

INTEGRAÇÃO DOS CONVERSORES BUCK-BOOST E FORWARD PARA ACIONAMENTO DE LEDs VISANDO APLICAÇÕES DE ILUMINAÇÃO CIRCADIANA

Bruno Facco Almeida, Thaís Ertmann Bolzan, Marcelo Weber Contri, Vitor Cristiano Bender
Centro de Tecnologia
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil

Resumo — Este artigo detalha o procedimento de integração, incluindo projeto e simulação, de um conversor Buck-Boost atuando na correção do fator de potência (PFC) e de um conversor Forward como controlador de potência (PC). O circuito de conversores integrados é responsável por alimentar uma carga de LEDs que emitem luz de temperatura de cor distinta, possibilitando aplicações de iluminação circadiana. Resultados são mostrados a partir da análise das formas de onda utilizando o software PSIM, no qual foi observado boa correspondência entre os resultados teóricos e de simulação, validando o projeto proposto.

Palavras-Chave — Conversor Forward, Buck-Boost, PFC, LEDs, integração de conversores estáticos, conversor DC-DC.

I. INTRODUÇÃO

Diodos Emissores de Luz (LEDs) são uma tecnologia que está cada vez mais se consolidando nos sistemas de iluminação [1][2]. Eles são empregados em diferentes aplicações, devido à elevada eficácia luminosa, alta durabilidade e baixo impacto ambiental [3][4]. Em virtude da sua popularização, muitas áreas de pesquisa são criadas utilizando essa tecnologia, entre elas o desenvolvimento de circuitos eletrônicos para acionamento de LEDs e a possibilidade de ajuste da iluminação em aplicações específicas como a circadiana, que ajusta a temperatura de cor da luz de acordo com o ciclo circadiano humano [5].

Os LEDs são dispositivos incapazes de controlar sua própria corrente quando acionados a partir de uma fonte de tensão, portanto necessitam de um circuito entre a fonte de energia e a carga capaz de controlar a corrente fornecida [6]. Com esse objetivo existem diversos conversores estáticos concebidos para diferentes aplicações [7]. Por exemplo, os conversores CC-CC *Buck* e *Forward*, são interessantes pois possuem característica de rebaixadores de tensão, podendo adequar um nível maior de tensão ao nível de tensão dos LEDs que normalmente é reduzido [8]. No entanto, tais conversores CC-CC não podem ser conectados diretamente à rede elétrica sem um estágio retificador e de correção do fator de potência quando a manutenção da qualidade de energia é importante.

Os conversores PFC transformam a tensão alternada para contínua, além de corrigir o fator de potência e não subutilizar a rede [9][10]. Além disso, conversores que possuem a característica de serem fontes de corrente, capazes de manter a corrente constante ou com baixa ondulação na saída, são

preferíveis para utilização com cargas que necessitam controlar a corrente, como os LEDs por exemplo, estes conversores normalmente são empregados em um estágio denominado controle de potência (PC) [11].

Esse artigo apresenta o projeto e simulação de um conversor CC-CC rebaixador *Forward* integrado à um estágio PFC constituído de um conversor *Buck-Boost*, conectado à rede elétrica, para alimentar uma carga de LEDs. Essa carga consiste de dois conjuntos ligados em série, sendo 10 LEDs com temperatura de cor correlata (CCT) de 6500K e 10 LEDs de 4000K de CCT, totalizando 120 V de tensão de alimentação e uma corrente máxima de 150 mA para garantir o nível máximo de fluxo luminoso. Esta configuração utilizando LEDs com duas TCCs distintas, possibilita o uso de LEDs em aplicações de iluminação circadiana, utilizada em ambientes onde deseja-se evitar o efeito da iluminação artificial nos hormônios que regulam a atividade e o sono humano [12].

II. CONVERSOR FORWARD

O conversor *Forward* é uma topologia de conversor rebaixador de tensão, assim como o *Buck*, porém com uma entrada isolada da saída, a partir da presença de um transformador, além de possuir um indutor desmagnetizante que descarrega a corrente do transformador em cada etapa do chaveamento do conversor [11]. Na figura 1 é apresentado o conversor *Forward*, adaptado de [13].

