

Acionamento de Arranjos de LEDs de Altíssimas Potências Empregando Drivers Conectados à Rede Trifásica

Matheus V. Rangel*, Josué L. da Silva**
Pedro S. Almeida***

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil (e-mail: matheuseleetro.vidalrangel@gmail.com)

** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Leopoldina, Leopoldina, MG, Brasil (e-mail: josuelima@cefetmg.br)

*** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil (e-mail: pedro.almeida@ufff.edu.br)}

Abstract: LEDs have been shown to be increasingly present in lighting systems, from small and medium sized applications (such as residential and street lighting), and even in larger systems (stadium spotlights, for example). Since they are direct current-fed, it is necessary to have electronic drivers making the interface between the power grid and the devices themselves. These driver circuits need to ensure high efficiency, reliability and compatibility with regulatory standards. A survey of three-phase driver topologies will be presented, since they are an interesting alternative for higher power systems, mainly because they may allow the substitution of electrolytic capacitors and consequently increase the useful life of the system as a whole. Two categories will be treated in this work, namely: single and modular stages, which make it possible to study several topologies already existing in the field of driving LEDs. The most relevant results of each topology are presented and a thorough comparison is made.

Resumo: Os LEDs têm se mostrado cada vez mais presentes nos sistemas de iluminação, desde sistemas de pequeno e médio porte (como residencial e iluminação pública), até mesmo em sistemas maiores (holofotes de estádios, por exemplo). Ao funcionarem em corrente contínua, torna-se necessário a presença de *drivers* fazendo a interface entre a rede e os mesmos. Esses sistemas de acionamento precisam garantir cada vez mais eficiência, confiabilidade e compatibilidade com normas regulamentadoras. Serão apresentadas topologias de *drivers* trifásicos, os quais são promissores para aplicação em sistemas em mais altas potências, sobretudo por possibilitarem a remoção do capacitor eletrolítico e consequentemente o aumento da vida útil do sistema como um todo. Duas categorias serão tratadas neste trabalho, a saber: estágio único e modular, as quais possibilitam o estudo de várias topologias já existentes no âmbito de acionamento de LEDs. Serão apresentados os resultados mais relevantes de cada topologia e, por fim, é feita uma comparação minuciosa.

Keywords: Power Factor Correction; PFC; Light-Emitting Diode; LED; Three-phase; electrolytic capacitorless, High Power.

Palavras-chaves: Correção do Fator de Potência; PFC; Diodos Emissores de Luz; LED; Trifásico; sem Capacitor Eletrolítico; Alta Potência.

1. INTRODUÇÃO

Os LEDs (do inglês, *Light-Emitting Diode*) têm se mostrado como uma fonte de luz muito interessante já há alguns anos, isso devido a características como longa vida útil, eficácia luminosa e consequentes baixos custos com manutenção do sistema. Eles nada mais são que dispositivos semicondutores unidirecionais (diodos) capazes de emitir luz quando percorridos por uma corrente contínua (Schubert, 2006).

Uma vez que os LEDs são dispositivos c.c. (corrente contínua) e a energia elétrica é majoritariamente disponibilizada em c.a. (corrente alternada), tornam-se necessários circuitos para a realização dessa interface.

Circuitos para alimentação de LEDs a partir da rede são chamados *off-line LED drivers*, ou simplesmente *drivers*. Minimamente um *off-line LED driver* incorpora um conversor c.a.-c.c. (retificador), porém isso não é suficiente para que ele cumpra com as regulamentações de qualidade de energia, como a número 61000-3-2 da IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*) que estabelece o limite dos componentes harmônicos e fator de potência (FP) em equipamentos de iluminação (IEC, 2018). Para atendimento desses requisitos de qualidade de energia, o *driver* deve incorporar uma etapa de correção do fator de potência PFC (do inglês, *Power Factor Correction*), que na maioria dos casos trata-se da associação de um conversor c.c.-c.c. ao retificador.

Os *drivers* que utilizam um único conversor c.c.-c.c. associado ao retificador são chamados *drivers* de estágio único e são os preferidos para acionamentos de LEDs com potência de até 50 W, dado seu custo e tamanho diminutos (Li et al., 2016). A Fig. 1 ilustra um *driver* de estágio único monofásico.

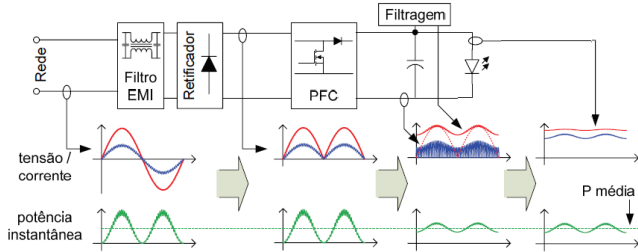


Fig. 1: Diagrama esquemático de um *driver* de LED de estágio único. Adaptado de Almeida (2012).

Como pode ser observado na Fig. 1, a corrente de entrada proporcionada por um circuito PFC ideal é essencialmente senoidal com fase e frequência idênticas à tensão de alimentação. Ainda na Fig. 1, observa-se também que a multiplicação da tensão pela corrente de alimentação (que por definição é a potência instantânea) resulta em uma forma de onda pulsante com o dobro da frequência da rede (Almeida, 2012).

