

Metodologia para a Análise da Eficiência de Conversores na Configuração em Cascata Parcial

Célio Antônio Degaraes*. Juliano de Pelegrini Lopes.**

*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR
e-mail: celiodegaraes@yahoo.br

** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, PR
e-mail: julianolopes@utfpr.edu.br

Abstract: This work presents a study on the efficiency of static power converters at partial cascade configuration. In the introduction, a contextualization of the problem is realized, as well the main points to be observed on the design of a practical application of this topology, intended for driver devices for LED lighting. A modeling for the indicated topology is proposed in order to study the efficiency of the pre-regulator and power controller set, which employs non-idealities that represent the real operating conditions. Simulations are performed in order to verify the behavior of the model and analyze the total efficiency. Finally, a prototype is implemented to validate the modeling and observe in practice the performance of the set of converters.

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo sobre a eficiência de conversores estáticos de potência na configuração em cascata parcial. Na parte introdutória é feita uma contextualização da problemática, bem como elencados os principais pontos a serem observados no projeto de uma aplicação prática desta topologia, destinada à dispositivos *drivers* para iluminação a LED. Uma modelagem para a topologia indicada é proposta para possibilitar o estudo da eficiência do conjunto do pré-regulador e controlador de potência, que emprega não idealidades que melhor representam as condições reais de operação. São feitas simulações a fim de se verificar comportamento do modelo e analisar a eficiência total. Por fim, um protótipo é implementado para se validar a modelagem e se observar na prática o desempenho do conjunto de conversores.

Keywords: Efficiency, partial cascade, modeling, split factor, CFP converter, CP converter.

Palavras-chaves: Eficiência, cascata parcial, modelagem, fator de reproprocessamento, conversor CFP, conversor CP.

1. INTRODUÇÃO

No conjunto dos elementos que compõem os dispositivos de iluminação a LED, o *driver* assume papel fundamental no processamento adequado da energia destinada ao acionamento dos LEDs. Uma vez que os LED's apresentam vida útil de cerca de 50000 horas, ou até maior, o *driver* deve ter durabilidade compatível (Almeida et al., 2015). Assim, um elemento menos durável, o tradicional capacitor eletrolítico de filtro empregado após a ponte retificadora, ou na saída dos conversores, é conhecido por ter a vida útil menor do que a dos LED's, sendo detrator da durabilidade dos dispositivos (Camponogara, 2015). Além disso, o capacitor eletrolítico utilizado na função de filtragem CA da rede de energia elétrica não é capaz de propiciar alto fator de potência. Por isso, em circuitos destinados a retificação da energia CA, há algum tempo, novas topologias vêm sendo propostas para dispensar o emprego do capacitor eletrolítico e atingir melhor fator de potência. Essas topologias são chamadas de Pré-Reguladores de Fator de Potência (PFP), ou Controladores de Fator de Potência (CFP), que geralmente utilizam conversores estáticos convencionais como o *boost* ou *buck-boost*, mas com uma estratégia de acionamento

diferente, para poder operar com a tensão senoidal retificada na entrada.

Tratando-se do acionamento dos LED's, é necessária uma corrente de nível CC, e quanto menor a ondulação, melhor serão atenuados os problemas como o *flicker* (cintilação) e também os impactos na vida útil do LED. Os conversores como CFP podem não atender a regulação de corrente necessária ao correto acionamento dos LED's, e por isso, outro conversor deve ser solicitado para trabalhar em conjunto, sendo este o chamado Controlador de Potência (CP).

As topologias convencionais, com dois conversores em cascata, apresentam um problema que é chamado na literatura de processamento redundante de energia, ou seja, toda a energia processada no conversor CFP é reproprocessada no estágio CP, impactando de forma negativa na eficiência do conjunto do *driver* (Cheung et al., 2008). Para se contornar o problema do processamento redundante de energia é sugerido na literatura um novo arranjo para os dois conversores, chamado de cascata parcial (Spiazzi, 2016) (Zogogianni et al., 2019). Assim, o segundo conversor, além de atuar na

regulação da tensão de saída, vai operar reprocessando parcialmente a energia demandada pela carga, contribuindo com um aumento da eficiência global do conjunto.

A configuração de conversores em cascata parcial mostra-se favorável na aplicação em questão, pois é possível obter elevado fator de potência e também uma sensível contribuição na eficiência geral do conjunto, além de boa regulação na corrente de saída. Contudo, alguns pontos ainda podem ser pesquisados e melhorados, como exemplo, uma modelagem em termos de eficiência. A metodologia clássica emprega parâmetros fixos para traçar a curva de eficiência geral, a qual, além de se observar o comportamento da eficiência conforme as eficiências individuais, também é empregada para se extrair o fator de reprocessamento desejado.

O presente trabalho trará como contribuição uma metodologia de análise da eficiência de conversores na configuração em cascata parcial. Como a maioria dos parâmetros dos conversores não podem ser alterados na metodologia clássica, uma modelagem de eficiência adequada é capaz de ajustá-los à medida que o fator de reprocessamento também é alterado, podendo assim, melhor representar as condições de não idealidades. A modelagem sugerida trará maior compreensão sobre a variação de parâmetros dos conversores e seus efeitos sobre a curva da eficiência total.