A característica de ser um conversor isolado que atua como fonte de corrente, são diferenciais para aplicações com carga de LEDs. Este fato atende os requisitos da norma NBR IEC 61347-1 seção 4, que impõe a necessidade de isolamento da carga de LEDs em relação ao circuito de tensão primário, tornando este conversor apto para aplicação em luminárias comerciais.

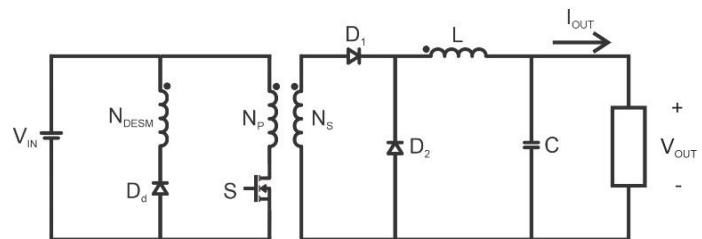


Fig 1. Conversor *Forward*.

O conversor *Forward* possui 3 etapas de funcionamento, que são controladas pelo interruptor de comutação (S) do circuito [14][15]. Na figura 3 é representada a primeira etapa, que descreve o funcionamento do circuito com o interruptor fechado. Nessa etapa é transferida a energia do primário (N_p) para o secundário do transformador (N_s), carregando o indutor de filtro (L).

Na segunda etapa, o interruptor está aberto e a corrente que circula no transformador da etapa anterior é descarregada no indutor de desmagnetização (N_{DESM}), até iniciar o próximo ciclo de comutação [16]. Essa etapa está representada na figura 3. Já a terceira etapa é mostrada na figura 4. O interruptor ainda está aberto e a energia armazenada no indutor (L) é descarregada, alimentando a carga de saída. O diodo de roda livre (D_2) garante a circulação de energia na carga nessa etapa.

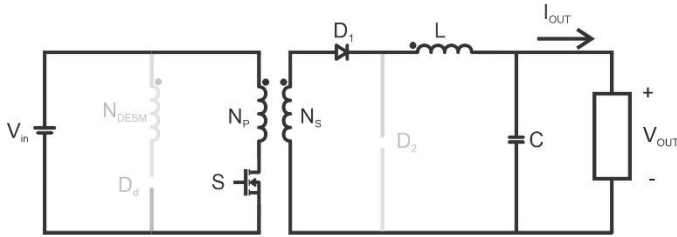


Fig 2. Etapa 1 de operação (Interruptor fechado).

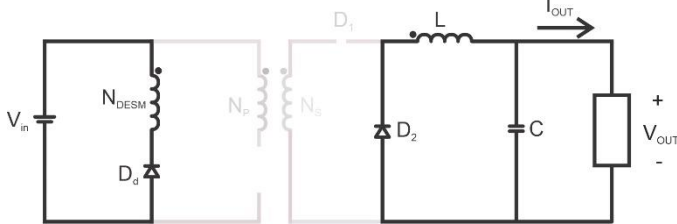


Fig 3. Etapa 2 de operação (Interruptor aberto).

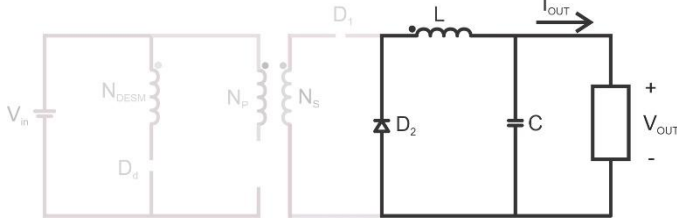


Fig 4. Etapa 3 de operação (Interruptor aberto).

Assim como outros conversores, o *Forward* possui dois modos de operação, o modo CCM (*Continuous Conduction Mode*) e o modo DCM (*Discontinuous Conduction Mode*). Dependendo da razão cíclica aplicada na chave e do valor da indutância do indutor de desmagnetização, o conversor opera em um desses modos. Analisando as formas de onda para descarregamento da corrente do N_{DESM} em cada etapa de operação, recomenda-se uma razão cíclica de operação menor que 0,5 para operação em CCM [17].