Um *driver* ideal é aquele que fornecerá uma potência/corrente constante para a carga de LEDs, pois a oscilação dessas variáveis está intimamente ligada com uma modulação na iluminância, oscilação esta que é chamada de cintilação ou *flicker*. O *flicker*, por sua vez, está relacionado a efeitos fisiológicos indesejados no ser humano (como dificuldade de concentração, dor de cabeça, náuseas, epilepsia, etc.). Dessa forma, surgiu uma recomendação para limitar a modulação de corrente nos LEDs, que é a IEEE 1789-2015.

A redução da modulação de corrente dos LEDs está intimamente relacionada a maiores valores de capacitância de saída do *driver*, uma vez que o capacitor é o elemento responsável por amenizar o desbalanço de potência que existe entre a entrada e a saída do *driver* (Soares, 2017). Nos *drivers* de estágio único, a capacitância é tão elevada que requer capacitores eletrolíticos, que tendem a reduzir a vida útil do *driver* (Gu et al., 2009).

Como a vida útil do *driver* deve ser tão longa quanto a do LED, pesquisas têm sido desenvolvidas para eliminar a necessidade de utilização do capacitor eletrolítico, substituindo-o por uma tecnologia de maior vida útil como os capacitores de filme (Almeida et al., 2015). São exemplos de soluções na redução de *flicker* e de capacitância:

- *Drivers* de múltiplos estágios, integrados ou não (Camponogara et al., 2012), (Almeida et al., 2012);
- Técnicas de compensação ativa do *ripple* (Soares et al., 2017), (Soares; Alonso; Braga, 2018), (Tang; Wang; Xie, 2011);

- *Drivers* trifásicos (Castro et al., 2019b), (Coutinho et al., 2017), (Mendonça et al., 2014b).

Neste trabalho pretende-se abordar especificamente os *drivers* trifásicos. A utilização desse tipo de *driver* é interessante pois permite reduzir bastante a capacitância mesmo para LEDs com potências acima dos 300 W (Castro et al., 2018).

A redução da capacitância nos *drivers* trifásicos é possível uma vez que em uma carga trifásica linear e equilibrada, a potência ativa é constante (Coutinho et al., 2015a). Ou seja, se o *driver* for capaz de apresentar um comportamento LFR (do inglês *Loss-Free Resistor*) por fase, o mesmo irá absorver da rede e posteriormente fornecer aos LEDs uma potência ativa praticamente constante, minimizando a capacitância necessária.

Outro fato que permite a redução da capacitância requerida nos sistemas trifásicos é a própria recomendação IEEE 1789-2015, que estabelece que a magnitude da máxima modulação de corrente permitida é diretamente proporcional à frequência dessa modulação. Isso quer dizer que a recomendação é mais rígida com *drivers* monofásicos (onde a modulação de *flicker* ocorre com o dobro da frequência da rede) do que com os trifásicos (onde a frequência da modulação de *flicker* é seis vezes maior que a da rede) (IEEE, 2015).

Apresentadas as motivações para o estudo, o seguinte trabalho propõe uma revisão detalhada sobre *drivers* de LED com apresentação e posterior comparação das topologias.

2. TOPOLOGIAS

As soluções mais usuais de *drivers* trifásicos para LEDs são através de topologias de estágio único devido ao menor custo e maior confiabilidade, contudo, existem também pesquisas com propostas interessantes no que diz respeito a topologias modulares (Castro et al., 2019). Isso é o que será discutido a seguir.

2.1 Estágio Único

Segundo Castro et al. (2019a), pode-se dividir os *drivers* trifásicos de estágio único em dois grupos: os de apenas um interruptor controlado (*single-switch*) e os de dois ou mais interruptores controlados (*multi-switch*).

Na Fig. 2 são apresentadas duas topologias de estágio único diferentes, mas com algo em comum: ambas possuem apenas um interruptor controlado. O circuito da Fig. 2a trata-se de um retificador com um estágio PFC *boost*, que é um conversor que possui bom desempenho quanto ao FP, todavia, devido a sua característica elevadora, é necessário trabalhar com ganhos maiores que um, o que em níveis de tensão trifásicos, isto é, 220 V ou 380 V eficazes entre fases (considerando os padrões brasileiros mais comuns), pode inviabilizar a aplicação do conversor para cargas de LED de baixa tensão como os COB (do inglês, *Chip-On-Board*) LEDs, sendo necessário um estágio adicional para compatibilizar a tensão.