2. CONFIGURAÇÃO EM CASCATA PARCIAL

Na literatura existem várias configurações de reguladores CFP baseadas no chamado Processamento de Energia Redundante Reduzido (sigla R²P²), conceito que foi introduzido inicialmente por Tse e Chow (1998), Chow et al. (1999) e Tse e Chow (2000), com a proposta de várias configurações teoricamente possíveis. Posteriormente, em Cheung et al. (2010) foi apresentado um estudo das configurações primárias, das quais se originam as demais apresentadas em Tse e Chow (2000), e que pode-se encontrar trabalhos desenvolvidos. A Fig 1 mostra o arranjo do regulador CFP R²P² tipo categoria 2, em termos de fluxo de potência, com os retângulos representando respectivamente o conversor pré-regulador CFP e o conversor controlador de potência CP.

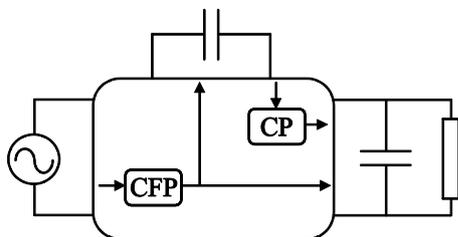


Fig. 1 Regulador CFP R²P² tipo categoria 2.

Nessa categoria, toda a potência de entrada é independentemente processada e controlada pelo pré-regulador CFP. De acordo com Cheung et al. (2010), a eficiência dessa configuração é dada por

$$\eta = k\eta_{CFP}\eta_{CP} + (1 - k)\eta_{CFP}. \quad (1)$$

Em (1), o fator k é a relação na qual a potência de saída é dividida entre o conversor CP e um caminho direto para a carga. O pré-regulador CFP é determinante na eficiência geral da categoria 2, que também apresenta o melhor desempenho em termos de FP das categorias não cascadeáveis. Portanto, ao se trabalhar com valores baixos de k , que indica menos porção da potência de saída processada pelo conversor CP, somando-se a isso, o projeto de um pré-regulador CFP eficiente, pode-se elevar ainda mais a eficiência geral (Cheung et al., 2010).

Como a categoria 2 apresenta um conversor ligado diretamente à entrada de energia, na função de CFP, o fator de potência pode ser tão bom quanto o conversor puder proporcionar (Camponogara, 2015). Outra vantagem da categoria 2 é a possibilidade da redução da capacitância de barramento do conversor CFP. Devido às tensões de saída dos conversores estarem em série, possibilita que o conversor CFP tenha uma ondulação acentuada, permitindo o emprego de um capacitor de valor reduzido não eletrolítico. Por sua vez, o conversor CP trabalha de forma complementar, compensando a ondulação.

3. EFICIÊNCIA

Uma das metas a serem atingidas no projeto dos conversores em cascata parcial é a maior eficiência possível. Por isso, o projetista precisa estar amparado por artifício que possa lhe mostrar o comportamento da eficiência geral conforme as condições de operação dos conversores. Portanto, nesta seção será apresentada uma revisão de como é estudada e representada a eficiência geral na configuração em cascata parcial.

3.1 Representação da Eficiência Total

Em geral, uma representação visual na forma de gráfico, ou ábaco, é utilizada para se interpretar os dados provenientes do conjunto em cascata parcial, empregando-se (1). Podem ser atribuídos valores empíricos fixos para as eficiências individuais, ou até mesmo fazê-los variar de um valor específico até a unidade.

Na configuração em cascata parcial categoria 2, cujo circuito genérico é mostrado na Fig 2, o fator de reprocessamento k , que determina o quanto de potência é reprocessada pelo conversor CP, exerce grande influência na eficiência geral do *driver* (Cheung et al., 2010). Supondo uma eficiência fixa para cada conversor e ajustando-se o fator de reprocessamento, é possível conseguir um ganho na eficiência geral.

Como a eficiência geral do *driver* é fortemente influenciada pelo fator de reprocessamento, deseja-se observar o seu comportamento em termos de k e das eficiências η_{CFP} e η_{CP} . Nos trabalhos de Tse e Chow (1998), Chow et al. (1999), Tse e Chow (2000), precursores das topologias em cascata

parcial, o equacionamento demonstra haver melhora da eficiência conforme se altera o fator de reprocessamento. Porém, não trazem detalhes sobre a escolha dos parâmetros a serem empregados para se determinar a eficiência geral do conjunto, devendo-se escolher de forma intuitiva valores de k , η_{CFP} e η_{CP} . Por isso, a análise para se observar o desempenho do conjunto pode tornar-se um tanto dificultosa.