A utilização do modo CCM traz vantagens relacionadas principalmente ao projeto dos componentes, onde equações como o ganho do conversor são independentes do tipo de carga, e traz facilidades também na modelagem da função de transferência do circuito para projeto do controlador.

As principais formas de onda do modo CCM do conversor *Forward* são demonstradas na figura 5. As formas de onda representam de cima para baixo respectivamente o sinal de

comando do interruptor de comutação (G_s), corrente no indutor de filtro (i_L), tensão na saída (V_{OUT}), corrente no interruptor (i_s), corrente no indutor de desmagnetização (i_D) e tensão no interruptor (V_s).

A partir das etapas de operação e análise das formas de onda de cada etapa, chega-se nas equações para projeto dos componentes do conversor *Forward* [18]. Conforme a equação 1 o ganho do conversor está diretamente relacionado com a relação de espiras, sendo esse ganho diretamente proporcional a variação da razão cíclica (D) do interruptor do conversor.

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{D \cdot N_p}{N_s} \quad (1)$$

Onde:

V_{IN} = Tensão de entrada;

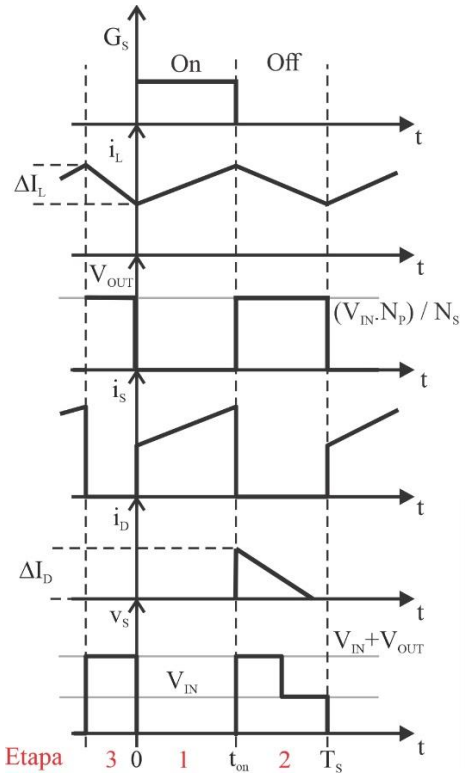


Fig 5. Formas de onda do conversor *Forward* no modo CCM.

Além do cálculo de componentes de filtro de saída (capacitor e indutor), nesse conversor é necessário projetar o transformador. Para o projeto do transformador considera-se o projeto do número de espiras do primário e secundário além do indutor de desmagnetização,

A partir da relação de espiras e razão cíclica da equação 1, calcula-se o número de espiras do primário (equação 2), secundário (equação 3) e desmagnetização (equação 4), além da indutância do primário (equação 5) para conseguir calcular a indutância de desmagnetização (equação 6).

$$N_p = \frac{V_{IN} \cdot D}{Ae \cdot \Delta B \cdot f} \quad (2)$$

$$N_S = \frac{N_P \cdot V_{OUT}}{D \cdot V_{IN}} \quad (3)$$

$$N_{DESM} = \frac{N_P \cdot D}{(1-D)} \quad (4)$$

Onde:

Ae (Área transversal efetiva)

N_{DESM} = Número de espiras do indutor de desmagnetização.

ΔB = Variação do fluxo magnético;

$$L_P = \frac{V_{IN} \cdot D}{(0,2 \cdot I_{PICO}) \cdot f} \quad (5)$$

Onde:

L_P = Indutância do primário;

I_{PICO} = corrente de pico.

$$L_{DESM} = \frac{L_P}{\left(\frac{N_P}{N_{DESM}}\right)^2} \quad (6)$$

Onde:

L_{DESM} = Indutância de desmagnetização.