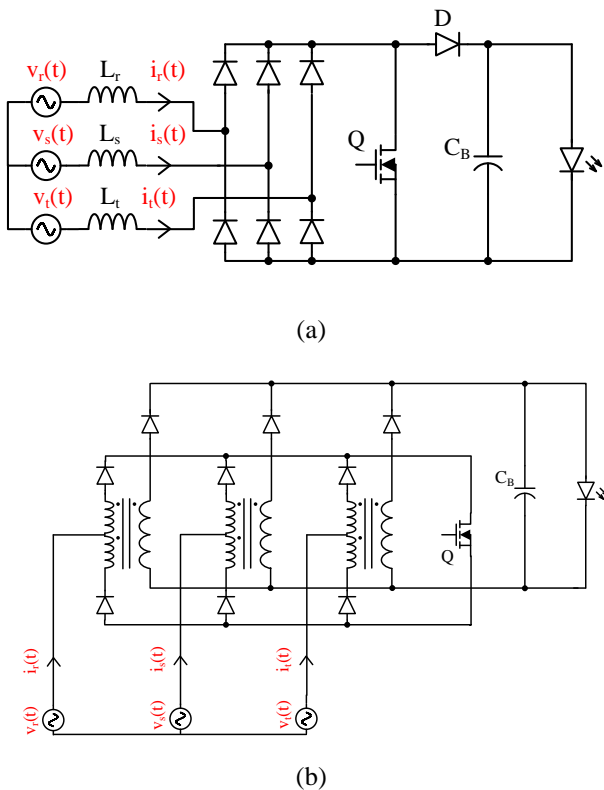


Fig. 2: a) *Driver trifásico boost single-switch*; b) *Driver trifásico flyback single-switch*. Adaptado de Castro et al. (2019a).

Considerando, então, que os LEDs são cargas de baixa tensão, a topologia da Fig. 2b torna-se mais conveniente, pois se trata de um *flyback*, um conversor que pode apresentar comportamento tanto abaixador como elevador, permitindo assim o acionamento de cargas de LED de menor ou maior tensão, respectivamente. O conversor *flyback* possui ainda isolamento galvânica, oferecendo dessa forma uma diminuição do risco de choque elétrico. Nessa topologia, a ideia é integrar os enrolamentos primários dos transformadores *flyback* a um retificador trifásico de onda completa. É possível perceber que o enrolamento primário foi dividido em dois enrolamentos (superior e inferior), assim o enrolamento superior conduz durante os ciclos positivos de sua respectiva fase, ao passo que o enrolamento inferior conduz nos ciclos negativos de sua respectiva fase. Isso de certa forma garante um desempenho LFR por fase caso o conversor seja operado em modo descontinuo (*discontinuous conduction mode*, DCM) (Mendonça et al., 2014a). Outro ponto interessante, é o fato desse conversor operar com apenas um interruptor controlado, o que é bastante relevante no que se refere ao custo de projeto. Entretanto, a divisão do enrolamento primário acarreta na duplicação da tensão refletida do enrolamento secundário para o primário, o que somado as sobretensões causadas pelos efeitos indutância de dispersão do transformador *flyback*, resultam em elevados esforços de tensão sobre o interruptor.

Para solucionar o problema das sobretensões sobre o interruptor do conversor *flyback* trifásico, em Minbok & Kolar (2000) sugere-se a inclusão de circuitos grampeadores

(*snubbers*) em paralelo com cada enrolamento primário (em um total de seis circuitos grampeadores), todavia, o quesito custo que até então tornava essa topologia atrativa passa a ser prejudicado, além de se aumentar as perdas devido a energia dissipada em cada grampeador.

Assim, como forma de se obter um certo equilíbrio, foi proposto em Mendonça et al. (2014a) a inclusão de um único grampeador em paralelo com o interruptor do conversor da Fig. 2b. Este projeto foi dimensionado para acionamento de uma carga de LEDs de 54 W. Na fase de testes o nível de tensão sobre o interruptor foi um fator determinante para se discutir uma forma de melhorar esse projeto. Isso porque quando aplicada uma tensão de entrada de 170 V resultava cerca de 900 V no interruptor. A princípio foi proposto reduzir o valor da resistência do circuito grampeador de forma a reduzir a tensão aplicada diretamente ao interruptor, porém, isso resulta em maiores perdas no conversor.

Como resultado da inclusão do grampeador, o *driver* apresentou, no pior caso, um fator de potência de 0,95 e uma eficiência de 68%, o que de acordo com Zhang Bo et al. (2009) e Hu, Huber & Jovanovic (2009) é um percentual baixo para esse nível de potência. Pensando nisso, em Mendonça et al. (2014b) foi proposto uma modificação quanto a proposição dos enrolamentos primários, de forma que não houvesse mais um *tap* central, mas dois enrolamentos separados pelos diodos (Fig. 3). Dessa forma, a parte superior dos enrolamentos fica referenciada no mesmo potencial, o que permite a utilização de um único circuito grampeador para os três enrolamentos superiores. O mesmo pode ser verificado com a parte inferior dos enrolamentos primários. A forma de conexão dos circuitos grampeadores pode ser melhor observada na Fig. 4.

A grande vantagem desse sistema é que permite a inclusão de dois circuitos grampeadores apenas, dedicados às partes superior e inferior do circuito. Na fase de testes foram consideradas várias condições de operação, mas de modo geral o conversor apresentou, diante de uma carga de 54 W, um fator de potência de até 0,99 e eficiência de até 77%, com uma THD de corrente de 6,72%. Comparado ao conversor *flyback* com um grampeador em paralelo ao interruptor, esses resultados foram superiores, visto que houve uma melhora no rendimento do conversor, sendo isso possível de observar claramente nos gráficos demonstrados na

Fig. 5.