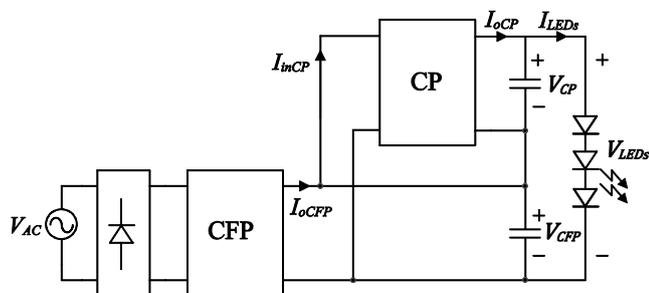


Fig. 2 Circuito genérico do driver em cascata parcial conectado a rede.

3.2 Representação com eficiências individuais variando

Cheung et al. (2010), traz uma contribuição a esse estudo, traçando massivas curvas em um gráfico, com um valor de k fixo, e fazendo-se variar as eficiências η_{CFP} e η_{PC} , conforme mostrada na Fig 3.

Pode-se observar que as curvas traçadas são de uma eficiência geral fixa em cada curva, indicada na área interna do gráfico, com o valor de k de 0,3. As curvas são traçadas empregando-se (1), e o significado é de o quanto devem ser as eficiências individuais para que a eficiência total seja a fixa indicada.

Nessa abordagem, uma vantagem é a dispensa do prévio conhecimento a respeito das eficiências de cada conversor. Porém, para que seja possível vislumbrar a eficiência geral é necessário sempre se estimar um valor de k .

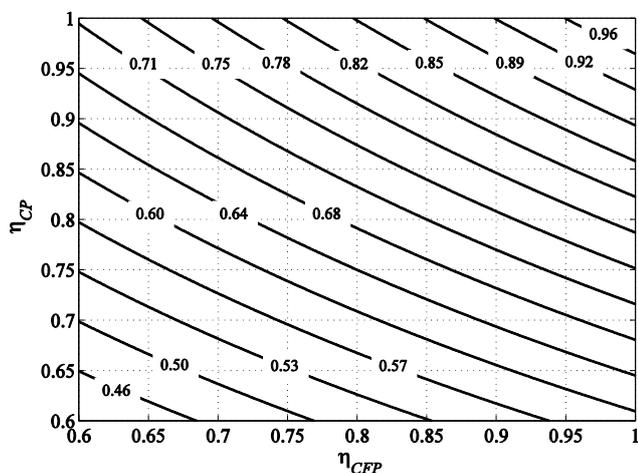


Fig 3 Eficiência total para k de 0,3.

Evidentemente, os valores observados da eficiência geral são apenas estimativas, pois nesse método não podem ser variados os parâmetros dos conversores, que fariam alterar a dissipação nos elementos de perdas.

3.3 Representação com eficiências individuais fixas

Camponogara (2012) e Camponogara (2015), trazem uma abordagem com semelhanças às mostradas no item anterior, mas ainda, avançam no sentido de se observar a eficiência geral em função de um fator de reprocessamento k variável. Contudo, são empregados valores fixos para as eficiências dos conversores. Como exemplo, 90% para o conversor CFP, e para o estágio CP alguns valores fixos indicados sobre cada curva na área interna do gráfico, conforme mostrado na Fig 4, plotado empregando-se (1).

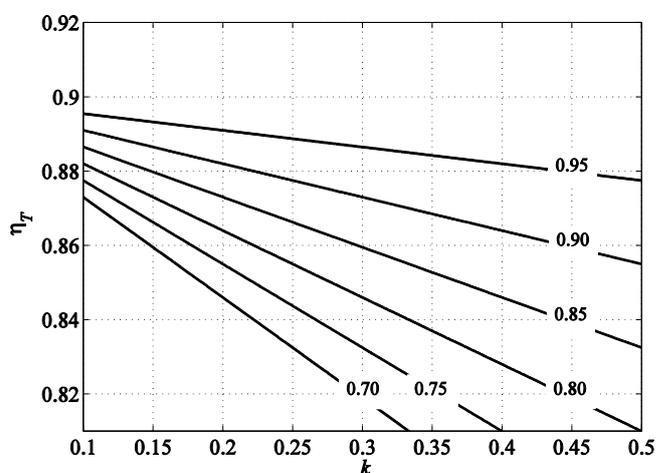


Fig 4 Eficiência geral em função de k , com η_{CFP} de 90%.

Nessa representação, de acordo com Camponogara (2015), deve-se estimar a eficiência de conversão mínima de cada estágio. Portanto, o projetista deve estar previamente munido de informações a cerca da eficiência de cada conversor por meio da literatura, ou algum experimento anteriormente desenvolvido, que possa lhe trazer juízo de valor para uma boa estimativa.

4 MODELAGEM PROPOSTA

Nas abordagens anteriores, embora se consiga ver o desempenho da eficiência geral, hora com as eficiências individuais variando e com k fixo, hora com as eficiências fixas e k variando, podem trazer uma estimativa não precisa, pois nos conversores se experimentará inúmeras variações de parâmetros, que podem afetar a eficiência individual, e conseqüentemente a total. Assim, como por exemplo, na Fig 4, ao se examinar um determinado valor da eficiência total, que se reflete em um valor correspondente de k no eixo do gráfico, há a possibilidade de obter-se um valor diferente do que seria se a representação empregasse elementos de perda e variação de parâmetros.

