de

TABELA III. NÚCLEOS INDUTOR VARIÁVEL

Núcleo	Volume [mm ³]	Peso [g]	A_w [mm ²]	A_e [mm ²]
EE 30/15/14	8174	21	85	122
T77310A7	1800	12	139	31,7

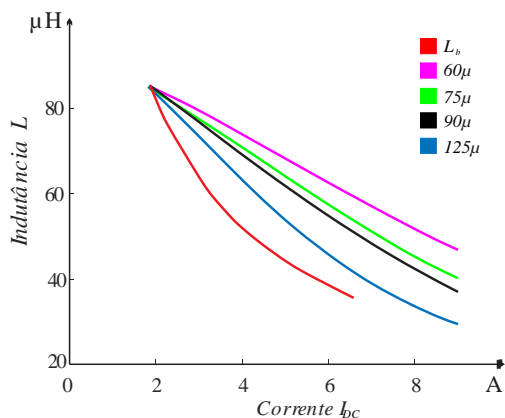


Figura 10. Comparativo da Indutância crítica do conversor *buck-boost* com a variação de indutância para diferentes permeabilidades

permeabilidade inicial mais alta, é possível atingir uma faixa de variação de indutância de 81,06 μH – 40,54 μH .

5 Resultados experimentais

Esta seção trata dos resultados experimentais obtidos com a aplicação dos projetos tanto de indutância variável, como indutância fixa para aplicação em um conversor *buck-boost* aplicado como MPPT.

A figura 11 mostra o circuito esquemático do sistema implementado. Obteve-se os resultados experimentais de tensão e corrente de entrada, bem como corrente sobre o indutor nas diferentes configurações propostas, aplicação de um indutor com indutância fixa garantindo CCM em núcleo de ferrite duplo E, aplicação de um indutor com indutância garantindo CCM em núcleo *iron powder* toroidal, indutor com indutância variável em núcleo de ferrite duplo E, e indutor com indutância variável em núcleo *iron powder* toroidal. Obtém-se também um comparativo de rendimento para todas estas configurações, apresentados na tabela IV.

Com a finalidade de emular o comportamento de tensão e corrente produzidas por um módulo fotovoltaico de 85 Wp SPM085P, fabricado pela empresa *Solartech*, foi utilizado o emulador E4360A do fabricante *Agilent Technologies*.

As figuras 12 e 13 mostram os resultados obtidos, para tensão e corrente de entrada do conversor, bem como a corrente sobre o indutor, para a aplicação do indutor projetado em núcleo de ferrite duplo E, para condição de indutância fixa, sob irradiâncias emuladas de 200 W/m^2 e 1000 W/m^2 . Sob esta condição o indutor projetado EE42/21/20 apresenta um volume referente ao núcleo de 23300 mm^3 .

Em virtude de os resultados para tensão e corrente de entrada do conversor, bem como a corrente sobre o indutor variável com núcleo duplo E no ponto de 200 W/m^2 serem idênticos a aplicação do núcleo para indutância fixa a figura 14 mostra o resultado para o ponto de máxima potência ou 1000 W/m^2 para a aplicação do indutor projetado em núcleo duplo E, com indutância variável frente a aplicação de corrente CC em um enrolamento auxiliar. Sob esta condição o indutor projetado EE30/15/14 apresenta um volume referente ao núcleo de 8174 mm^3 .

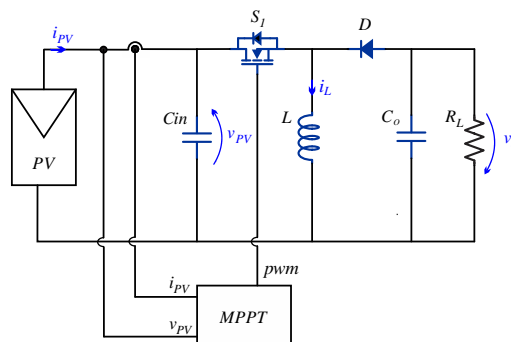


Figura 11. Sistema proposto

As figuras 15 e 16 mostram os resultados obtidos, para tensão e corrente de entrada do conversor, bem como a corrente sobre o indutor, para a aplicação do indutor projetado em núcleo *iron powder* toroidal para condição de indutância fixa, sob irradiâncias emuladas de 200 W/m² e 1000 W/m². Sob esta condição o indutor projetado T77894A7 apresenta um volume referente ao núcleo de 4150 mm³.