Além do cálculo dos elementos que compõem o transformador, é necessário calcular os elementos responsáveis pela filtragem da tensão e corrente do conversor. Constituído pelo indutor e capacitor de filtro que dependem da razão cíclica mínima (D_{MIN}) calculada na equação 7. Na equação 8 é calculado o indutor de saída do conversor, onde o principal fator é a ondulação de corrente que se quer obter na saída do conversor. Na equação 9 é calculado o capacitor de saída onde o principal fator é a ondulação de tensão na saída do conversor e também o valor do indutor de filtro.

$$D_{MIN} = \frac{V_{OUT}}{\left[\frac{N_S}{N_P} \cdot V_{IN} \cdot 1,15 \right]} \quad (7)$$

$$L = \frac{V_{OUT} \cdot (1 - D_{MIN})}{\Delta I_L \cdot I_{OUT} \cdot f} \quad (8)$$

Onde:

L = Indutor de filtro;

ΔI_L = Variação da corrente no indutor de filtro;

I_{OUT} = Corrente de saída.

$$C = \frac{1}{8} \cdot \frac{1 - D_{MIN}}{f^2 \cdot L \cdot \Delta V_{OUT}} \quad (9)$$

Onde:

C = Capacitor de filtro;

ΔV_{OUT} = Variação da tensão de saída.

III. ESTÁGIO PFC

O conversor *Forward* será empregado no controle de potência (PC) como um estágio de rebaixamento da tensão. No entanto, para ser conectado à rede elétrica, necessita ser precedido por um conversor PFC, para isso foi utilizado um conversor *Buck-Boost*, representado na figura 6 [19]. Devido ao fato de ambos conversores possuírem um interruptor para chaveamento, propôs-se uma topologia que integra os dois conversores com apenas um interruptor.

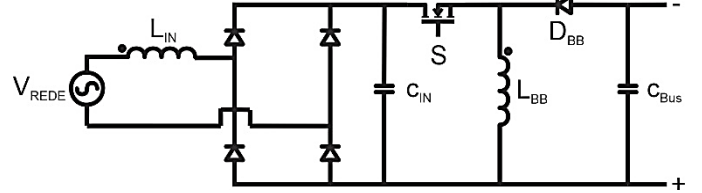


Fig 6. Conversor *Buck-Boost* com ponte retificadora conectada à rede elétrica.

Para o projeto do conversor *Buck-Boost*, leva-se em conta a tensão de entrada (V_{REDE}) e também a tensão no barramento que conecta os conversores (V_{BUS}). Além disso, escolhe-se uma razão cíclica menor que 0,5 para que o conversor opere em modo DCM, para manter a tensão no barramento independente da variação da razão cíclica [20].

Para o cálculo dos componentes, como o indutor de saída (L_{BB}) (equação 11) e capacitor de saída (C_{BUS}) (equação 12) do conversor *Buck-Boost*, define-se a razão cíclica de operação a partir do cálculo da razão cíclica máxima (D_{MAX}) (equação 10). No cálculo do capacitor (C_{BUS}), determina-se que a capacitância limitará a ondulação de tensão de baixa frequência do barramento e consequentemente a oscilação da corrente na saída dos LEDs [21].

$$D_{MAX} = \frac{V_{BUS}}{V_{BUS} + V_{REDE}} \quad (10)$$

$$L_{BB} = \frac{D^2 \cdot V_{REDE}^2}{4 \cdot P_{IN} \cdot f} \quad (11)$$

$$C_{BUS} = \frac{D^2 \cdot V_{REDE}^2}{8 \cdot \pi \cdot V_{BUS} \cdot L_{BB} \cdot \Delta V_{BUS} \cdot f \cdot f_R} \quad (12)$$

Onde:

V_{REDE} = Tensão máxima da Rede;

V_{BUS} = Tensão Barramento;

P_{IN} = Potência de Entrada

ΔV_{BUS} = Variação da Tensão de Barramento;

f = Frequência de Chaveamento;

f_R = Frequência da Rede.

Além do cálculo dos componentes de filtro da saída do conversor *Buck-Boost*, é necessário calcular o filtro da entrada do conversor, para eliminar as harmônicas de alta frequência da rede que podem causar a redução do fator de potência (FP) do

conversor [22]. Esse filtro de segunda ordem é constituído de um capacitor (C_{IN}) e um indutor (L_{IN}).

$$L_{IN} = \frac{1}{\omega_C^2 \cdot C_{IN}} \quad (13)$$

Onde:

ω_C = Frequência Angular de Corte;

$$\omega_C = 2\pi \cdot \left(\frac{f}{10} \right) \quad (14)$$

$$C_{IN} = \frac{1}{2 \cdot \xi \cdot \omega_C \cdot R_{EQUIV}} \quad (15)$$

Onde:

ξ = Coeficiente de Amortecimento;

R_{EQUIV} = Resistência Equivalente vista pela Rede.