É possível notar que a medida que o fator de reprocessamento se altera, a tensão na saída de cada conversor também se modifica, e haverá incremento ou decréscimo no tempo de

condução. Portanto, é esperado uma mudança das perdas individuais a medida que razão cíclica aumenta ou diminui. Para se conseguir fazer uma melhora na observação da eficiência geral, de modo que fique mais condizente com a prática, ao invés de se empregar valores de eficiência fixos estimados para as eficiências individuais, ou fazê-las variar até a unidade, pode-se empregar modelos de rendimento, nos quais é possível se alterar os parâmetros de acordo com o fator de reprocessamento e a tensão de saída de cada conversor.

4.1 Modelo dos conversores

Nesta seção pretende-se utilizar um modelo de eficiência para cada conversor, de modo que se permita inserir os principais elementos de perdas e realizar a variação de parâmetros. Como exemplo, serão utilizados os modelos de eficiência dos conversores *buck-boost* como pré-regulador CFP, e do conversor *flyback* como regulador CP. Os modelos são provenientes do método do transformador CC da literatura de Erickson e Maksimovic (2001), válidos apenas para os conversores operando em modo de condução contínua de corrente (MCC).

A eficiência do conversor *buck-boost* aqui chamada de η_{CFP} , considerando as perdas por condução, pode ser dada por

$$\eta_{CFP} = D' \left(1 - \frac{V_D D'}{V_{in} D} \right) \frac{R_{bb}}{\left(\frac{R_{ibb}}{D'} + R_{bb} D' \right)}. \quad (2)$$

No qual:

- D' - Etapa complementar ($1 - D$);
- V_D - Tensão *forward* no diodo;
- V_{in} - Tensão de entrada do conversor CFP;
- R_{bb} - Resistência de carga;
- R_{ibb} - Resistências intrínsecas buck-boost.

As resistências intrínsecas em R_{ibb} , nas quais se dão as perdas por condução, são compostas por

$$R_{ibb} = (R_{Lb} + R_D) - D(R_D - R_{on}). \quad (3)$$

No qual:

- R_{Lb} - Resistência do indutor *buck-boost*;
- D - Razão cíclica;
- R_{on} - Resistência da chave;
- R_D - Resistência do diodo.

Também, baseado no método do transformador CC da literatura de Erickson e Maksimovic (2001), a eficiência no conversor *flyback*, aqui denominada η_{PC} , levando-se em conta as perdas por condução, pode ser expressa por

$$\eta_{CP} = \frac{1 - \frac{D' V_D}{D V_{CFP}} n}{\frac{R_{if}}{D' R_f} + 1}. \quad (4)$$

No qual:

- n - Relação de espiras N_1/N_2 ;
- V_{CFP} - Tensão de saída do estágio CFP;
- R_f - Resistência de carga;
- R_{if} - Resistências intrínsecas *flyback*.

Em (4), as resistências intrínsecas em R_{if} , nas quais se dão as perdas por condução, são dadas por

$$R_i = (R_{L2f} + R_D) + \frac{D}{D'} (R_{L1f} + R_{on}) \frac{1}{n^2}. \quad (5)$$

No qual:

- R_{L1f} - Resistência primária do indutor *flyback*;
- R_{L2f} - Resistência secundária do indutor *flyback*.

Nos modelos considerou-se as perdas no indutor, na chave, na resistência e tensão de barreira do diodo. Os modelos mostrados das eficiências individuais serão empregados em (1) para se traçar uma curva da eficiência geral, sendo esta também em função do fator de reprocessamento.

4.2 Relação dos parâmetros com o fator de reprocessamento

Pretende-se traçar uma curva de eficiência geral em função do fator de reprocessamento, sendo necessário tornar os parâmetros dos conversores também em função do mesmo. Para o caso, é conveniente iniciar por uma relação entre a potência de saída do conversor CP P_{CP} , e a potência total demandada pelos LED's P_{LEDs} . Como a corrente nos LED's I_{LEDs} é a mesma de saída do conversor CP, logo, o fator de reprocessamento k é

$$k = \frac{P_{CP}}{P_{LEDs}} = \frac{V_{CP} I_{LEDs}}{V_{LEDs} I_{LEDs}} = \frac{V_{CP}}{V_{LEDs}}. \quad (6)$$