Como o estudo de *drivers* trifásicos é direcionado para aplicações com altos níveis de potência, acredita-se que a topologia da Figura 2b e outras derivadas dela se tornam inadequadas para acionamento de luminárias com mais de 200 W, por motivos como sobretensões nos interruptores, complexidade de equalização dos enrolamentos e a baixa eficiência. Vale ressaltar que na opinião de Castro et al. (2019a) se torna desnecessária a utilização de isolamento galvânica em sistemas de alta potência, uma vez que esses projetos incluem a instalação das luminárias em locais inacessíveis, às quais somente um profissional pode ter acesso quando necessário.

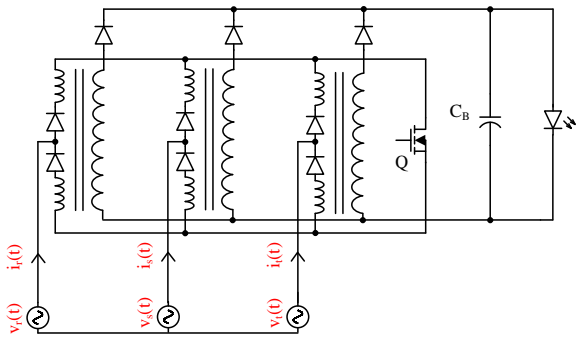


Fig. 3: *Driver flyback* trifásico com modificação nos enrolamentos primários (Mendonça et al., 2014b)

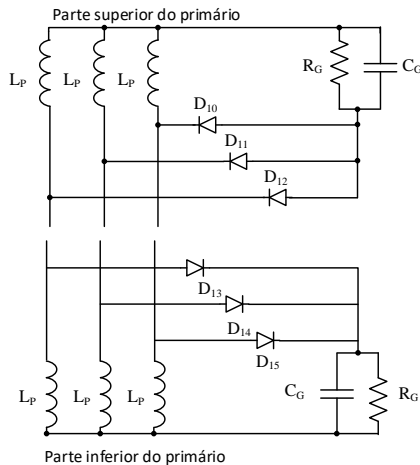
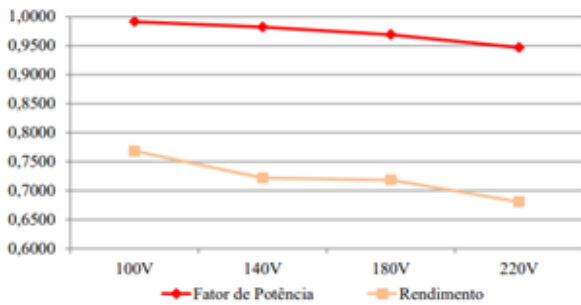
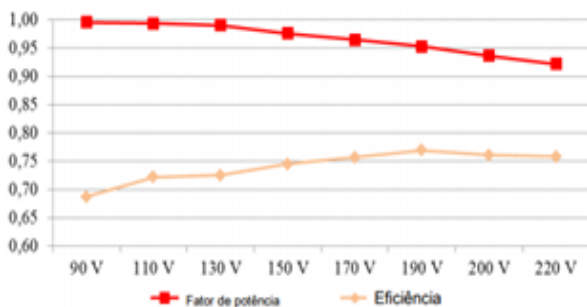


Fig. 4: Circuito Grampeador. Adaptado de Mendonça et al. (2014b)



(a)



(b)

Fig. 5: a) Topologia com grampeador na chave (Mendonça et al., 2014a); b) Topologia com dois grampeadores (Mendonça et al., 2014b);

Pensando no quesito eficiência para matrizes de LED de alta potência, algumas literaturas contribuíram com projetos de *drivers* trifásicos a partir de conversores ressonantes (Coutinho et al., 2017), (Veeramallu et al., 2017). Essas topologias englobam maior número de interruptores, (o que reduz os níveis de tensão sobre os mesmos); comutação suave (como a comutação sob zero de corrente e comutação zero de tensão), o que reduz as perdas e aumenta a eficiência; dimerização do LED a partir da variação da frequência de comutação e, eliminação de capacitores eletrolíticos, o que compatibiliza mais a vida útil do *driver* com a longa vida útil de um LED. Em Coutinho et al. (2017) foi empregada a topologia baseada em um conversor trifásico ressonante a capacitores comutados para acionar uma lâmpada LED COB de 216 W, cuja topologia é mostrado na Fig. 6. Em geral, foi possível o controle de dimerização do LED, a obtenção de uma eficiência de até 91,5%, alto fator de potência de entrada (acima de 0,97) e baixa distorção harmônica de corrente: 4,22%, atendendo tanto a classe A (por se tratar de um conversor aplicado a um sistema trifásico equilibrado), como à restritiva classe C (por se tratar de um sistema de iluminação) da norma IEC Std. 61000-3-2:2014. Embora os resultados sejam bons, o comportamento em malha fechada do *driver* não foi avaliado.