Analisando pelo ponto de vista de rede, o conversor é considerado uma carga resistiva, logo, o cálculo de R_{EQUIV} é dado pela equação 16:

$$R_{EQUIV} = \frac{2 \cdot L_{BB} \cdot f}{D^2} \quad (16)$$

As topologias integradas levam em conta o comportamento do conversor e principalmente o fluxo de energia pelos interruptores, o que resulta em diferentes tipos de conexões, dependendo da relação entre os conversores [23]. Na figura 7 é representado os tipos de conexões entre os interruptores, no qual para a integração em questão utilizou-se a conexão D-D do tipo I-T, que foi alcançada seguindo os passos ilustrados na figura 8.

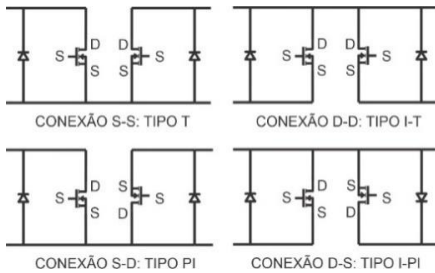


Fig 7. Tipos de conexões de chaves interruptoras [22].

Na figura 9 está representado o circuito final da integração de ambos conversores, conectado à rede, ao circuito retificador e a carga na saída.

IV. PROJETO DO CONVERSOR

Para o projeto do conversor, conforme as equações citadas na seção II e III, deve-se definir os parâmetros do projeto para a carga de LEDs determinada. Dessa forma, define-se as características elétricas do conversor, da carga e parâmetros para projeto do transformador, descritos na tabela 1.

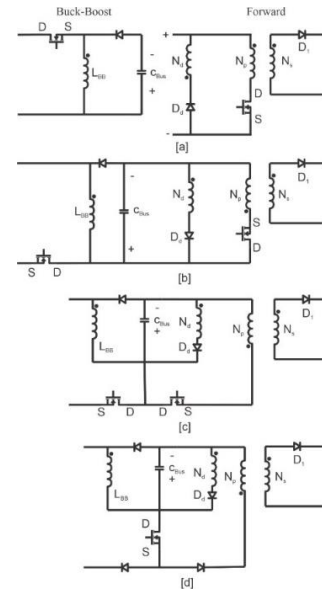


Fig 8. Integração Buck-Boost Forward – [a] circuito de cada conversor, [b] Inversão da entrada do Forward para conectar no Buck-Boost, [c] Conexão dos interruptores de ambos circuitos com o Dreno em comum, [d] Utilização da conexão do tipo I-T para reduzir o número de componentes e conectar ambos conversores.

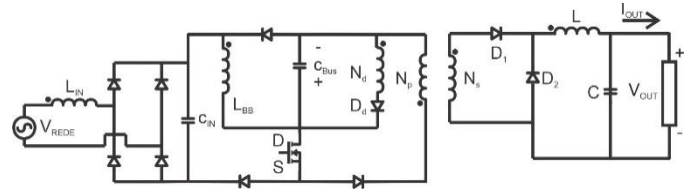


Fig 9. Circuito resultante da integração do Buck-Boost com o Forward.

A utilização do conversor *Buck-Boost Forward* para uma aplicação de LEDs traz diversas vantagens, além das que já foram citadas em relação as características do *Forward*, o *Buck-Boost* tem como principal destaque o número reduzido de componentes comparado com outros conversores utilizados para a mesma função, reduzindo perdas e aumentando a eficiência do conversor como um todo, sendo uma combinação que traz benefícios para a aplicação de uma carga de LEDs.