Fazendo-se a malha entre as tensões de saída dos conversores e a tensão nos LED's, tem-se

$$V_{CP} = V_{LEDs} - V_{CFP}. \quad (7)$$

Substituindo-se (7) em (6) chega-se a

$$V_{CFP} = V_{LEDs} - k V_{LEDs}. \quad (8)$$

4.3 Parâmetros do conversor CFP

De acordo com a expressão (2), no conversor CFP haverá variação nos parâmetros D e resistência equivalente de carga R_{bb} . Da literatura, sabe-se que o ganho estático do conversor *buck-boost* é dado por

$$V_o = \frac{V_{in}}{(1 - D)} = V_{CFP}. \quad (9)$$

Como V_o é a mesma tensão V_{CFP} , substituindo (8) em (9) e manipulando-se, é encontrada uma expressão para razão cíclica D do conversor *buck-boost*

$$D = \frac{1}{\frac{V_{in}}{V_{LEDs}(1 - k)} + 1}. \quad (10)$$

A expressão (10) vai retornar para (9) a fim de se representar a variação da tensão de saída do conversor CFP. Assim, (9) se resume a

$$V_{CFP} = V_{LEDs}(1 - k). \quad (11)$$

Apesar da tensão de saída do conversor *buck-boost* variar, a potência de saída P_{bb} não se altera, e então, para representar a sua carga de saída R_{bb} pode-se utilizar

$$R_{bb} = \frac{V_{CFP}^2}{P_{bb}}. \quad (12)$$

4.4 Parâmetros do conversor CP

No conversor CP, propriamente na expressão (4), haverá variação em V_{CFP} , V_{CP} , D e R_f . No conversor *flyback*, da literatura o ganho estático é dado por

$$V_o = \frac{V_{in}D}{(1 - D)n} = V_{CP}. \quad (13)$$

Sendo V_o a mesma tensão de saída do conversor CP V_{CP} , e V_{in} é a tensão de entrada do estágio CP, ou seja, V_{CFP} , substituindo (13) em (6), pode-se também encontrar uma expressão para a razão cíclica D do conversor *flyback* em função de k

$$D = \frac{1}{\frac{nV_{CFP}}{kV_{LEDs}} + 1}. \quad (14)$$

Da mesma forma que no conversor CFP, (14) retorna para (13), a fim de também poder simular a alteração da tensão de saída do estágio CP em função de k . Assim, (13) passa a ser

$$V_{CP} = kV_{LEDs}. \quad (15)$$

Como na saída do conversor *flyback* há variação de tensão e potência, mas não de corrente, para representar a carga de saída R_f no estágio CP pode ser empregada a expressão

$$R_f = \frac{V_{CP}}{I_{LEDs}}. \quad (16)$$

Com o equacionamento exposto, os parâmetros em função de k podem ser calculados e seus resultados serem empregados nos modelos de rendimento.

5 IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM EM SOFTWARE

Foi feito um script no software Matlab para se implementar a modelagem proposta. Para aumentar a compreensão é mostrado na Fig 5 um fluxograma com as etapas da simulação. Primeiramente devem ser projetados os conversores e seus indutores, para se extrair as resistências dos enrolamentos.

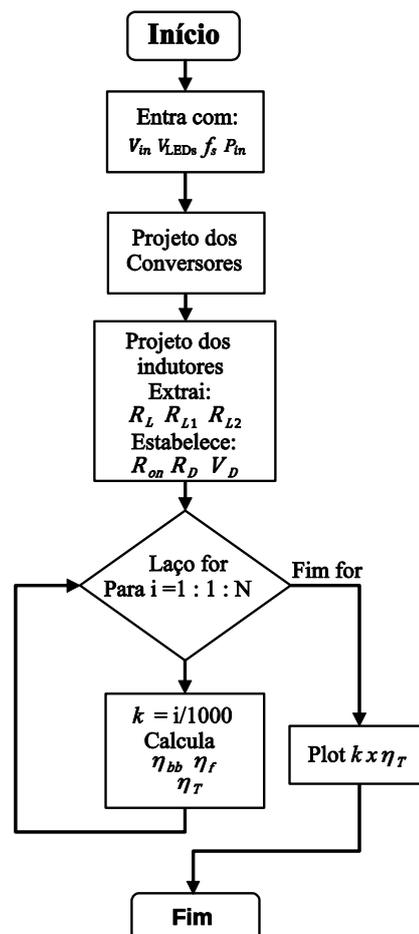


Fig 5 Fluxograma para o cálculo e plotagem de η_T .

A escolha das demais não idealidades consideradas, ou seja, resistência da chave R_{on} , resistência do diodo R_D e tensão direta do diodo V_D , são encontradas baseadas nos valores típicos das folhas de dados de cada componente. A escolha de cada componente eletrônico deve ser de acordo com os valores de tensão e corrente a qual os componentes serão submetidos, conforme os valores estabelecidos no projeto dos conversores.

Para o cálculo das eficiências individuais, e a partir da combinação delas obter-se a eficiência geral conforme é variado o fator de reprocessamento, pode ser empregado um laço de repetição *for*.

Conforme o fluxograma, são calculados mil pontos para cada eficiência individual, e partir da cada ponto calculado, também mil pontos para a eficiência geral, em outras palavras, um vetor para cada grandeza. Para cada valor calculado haverá um fator de reprocessamento correspondente.