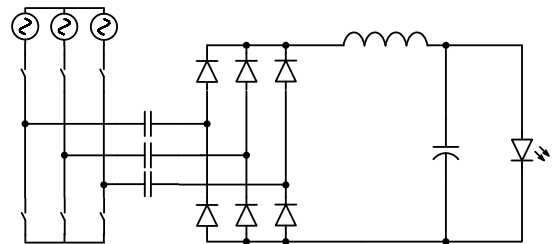


Fig. 6: *Driver* trifásico a capacitor comutado proposto por Coutinho et al. (2017)

O *driver* trifásico a capacitor comutado também foi investigado na aplicação com menor potência (54 W) e comutação dissipativa (*hard-switch*) em Coutinho et al. (2015a, 2015b). Nessa faixa de potência o rendimento ficou na faixa de 82,77%, com atendimento integral as normas e eliminação do capacitor eletrolítico no barramento de saída.

2.1 Estágios Modulares

Essas estruturas podem ser construídas a partir da associação de múltiplos conversores c.a.-c.c. monofásicos, o que as tornam mais simples no ponto de vista de análise do circuito, porém, se trata de um conceito tão desafiador quanto os já discutidos neste trabalho, mesmo porque a aplicação das mesmas para acionamento de LEDs é algo ainda pouco explorado.

Nos trabalhos Castro et al. (2016, 2017) foi proposta a utilização de estruturas multicelulares, onde basicamente a ideia foi agrupar células em cada fase. Essas células são circuitos conversores c.c.-c.c. monofásicos operando como pré-reguladores do FP, implicando em baixa THD devido à característica de LFR. Além disso, é interessante e mandatório o isolamento galvânico, visto que suas saídas são conectadas em paralelo. De certa forma, a maneira mais

simples para se garantir estas características é trabalhando com conversores da família *flyback* operando no modo de condução descontínua (DCM).

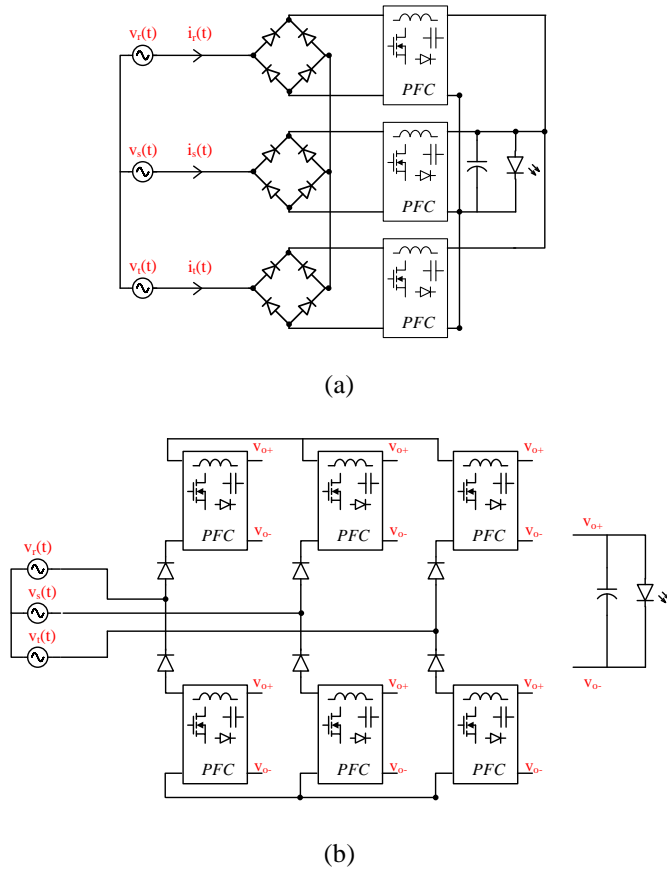


Fig. 7: Topologias modulares comparadas por Castro et al. (2017).

Alguns exemplos desses *drivers* podem ser verificados na Fig. 7. Pode-se destacar o fato da topologia b) possuir uma complexidade maior no ponto de vista de controle, pois o número de componentes é praticamente o dobro da topologia a), todavia, ambas, sobretudo a topologia b), podem ser mais caras do que todas as topologias apresentadas até então neste trabalho. No trabalho de Castro et al. (2017) foi feita uma comparação, onde o enfoque maior foi para a proposta b), sendo apresentados todos os passos de dimensionamento e estratégia de controle. O interessante é que, embora o conversor a) (conhecido como Delco) tenha sido estudado em outras literaturas (estudado nas literaturas Kolar & Friedli (2013), Singer & Fuchs (1996) e Kocher & Steigerwald (1983)), somente em Castro et al. (2017) é que foi publicado pela primeira vez resultados do mesmo para acionamento de LEDs, possibilitando, portanto, a comparação de dois resultados inéditos no contexto de *drivers* trifásicos.