As figuras 17 e 18 mostram os resultados obtidos, para tensão e corrente de entrada do conversor, bem como a corrente sobre o indutor, para a aplicação do indutor projetado em núcleo *iron powder* toroidal para condição de indutância variável, sob irradiâncias emuladas de 200 W/m² e 1000 W/m². Sob esta condição o indutor projetado T77310A7 apresenta um volume referente ao núcleo de 1800 mm³.

Ao primeiro ponto de análise comparativa, o volume, é claro a possibilidade de redução observando as técnicas de indutância variável, com a utilização de mesmo formato de núcleo. Na aplicação desta técnica, comparando os resultados na utilização de núcleos de ferrite do tipo duplo E, constata-se uma redução de 64%. Na aplicação da técnica de variação de indutância considerando a utilização de núcleos *iron powder* toroidais é possível a redução em 56%.

É importante analisar também a comparação frente a utilização de núcleos de ferrite ou núcleos *iron powder* para esta aplicação, onde há a possibilidade de redução de volume mesmo considerando uma indutância fixa, que é possível frente ao fato dos núcleos em *iron powder* apresentarem maior nível possível de saturação (neste caso 1 T) se comparados ao ferrite (0,48 T).

O segundo ponto de análise, o rendimento total do conversor, é apresentado pela tabela IV. Com a aplicação da técnica de indutância variável em núcleos de ferrite do tipo duplo E, há uma perda inerente a aplicação de corrente nos enrolamentos auxiliares. Desta forma o rendimento total do conversor é penalizado em até 5% para o maior nível de potência. Esta diferença torna-se menor em níveis de potência menores, onde há, conseqüentemente, menor injeção de corrente CC nos enrolamentos auxiliares.

Para a aplicação da técnica de variação de indutância em núcleos *iron powder* toroidais, constata-se menores níveis de perda de rendimento, em comparação com a técnica de indutância fixa, onde o conversor é penalizado em até 2% no ponto de maior potência.

Comparando as duas técnicas de indutância variável há a relevante vantagem da utilização em núcleo *iron powder* toroidal. Mesmo com menor redução de volume relativa, os índices de rendimento são melhores, se comparado a utilização de núcleos de ferrite. Além disso há a possibilidade de variação de corrente sem a necessidade de aplicação de corrente CC em enrolamentos auxiliares. Em contrapartida, esta variação de indutância não é controlada, sendo inerente a injeção de corrente em seu enrolamento auxiliar.

A figura 19 mostra o protótipo do conversor proposto, bem como o comparativo entre os indutores construídos.

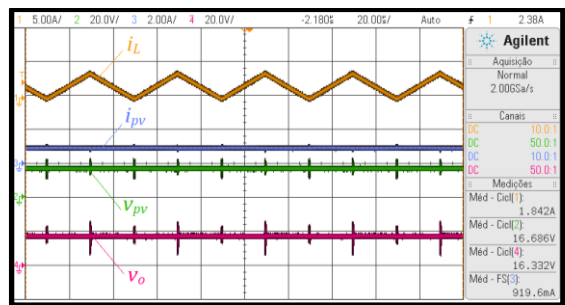


Figura 12. Resultados obtidos para operação em 200 W/m² com aplicação de um indutor fixo e variável de núcleo duplo E

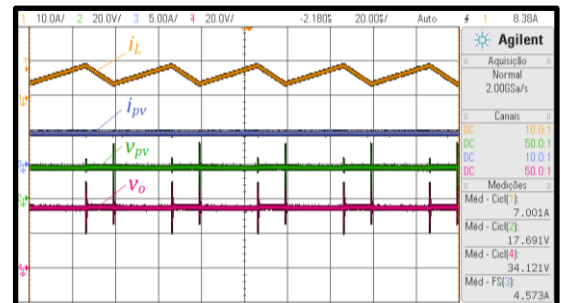


Figura 13. Resultados obtidos para o ponto de operação em 1000 W/m² para aplicação de um indutor fixo com utilização de núcleo duplo E