Este trabalho concentra-se na análise da eficiência, e por isso não será mostrada uma forma de escolha de um k ótimo. A sua determinação passa pela avaliação de pontualidades técnicas de cada conversor, condições dos parâmetros de entrada e da saída do *driver* e ondulação admitida na saída do estágio CFP. Portanto, para as simulações k será variado de zero até a unidade.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para a simulação da modelagem no software Matlab, os conversores foram projetados com os dados da Tabela 1. O projeto dos indutores é baseado no método *AeAw*, apresentado na literatura de Barbi (2001), cujos valores e resistências dos enrolamentos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 1. Parâmetros iniciais projeto

Parâmetro	Valor
V_{in}	127 V
V_{LEDs}	170 V
P_{in}/P_{out}	100 W
f_s	50 kHz
n (flyback)	1

Ainda, para validar a modelagem sugerida, foi simulado no software PSIM o circuito dos conversores na configuração em cascata parcial, mostrado na Fig 6, com os valores dos componentes passivos e de suas não idealidades também mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Componentes passivos e resistências

Parâmetro	CFP	CP
L	2,60 mH	3,60 mH
C	10 uF	10 uF
R_{Lbb}	180 mΩ	-
R_{L1f}	-	125 mΩ
R_{L2f}	-	125 mΩ

As não idealidades dos componentes semicondutores empregados tanto na simulação da modelagem, quanto do circuito da configuração, são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados do MOSFET IRFP460 e diodo 8ETX06.

Parâmetro	CFP/CP
R_{on}	270 mΩ
R_D	150 mΩ
V_D	0,75 V

A resistência estática e a tensão do diodo foram encontradas levando-se em conta os dados da corrente em função da tensão direta, da folha de dados do fabricante.

No software PSIM, para se obter os dados de eficiência, foi empregado o recurso *Parameter Sweep*, cuja função é de realizar massivas simulações, uma para cada valor de k , que por sua vez é convertido em razão cíclica.

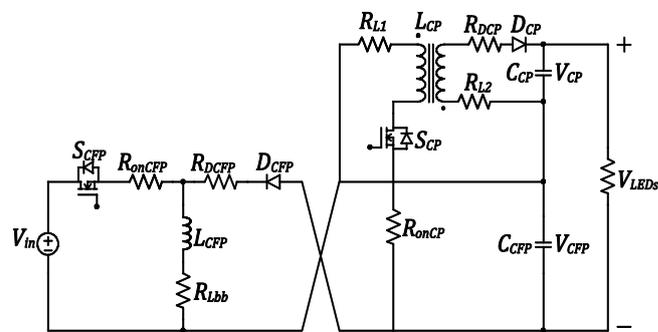


Fig 6 Circuito simulado no software PSIM.

A Fig 7 mostra as curvas da eficiência total η_T , respectivamente, da modelagem proposta, e também da simulação do circuito no PSIM, ambas em função de k .

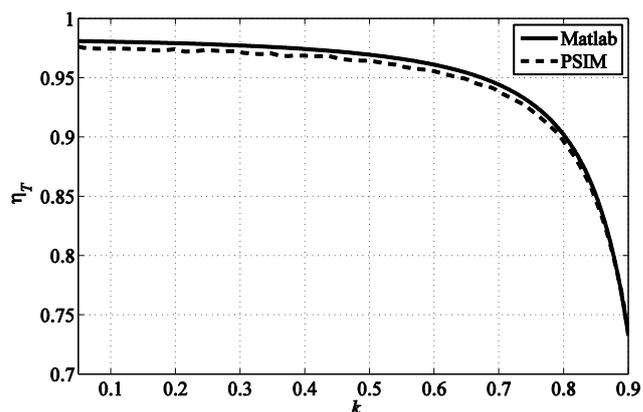


Fig 7 Curvas de η_T do Matlab e do PSIM.

Pela Fig 7 pode-se observar reduzida discrepância entre as curvas. Os dados provenientes do Matlab são calculados ponto a ponto, já os do PSIM, são do valor médio em um trecho da simulação onde já obteve-se a estabilidade.

A Fig 8 mostra uma comparação entre a curva plotada utilizando-se a modelagem proposta e a metodologia clássica

de Camponogara (2015), ambas empregando (1). Contudo, na metodologia clássica considerou-se uma eficiência suposta do estágio CFP de 95% e no CP de 90%.

Nota-se uma acentuada discrepância entre as curvas da Fig 8. Mas, é de se notar que as eficiências individuais supostas resultam numa curva com uma única inclinação, que oferece menos informação a cerca da eficiência total. A curva da modelagem proposta oferecerá sempre maior detalhamento sobre a eficiência total, sobretudo devido ao fato das eficiências individuais variarem com k .