Nesse caso, em ambas as topologias foram empregadas células *flyback* exatamente idênticas, bem como foram utilizadas as mesmas estratégias de controle a fim de que o impacto comparativo fosse ainda mais relevante. Além disso, ambos os *drivers* foram projetados para o acionamento de

uma carga de 90 W e parâmetros de entrada conforme toda a faixa de tensão de linha trifásica europeia (380 – 420 V). Na prática chegaram a receber uma tensão trifásica de até 400 V eficazes na entrada, o equivalente a 1,8 A em 48 V na saída. Através da Fig. 8 é possível observar que ambos os protótipos não apresentaram uma eficiência muito alta, principalmente quando se considera o escurecimento máximo, onde a eficiência foi menor que 89% nos dois casos. Dessa forma, tais topologias não se justificam para aplicações de baixa potência, uma vez que os PFCs se mostram limitados quando operados no modo DCM. Para operações de alta potência esses *drivers* podem ser mais atrativos, afinal, embora o quesito eficiência não tenha sido o foco desse trabalho, requisitos como *flicker*, distorção harmônica e fator de potência foram alcançados dentro de normas regulamentadoras já discutidas neste documento. Vale ressaltar que tudo isso foi alcançado através da associação de conversores monofásicos com característica LFR, operando de forma simples e dispensando os capacitores eletrolíticos tradicionalmente usados em PFCs, os quais poderão ser substituídos por um capacitor de filme apenas para reduzir o efeito ondulatório das baixas frequências que ainda podem surgir devido as não-linearidades do circuito, o que aumenta consideravelmente a vida útil do *driver* como um todo.

No trabalho de Castro et al. (2016) o *driver* multicelular proposto anteriormente foi estudado mais afino, sendo testado em toda a faixa de tensão trifásica europeia (380-420 V de linha). O mesmo apresentou eficiências mais baixas do que geralmente se é visto com bons olhos nessa faixa de potência (ver Fig. 9).

Uma alternativa que se mostra muito interessante e que já foi testada em aplicações de alta potência (300 W) é mostrada na Fig. 10. Abrangendo também o conceito de conversores modulares, percebe-se que a principal diferença entre essa topologia e a que foi apresentada na Fig. 7 está na saída de cada PFC, os quais agora passam a atender individualmente suas respectivas cargas de LEDs. Isso porque cada célula comporta-se tal como um PFC monofásico, ou seja, as variáveis de saída (corrente e fluxo luminoso) apresentam uma oscilação em 120 Hz. O trabalho apresenta um desenvolvimento matemático que mostra que as oscilações de saída (corrente e fluxo luminoso) são defasadas entre si. Assim, através de um arranjo físico/geométrico que proporcione a soma das saídas de luz, prova-se que as oscilações se somam, proporcionando um efeito de iluminação constante. Como consequência se conseguiu eliminar o capacitor eletrolítico.

Apesar de ser uma topologia de alta eficiência não se trata de uma topologia isolada. Contudo, há de se ressaltar o elevado número de componentes (mesmo sendo bem menor quando comparado à abordagem com seis células) e a necessidade de no mínimo três malhas de controle dedicadas a cada célula, o que demanda, por exemplo, em três sensores de corrente. Além disso, outro ponto por enquanto desfavorável, é a impossibilidade de aplicação para acionamento de LEDs integrados, os quais não se pode seccionar o arranjo/matriz. Esse conversor, apesar de complexo, justifica sua complexidade por ser o que acionou a maior potência (dentro

as literaturas abordadas), sendo também o mais eficiente, requerendo, porém, LEDs de alta tensão.

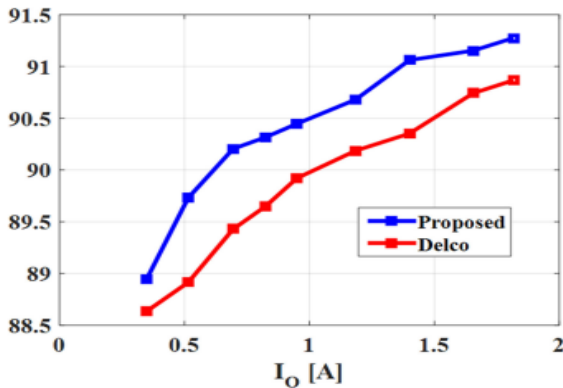


Fig. 8: Eficiência (%) versus corrente de saída (A) – (Castro et al., 2017)

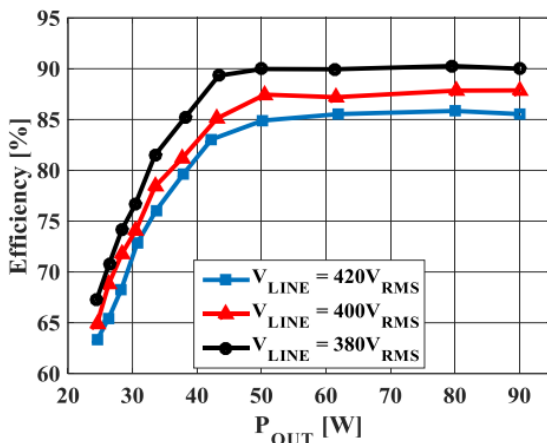


Fig. 9: Eficiência (%) versus potência de saída (W): (Castro et al., 2016)