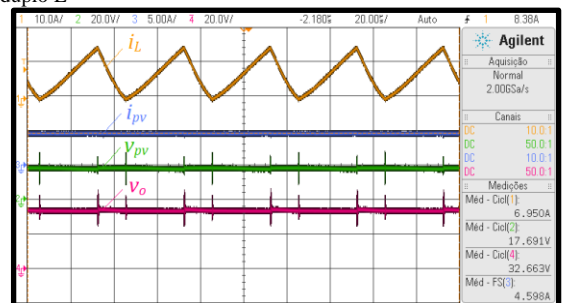


Figura 14. Resultados obtidos para o ponto de operação em 1000 W/m² para aplicação de um indutor variável com utilização de núcleo duplo E

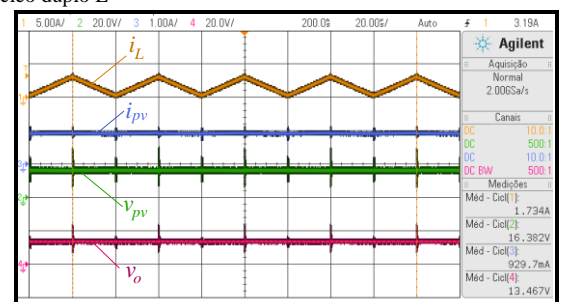


Figura 15. Resultados obtidos para o ponto de operação em 200 W/m² para aplicação de um indutor fixo com utilização de núcleo *iron powder* toroidal

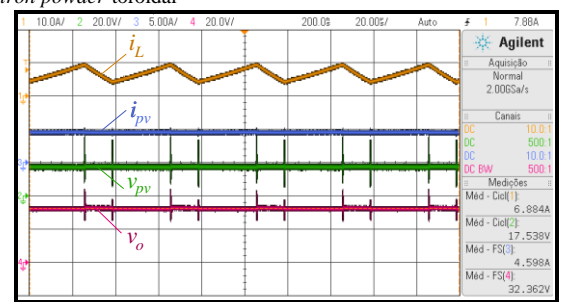


Figura 16. Resultados obtidos para o ponto de operação em 1000 W/m² para aplicação de um indutor fixo com utilização de núcleo *iron powder* toroidal

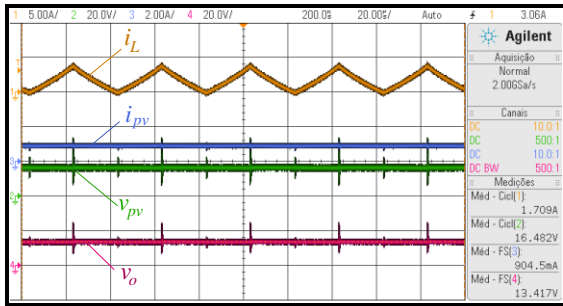


Figura 17. Resultados obtidos para o ponto de operação em 200 W/m² para aplicação de um indutor variável com utilização de núcleo *iron powder* toroidal

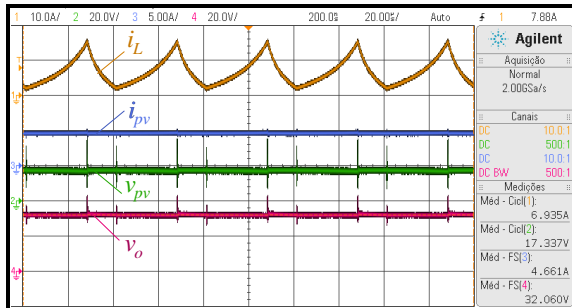


Figura 18. Resultados obtidos para o ponto de operação em 1000 W/m² para aplicação de um indutor variável com utilização de núcleo *iron powder* toroidal

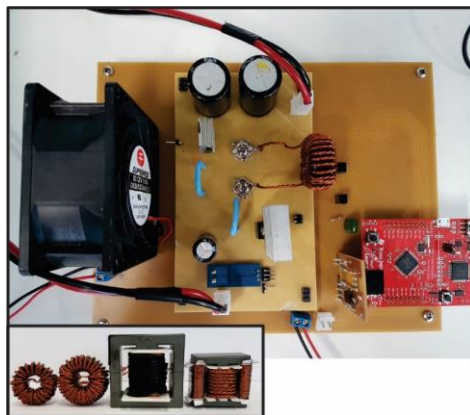


Figura 19. Protótipo do conversor e comparativo dos indutores aplicados.