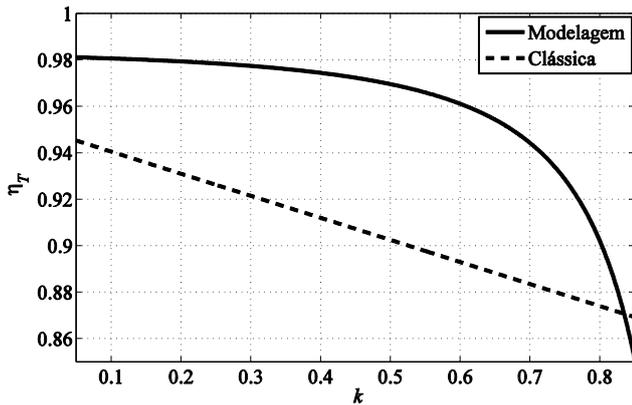


Fig 8 Curvas de η_T da Modelagem e metodologia clássica.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de se comparar os resultados de simulação com a prática, foram implementados os conversores *buck-boost* e *flyback* empregando-se os parâmetros da Tabela 1 e os componentes mencionados nas Tabelas 2 e 3. Os resultados são em malha aberta e com uma resistência de carga fixa equivalente na saída de 289Ω , representando os LED's.

A Fig 9 mostra a tensão e a corrente de saída do conjunto de conversores em cascata parcial. Para o caso foi utilizado k de 0,5, que resulta em razões cíclicas para os conversores *buck-boost* e *flyback* respectivamente de 0,4 e 0,5.

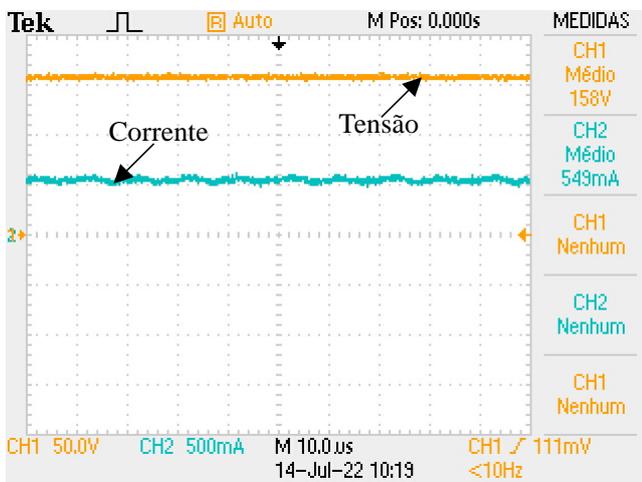


Fig 9 Tensão e corrente de saída para k de 0,5 (50V/div, 500mA/div e 10 μ s/div).

Pela Fig 9 observa-se que a tensão alcançou o valor de 158V, ficando com valor abaixo do simulado no PSIM que é de aproximadamente 164V. Essa diferença é devido principalmente as perdas não consideradas, que são também detratores do ganho de tensão.

A Fig 10 mostra o resultado experimental da eficiência do conjunto de conversores em função de k , juntamente às curvas da modelagem e a simulada no PSIM.

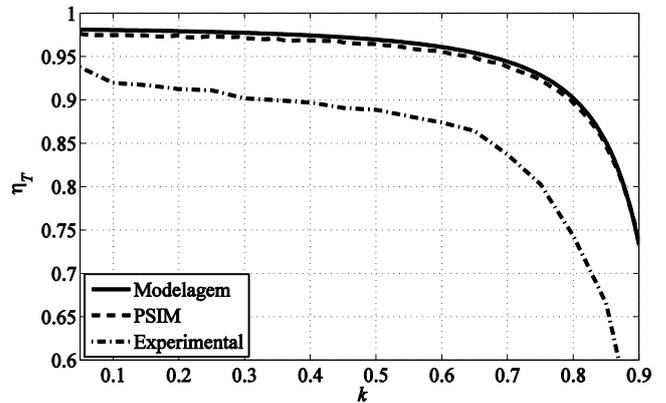


Fig 10 Curvas de η_T da modelagem, PSIM e experimental.

Através da Fig 10 observa-se que a curva experimental segue a forma das curvas da modelagem e simulada no PSIM, que demonstra coerência na validação experimental. Contudo, há uma diferença na eficiência observada na prática em relação às demais. Essa diferença é uma das limitações da metodologia proposta, uma vez que o acréscimo de não idealidades aos modelos analíticos, como perdas por dispersão, comutação e no núcleo, os tornam complexos.

A Fig 11 traz as curvas das eficiências individuais dos estágios CFP e CP. Nela, pode-se observar que as eficiências individuais se alteram com k , existindo uma faixa em que melhor se combinam para formar a total com maior rendimento.

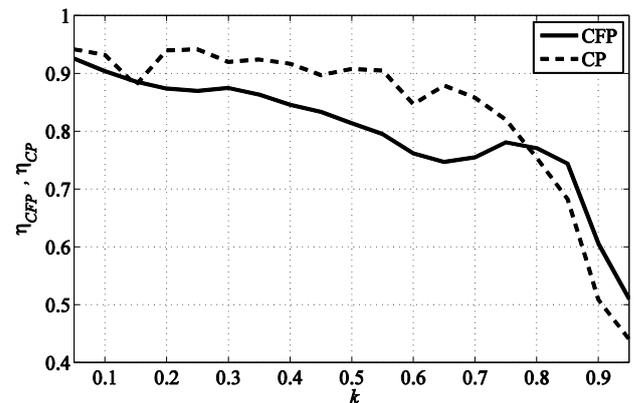


Fig 11 Curvas de η_{CFP} e η_{CP} experimentais.