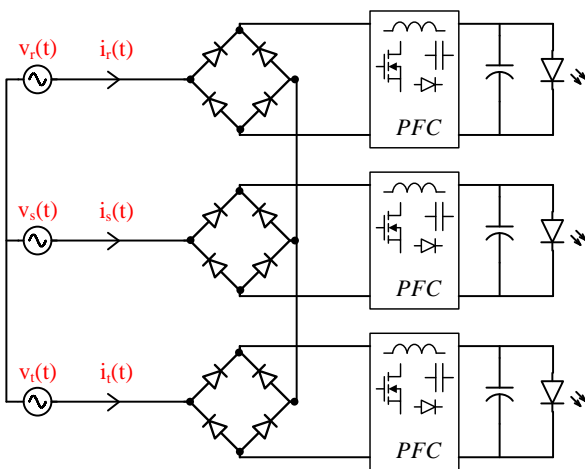


Fig. 10: Driver multicelular baseado no somatório das saídas de luz (Castro et al., 2018, 2019b)

Apresentadas as topologias, a Tabela 1 compara os drivers trifásicos revisados. Algumas considerações devem ser levadas em conta para analisar a Tabela 1:

- Células que contém o caractere hífen “-” significam que o respectivo parâmetro não foi avaliado na bibliografia;
- Os diodos dos circuitos grampeadores não são considerados no parâmetro “Quantidade de diodos”, pois o grampeador é considerado uma estrutura única no parâmetro “Quantidade de circuitos grampeadores”;
- Os magnéticos dos filtros EMI (do inglês, *Electromagnetic Interference*) não são contabilizados no parâmetro “Quantidade de magnéticos”.

6. CONCLUSÕES

Nos trabalhos avaliados, o driver de capacitor chaveado trifásico foi testado nas potências de 54 W e 216 W De modo geral, aparentemente, esse driver apresentou melhor eficiência quando acionando em maior potência, porém, esse resultado não é conclusivo, pois nesse caso foi adotada uma estratégia de comutação suave, que contribui para a redução das perdas por comutação nos interruptores. É interessante ressaltar que em todos os trabalhos relacionados ao capacitor chaveado não foram investigados aspectos de operação em malha fechada.

O conversor *flyback* foi utilizado em vários trabalhos, onde verificou-se basicamente duas vertentes, a saber: uma primeira aborda o conceito de estágio único, onde três transformadores *flyback* foram incorporados à estrutura de um retificador trifásico de onda completa; e uma segunda onde o conversor foi aplicado em conversores modulares. Verificou-se que a abordagem modular é superior pois acionou com maior eficiência lâmpadas de maior potência. Entretanto vale destacar que a abordagem modular possui número muito elevado de componentes, especialmente a de 6 módulos. Destaca-se especialmente a topologia de 3 módulos que apesar de não apresentar a melhor eficiência é aquela que supostamente tem a melhor relação custo versus eficiência dado seu número de componentes.

Por fim, uma topologia que se mostrou muito promissora é a que utilizou o princípio do somatório das saídas de luz. O interessante é que as células são completamente desacopladas entre si. No entanto, a ondulação de corrente nos LEDs em cada célula deve ser avaliada, pois mesmo a luminância resultante sendo constante, a corrente de pico pode limitar o valor médio de corrente nos LEDs, o que pode impossibilitar a obtenção da corrente nominal do LED. Um outro ponto negativo é que a topologia necessita de três malhas de corrente dedicadas e não pode ser aplicada a LEDs integrados, onde não se pode seccionar o arranjo de LEDs.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, CNPq (432307-2016-8), FAPEMIG (APQ-01378-16), INERGE, CEFET-MG e UFJF pelo fomento.

Tabela 1. Comparação entre os conversores revisados

	Capacitor chaveado trifásico	Capacitor chaveado trifásico (ressonante)	Somatório das saídas (boost modular)	Flyback trifásico (Delco)	Flyback trifásico modular (6 células)	Flyback Trifásico (enrolamentos modificados)	Flyback trifásico (grampeador na chave)
Potência de saída (W)	54	216	300	90	90	54	54
Eficiência (%)	82,77	91,00	97,50	90,70	91,20	77,00	68,00
THD (%)	6,19	4,22	7,00	8,00	8,00	6,72	-
Conformidade IEEE 1789-2015	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-	-
Conformidade IEC 61000-3-2	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	-
Tensão alimentação (V)	180 - 220	220	380 - 420	380 - 420	380 - 420	90 - 220	100 - 220
Dimerização (%)	40 - 100	50 - 100	8 - 100	25 - 100	25 - 100	-	-
Frequência rede (Hz)	60	60	50	50	50	60	60
Tensão de saída (V)	38,46	123,72	480,00	48,00	48,00	38,46	38,46
Frequência de comutação (kHz)	43	50	100	100	100	40	40
Modo de condução	CCM	CCM	CCM	DCM	DCM	DCM	DCM
Controle	-	-	Corrente Média	Corrente Média	Corrente Média	Corrente de pico	Corrente de pico
Quantidade de controladores	-	-	3	1	1	1	1
Quantidade de magnéticos	1	1	3	3	6	3	3
Quantidade de diodos	6	6	15	15	12	9	9
Quantidade de grampeadores	0	0	0	3	6	2	1
Quantidade de interruptores controlados	6	6	3	3	6	1	1

REFERÊNCIAS

Almeida, P.S., 2012. Conversor integrado SEPIC BUCK-BOOST aplicado ao acionamento de LEDs de potência em iluminação pública (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG.