TABELA 1. PARAMETROS ELÉTRICOS

Especificações	Valor
Tensão RMS de entrada (V_{REDE})	220V
Frequência da Rede (f_R)	60 Hz
Tensão de Barramento (V_{BUS})	400 V
Variação da tensão de barramento (ΔV_{BUS})	10 V
Coeficiente de amortecimento (ξ)	0,707
Tensão de saída (V_{OUT})	120 V
Corrente de saída (I_{OUT})	0,150 A
Variação da corrente de saída (ΔI_L)	1%
Variação da tensão de saída (ΔV_{OUT})	5%
Frequência de Chaveamento (f)	40 kHz
<i>Duty Cycle</i> máximo (D_{MAX})	0,45
Rendimento Teórico (η)	0,9

A escolha do *ripple* de 1% de corrente, está relacionado principalmente ao fato da carga ser chaveada em alta frequência e ser variável, afetando o controle do conversor para uma futura abordagem, devido a possíveis picos de corrente quando ocorrer a variação de carga, amenizando isso com um indutor de filtro maior.

A partir da definição dos parâmetros e a utilização das equações citadas anteriormente, utilizando um software matemático, desenvolveu-se um algoritmo para o cálculo dos elementos do conversor para posterior simulação, que estão descritos na tabela 2.

TABELA 2. COMPONENTES PROJETADOS

Componente	Valor
Número de espiras do primário (Np)	203 espiras
Número de espiras do secundário (Ns)	159 espiras
Número de espiras do indutor de desmagnetização (Ndesm)	273 espiras
Indutância de desmagnetização (Ldesm)	0,09365 H
Duty Cycle mínimo (Dmin)	0,26
Frequência Angular de Corte (ω_c)	25,133 rad/s
Indutor de Filtro da Rede (L _{IN})	150 mH
Capacitor de Filtro da Rede (C _{IN})	11 nF
Indutor Buck-Boost (L _{BB})	6,75 mH
Capacitor Buck-Boost (C _{BUS})	18 uF
Indutor (L)	1,48 H
Capacitor (C)	0,775 nF
Resistência (R)	800 Ω

V. SIMULAÇÃO DO CONVERSOR

Para a validação do projeto dos componentes empregou-se o software PSIM®, utilizando uma carga composta por 20 LEDs que possuem resistência individual de 4,724 Ω e uma tensão de limiar individual de 5,2863 V, parâmetros retirados do datasheet dos LEDs utilizados para teste prático, sendo dispostos 10 unidades em série conforme a figura 10. Essa configuração simula uma aplicação real onde se controla a corrente de cada grupo de LEDs pelos interruptores em paralelo através da modulação PWM, que regulam a CCT dos LEDs aplicados na otimização do ciclo circadiano humano afetado pela iluminação [24].

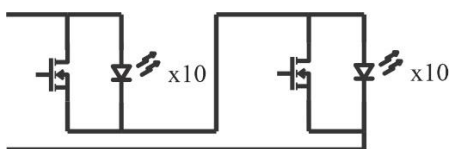


Fig 10. Configuração da carga de LEDs com interruptores para controle da CCT visando aplicação em iluminação circadiana.

Na figura 11 está representado o conversor *Buck-Boost Forward* como utilizado no simulador. Para a simulação ser mais refinada, utilizou-se um modelo de LED não ideal,

levando em conta os parâmetros da seção 4 e também se escolheu-se valores de capacitor comercial para o conversor.

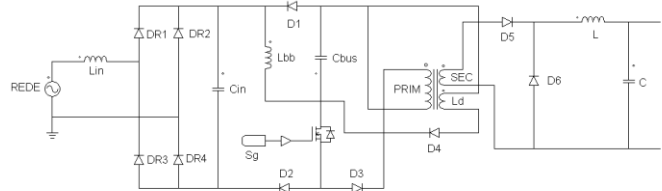


Fig 11. Conversor *Buck-Boost Forward* no PSIM®.

VI. RESULTADOS

A partir da configuração do conversor e da carga, simulou-se o conversor em malha aberta com razão cíclica fixa. Em relação a razão cíclica aplicada no interruptor, baseado no valor máximo definido na seção 4 e também simulações no PSIM®, o valor definido foi de 0,37. As figuras 12, 13 e 14 mostram os resultados de simulação obtidos configurados conforme a figura 11.