A Fig 12 apresenta uma relação entre as eficiências individuais e a total. Através da figura é possível vislumbrar a participação de cada eficiência na formação da total. Cada haste do gráfico inicia em um ponto no plano η_{CFP} e η_{CP} , para um determinado k . Cada ponto é um dado experimental

medido. A altura da haste, ou a eficiência total η_T , mostrada no gráfico, também é um dado experimental medido, coincidindo com o fator de reprocessamento dos pontos do plano.

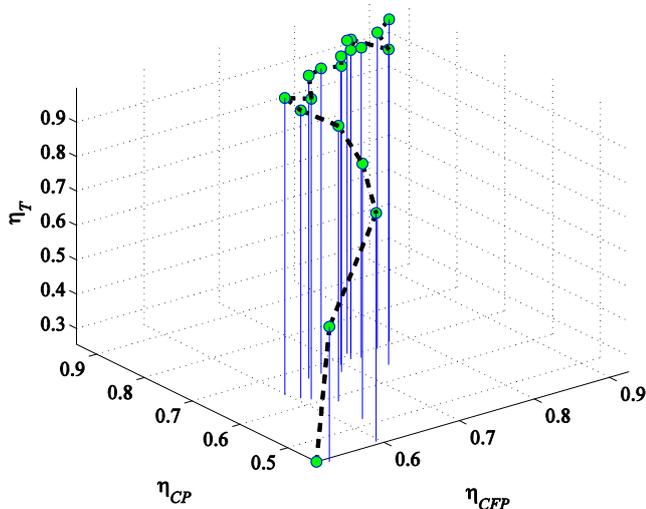


Fig 12 Participação de η_{CFP} e η_{CP} na formação de η_T .

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou questões ligadas ao estudo da eficiência dos conversores na configuração em cascata parcial. Foi mostrado que a curva da eficiência total, do conjunto de conversores estáticos na configuração em cascata parcial, pode ser estudada por meio de modelos de rendimento analíticos.

Pela dispensa do prévio conhecimento das eficiências individuais, e também por mostrar o comportamento da eficiência total, esta pesquisa auxiliará o projetista na determinação do fator de reprocessamento, que juntamente com outras questões técnicas, é de fundamental importância no projeto dos conversores na configuração em cascata parcial.

A modelagem mostrada pode representar com maior fidelidade a prática se acrescida de outras perdas. Contudo, deve ser avaliada a viabilidade técnica de se adicionar tais perdas em virtude da complexidade que o modelo irá atingir.

A validação através dos resultados experimentais, por uma ampla faixa de variação dos parâmetros, permitiu comprovar as afirmações teóricas de que pode-se conseguir um ganho de eficiência considerável apenas manejando-se k . Também, comprovou-se que a variação das eficiências individuais possui notável influência na curva de eficiência total do conjunto.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Fundação Araucária (FA), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UTFPR- Pato Branco.

REFERÊNCIAS

- Cheung, M. K. H.; Chow, M. H. L.; Tse, C. K. Practical Design and Evaluation of a 1 kW PFC Power Supply Based on Reduced Redundant Power Processing Principle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Volume: 55, Issue: 2, February 2008).
- Spiazzi, G. Reduced Redundant Power Processing Concept: a Reexamination. *IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2016.
- Zogogianni, C. G.; Tatakis, E. C.; Vekic, M. S. Non-Isolated Reduced Redundant Power Processing DC/DC Converters: A Systematic Study of Topologies With Wide Voltage Ratio for High-Power Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 34, Issue: 9, September 2019).
- Almeida, S. A.; Camponogara, D.; Braga, H. A. C.; Costa, M. A. D.; Alonso, M. Matching LED and Driver Life Spans: A Review of Different Techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine* (Volume: 9, Issue: 2, June 2015).
- Tse, C. K.; Chow, M. H. L. A theoretical examination of the circuit requirements of power factor correction. *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* (Cat. No.98CH36196). 22-22 May 1998.
- Chow, M. H. L.; Tse, C. K.; Lee, Y. S. An efficient PFC voltage regulator with reduced redundant power processing. *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No.99CH36321)*. July 1999.
- Tse, C. K.; Chow, M. H. L. Theoretical Study of Switching Power Converters with Power Factor Correction and Output Regulation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* (Volume: 47, Issue: 7, Jul 2000).
- Cheung, M. K. H.; Chow, M. H. L.; Tse, C. K. Design and Performance Considerations of PFC Switching Regulators Based on Noncascading Structures. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Volume: 57, Issue: 11, Nov. 2010).
- Camponogara, Douglas. *Desenvolvimento de topologias com redução do processamento redundante de energia para acionamento de LEDs*. 2015. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- Camponogara, Douglas. *Análise e projeto de uma topologia de dois estágios otimizada aplicada à iluminação pública com LEDs*. Dissertação - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2001) *Fundamental of Power Electronics*. 2nd Edition, Springer, Berlin.
- Barbi, I. (2001). *Projetos de Fontes Chaveadas*. Edição do Autor. 2001.