TABELA IV . RESULTADOS DE RENDIMENTO

Potência	Rendimento (%)			
	EE 42/21/20	EE 30/15/14	T77894A7	T77310A7
200 W/m ²	91,807%	91,328%	91,729%	90,464%
400 W/m ²	91,902%	88,963%	91,810%	90,275%
600 W/m ²	91,420%	87,022%	91,127%	89,694%
800 W/m ²	90,604%	85,589%	90,522%	88,795%
1000 W/m ²	89,912%	84,300%	89,547%	87,366%

6 Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise de diferentes técnicas de projeto do componente magnético do

filtro de saída de um conversor *buck-boost* aplicado como MPPT de um sistema fotovoltaico. Foi proposto a utilização de um indutor com indutância variável com a finalidade de redução de volume, comparando os resultados com a aplicação de técnicas de indutância fixa, tanto para utilização de núcleos de ferrite como para núcleos *iron powder*. Ficou claro a possibilidade de redução de volume em até 64% com a utilização de um núcleo de ferrite duplo E e 56% com a utilização de um núcleo toroidal *iron powder*. Constatou-se também melhores resultados quanto ao rendimento total do conversor com a utilização da técnica de indutância variável com núcleo toroidal *iron powder*, frente a técnica com núcleo de ferrite duplo E para esta aplicação.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, CAPES e FAPERGS. Este trabalho é fomentado pelo Governo Brasileiro através do programa PROEX, PRPGP/UFSM, INCT-GD, CNPq processos 465640/2014-1, 311911/2015-3, 409632/2016-3, CAPES processo 23038.000776/2017-54 e FAPERGS processo 17/2551-0000517-1

Referências Bibliográficas

- Azevedo, G. M. S., Cavalcanti, M. C., Oliveira, K. C., Neves, F. A. S., & Lins, Z. D. (2008). Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems. In *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE* (pp. 1456–1462). <https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4592141>
- Barbi, I. (2001). *Eletrônica de Potência: Projetos de Fontes Chaveadas*. Edição do Autor.
- Brown, M. (2008). *Power Sources and Supplies: World Class Designs. Power Sources and Supplies: World Class Designs*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8626-6.X0001-4>
- Coelho, R. F., Concer, F., & Martins, D. C. (2009). A study of the basic DC-DC converters applied in maximum power point tracking. In *Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian* (pp. 673–678). <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347723>
- Hamza, D., Qiu, M., & Jain, P. K. (2013). Application and stability analysis of a novel digital active emi filter used in a grid-tied pv microinverter module. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6), 2867–2874. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2219074>
- Hurley, W. G., & Wölfle, W. H. (2013). *Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications. Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications*.

- <https://doi.org/10.1002/9781118544648>
- Kazimierczuk, M. K. (2012). *Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters. Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters.* <https://doi.org/10.1002/9780470694640>
- Magnetics. (2017). Magnetics Powder Core Catalog, 104.
- Mclyman, C. W. M. T. (2011). Power Transformer Design. In *Transformer and Inductor Design Handbook, Fourth Edition* (pp. 1–30). <https://doi.org/10.1201/b10865-8>
- Perdigao, M. S., Menke, M. F., Seidel, A. R., Pinto, R. A., & Alonso, J. M. (2016). A review on variable inductors and variable transformers: Applications to lighting drivers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(1), 531–547. <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2483580>
- Zhang, L., Member, S., Hurley, W. G., & W, W. H. (2011). A New Approach to Achieve Maximum Power Point Tracking for PV System With a Variable Inductor, 26(4), 1031–1037.