Analisando a figura 12, observa-se que com a carga de LEDs o valor de corrente teve uma pequena sobre-elevação até um valor de 160 mA, mas em regime permanente estabilizou o valor em 150 mA, tendo um valor de variação muito pequeno, devido aos componentes de filtro do circuito, e a tensão se manteve estabilizada no valor de 120 V.

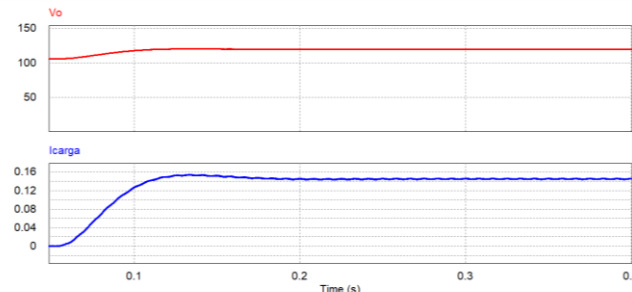


Fig 12. Formas de onda de tensão (vermelho) e corrente (azul) nos LEDs.

Na figura 13, observa-se a tensão no interruptor comparado com a razão cíclica aplicada no mesmo, onde os valores de tensão máximo foi de aproximadamente 1000 V e mínimo de 500 V, sendo a forma de onda semelhante à da figura 5. Uma possível solução para reduzir essa alta tensão na prática é utilizar um circuito *snubber*, que é comum na implementação do conversor *Forward*, porém diminuiria o rendimento do conversor, outra opção é utilizar mais de uma chave para acionar o conversor em cada ciclo, porém isso aumentaria o número de componentes e perdas por chaveamento.

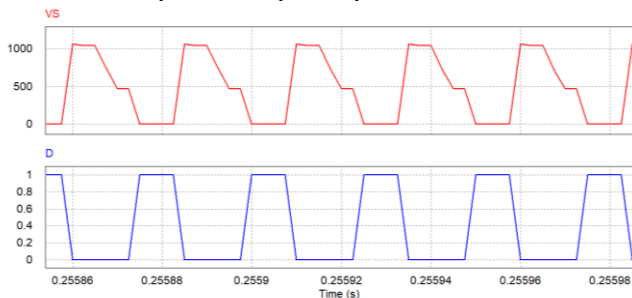


Fig 13. Formas de onda da tensão na chave (vermelho) e da razão cíclica (azul) aplicada na chave.

Na figura 14 analisa-se os valores máximos e mínimos de tensão e corrente na saída. Os valores médios foram de 119,5 V para a tensão e 146,05 mA para a corrente na carga, ambos ficaram com o valor próximo ao estipulado de referência, conforme na tabela 1.

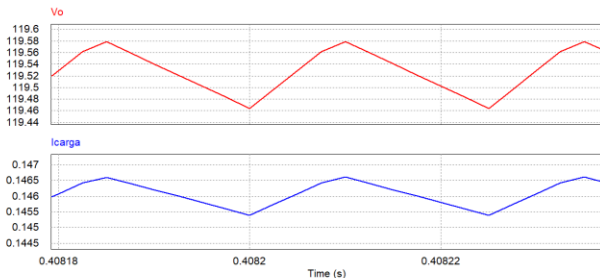


Fig 14. Visualização do valor máximo e mínimo da tensão (vermelho) e corrente (azul) na saída.

VII. CONCLUSÃO

A partir da análise detalhada das formas de onda e equações de projeto do conversor *Buck-Boost e Forward*, projeto de uma topologia que integra ambos conversores, com o projeto dos componentes para uma determinada carga de LEDs e posterior simulação e visualização das formas de onda, observa-se que as equações, algoritmo para cálculo dos componentes e simulação comprovam que os elementos foram projetados de forma correta para as especificações de projeto requeridas.

Além disso, devido ao fato da carga de LEDs possuir interruptores para controle CCT conforme mostrado na figura 10, para a modulação da corrente que vai para os LEDs, optou-se para o projeto de um indutor maior e o projeto de um capacitor menor, para diminuir os picos de corrente na saída devido a comutações, e assim evitar problemas de falha e sobreaquecimento de componentes e também possíveis problemas futuros para controle dessa corrente, devido a variação da carga e descarregamento da carga do capacitor em cada ciclo de operação do conversor.

Os autores agradecem o apoio financeiro Universal CNPq Proc 425794-2018-0 e da FAPERGS e o apoio técnico do INCT-GD.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Bomilcar and G. Blum, "O LED e o mercado em expansão", Dezembro 2020.
- [2] International Institute for Industrial Environmental Economics [IIIEE], "LED's Light the Future – Showcasing Models of Innovative Lighting Solutions", p. 3, 2020.
- [3] M. H. Crawford, "LEDs for Solid-State Lighting: Performance Challenges and Recent Advances," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 15, no. 4, pp. 1028-1040, July-Aug. 2009.
- [4] N. Hinov, P. Tsankov and H. Ibrishimov, "Innovative LED Lighting," 2019 International Conference on Creative Business for Smart and Sustainable Growth (CREBUS), Sandanski, Bulgaria, 2019, pp. 1-5.
- [5] M. G. Figueiro, K. Gonzales and D. Pedler, "Designing with Circadian Stimulus", Oct. 2016.
- [6] K. H. Loo, Y. M. Lai, S. Tan and C. K. Tse, "On the Color Stability of Phosphor-Converted White LEDs Under DC, PWM, and Bilevel Drive," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 2, pp. 974-984, Feb. 2012.
- [7] A. Bubovich, "The comparison of different types of DC-DC converters in terms of low-voltage implementation," 2017 5th IEEE Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), Riga, 2017, pp. 1-4.
- [8] B. Singh and G. D. Chaturvedi, "Comparative Performance of Isolated Forward and Flyback AC-DC Converters for Low Power Applications," 2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, New Delhi, 2008, pp. 1-6.
- [9] A. L. Kirsten, "Reator Eletrônico para Lâmpadas de Descarga em Alta Pressão baseado no Conversor Biflyback Inversor", 2011.
- [10] R. A. Pinto, "Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias", 2012.
- [11] C. A. Petry, "Introdução aos Conversores CC-CC," Aug. 2001.
- [12] R. Castañeda, "Circadian Rhythm Light Watch," 2019 IEEE International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR), Houston, TX, USA, 2019, pp. D3-1-1-D3-1-4, doi: 10.1109/ISMCR47492.2019.8955710.
- [13] L. M. Jr and W. Komatsu, "NOTAS DE AULA Conversores CC/CC", 2015.
- [14] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, "Power Electronics, Converters, Applications and Design", 3° ed, 2003.
- [15] I. Barbi, "Projeto de fontes chaveadas", 1997.
- [16] D. W. Hart, "Power Electronics", 2011.
- [17] J. C. Giacomini, P. F. S. Costa, A. M. S. S. Andrade, L. Schuch and M. L. S. Martins, "Desenvolvimento de um conversor CC-CC Boost integrado para aplicações com elevado ganho de tensão", v. 22, n. 2, p. 206-214, apr./jun. 2017.
- [18] C. Arbo and B. Cousin, "Analysis and design of a Forward Converter", 2006.
- [19] I. M. Safwat and W. Xiahua, "Comparative study between passive PFC and active PFC based on Buck-Boost conversion," 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, 2017, pp. 45-50.
- [20] J. M. Alonso, J. Vina, D. G. Vaquero, G. Martinez and R. Osorio, "Analysis and Design of the Integrated Double Buck-Boost Converter as a High-Power-Factor Driver for Power-LED Lamps," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 4, pp. 1689-1697, April 2012.
- [21] Alonso, J. M. et al. Analysis and design of the integrated double buckboost converter as a highpower- factor driver for power-led lamps. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 59, n. 4, p. 1689-1697, 2012.
- [22] F. E. Bisogno, "Topologias para Iluminação Fluorescente, utilizando Conversores Eletrônicos Integrados empregando Compartilhamento de Chave Semicondutora", 2001.
- [23] T. -. Wu and Y. -. Chen, "A systematic and unified approach to modeling PWM DC/DC converters based on the graft scheme," Proceedings of the 1996 IEEE IECON. 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, Taipei, Taiwan, 1996, pp. 1041-1046 vol.2.
- [24] M. G. Figueiro, K. Gonzales and D. Pedler, "Designing with Circadian Stimulus", October 2016.