Almeida, P.S., Camponogara, D., Dalla Costa, M., Braga, H., Alonso, J.M., 2015. Matching LED and Driver Life Spans: A Review of Different Techniques. IEEE Industrial Electronics Magazine 9, 36–47.

Almeida, P.S., Soares, G.M., Pinto, D.P., Braga, H.A.C., 2012. Integrated SEPIC buck-boost converter as an off-line LED driver without electrolytic capacitors, in: IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Presented at the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4551–4556.

Camponogara, D., Vargas, D.R., Campos, A., Dalla Costa, M.A., Berlitz, F.A., Garcia, J., Alonso, J.M., 2012. Optimized cascade structure applied to LED street lighting, in: IECON 2012 - 38th Annual Conference on

IEEE Industrial Electronics Society. Presented at the IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 4581–4585.

Castro, I., Arias, M., Lamar, D.G., Hernando, M.M., Sebastian, J., 2018. Modular three-phase ac-dc LED driver based on summing the light output of each phase, in: 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Presented at the 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 52–59.

Castro, I., Lamar, D.G., Arias, M., Hernando, M.M., Sebastian, J., 2017. Multicell Three-Phase AC–DC Driver for HB-LED Lighting Applications. IEEE Transactions on Industry Applications 53, 3803–3813.

Castro, I., Lamar, D.G., Arias, M., Sebastián, J., Hernando, M.M., 2016. Three phase converter with galvanic isolation based on Loss-Free Resistors for HB-LED lighting applications, in: 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Presented at the 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 822–829.

- Castro, I., Vazquez, A., Arias, M., Lamar, D.G., Hernando, M.M., Sebastian, J., 2019a. A Review on Flicker-Free AC–DC LED Drivers for Single-Phase and Three-Phase AC Power Grids. *IEEE Transactions on Power Electronics* 34, 10035–10057.
- Castro, I., Vazquez, A., Lamar, D.G., Arias, M., Hernando, M.M., Sebastian, J., 2019b. An Electrolytic Capacitorless Modular Three-Phase AC–DC LED Driver Based on Summing the Light Output of Each Phase. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 7, 2255–2270.
- Coutinho, R.P., de Souza, K.C.A., Antunes, F.L.M., Mineiro Sá, E., 2017. Three-Phase Resonant Switched Capacitor LED Driver With Low Flicker. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 64, 5828–5837.
- Coutinho, R.P., de Souza, K.C.A., Antunes, F.M.L., Miranda, P.H.A., Sá, E.M., 2015a. A three-phase switched capacitor converter without electrolytic capacitor and with power LED dimming, in: 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC). Presented at the 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), pp. 1–6.
- Coutinho, R.P., Sá, E.M., de Souza, K.C.A., Miranda, P.H., Antunes, F.L.M., 2015b. Three-phase switched capacitor converter without electrolytic capacitor for Power LEDs and low output current ripple, in: 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Presented at the 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), pp. 1208–1214.
- Gu, L., Ruan, X., Xu, M., Yao, K., 2009. Means of Eliminating Electrolytic Capacitor in AC/DC Power Supplies for LED Lightings. *IEEE Trans. Power Electron.* 24, 1399–1408.
- Hu, Y., Huber, L., Jovanovic, M.M., 2009. Single-Stage Flyback Power-Factor-Correction Front-End for HB LED Application, in: 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Presented at the 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp. 1–8.
- IEC 61000-3-2, 2018. IEC 61000-3-2 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).
- IEEE Std 1789, 2015. IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers. *IEEE Std 1789-2015* 1–80.
- Kocher, M.J., Steigerwald, R.L., 1983. An AC-to-DC Converter with High Quality Input Waveforms. *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-19, 586–599. <https://doi.org/10.1109/TIA.1983.4504259>
- Kolar, J.W., Friedli, T., 2013. The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part I. *IEEE Transactions on Power Electronics* 28, 176–198.
- Li, S., Tan, S.-C., Lee, C.K., Waffenschmidt, E., Hui, S.Y., Tse, C.K., 2016. A survey, classification, and critical review of light-emitting diode drivers. *IEEE Trans. Power Electron.* 31, 1503–1516.
- Mendonça, M. R., Jr, E.M.S., Sousa, K.C.A., Antunes, F.L.M., 2014. Conversor CA-CC Flyback Trifásico sem Capacitor Eletrolítico Aplicado à Iluminação Pública com LEDs de Potência, in: *Conversor CA-CC Flyback Trifásico Sem Capacitor Eletrolítico Aplicado à Iluminação Pública Com LEDs de Potência*. Presented at the Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu - PR.
- Mendonça, Marcel Ribeiro, Mineiro; Sá, E., Coutinho, R.P., Antunes, F.L.M., 2014. AC-DC single-switch three-phase converter with peak current control for power LEDs, in: 2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. Presented at the 2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, pp. 1–6.
- Minbock, J., Kolar, J.W., 2000. Design and experimental investigation of a single-switch three-phase flyback-derived power factor corrector, in: *INT^{TEL}EC. Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.00CH37131)*. Presented at the *INT^{TEL}EC. Twenty-Second International Telecommunications Energy Conference (Cat. No.00CH37131)*, pp. 471–478.
- Schubert, E.F., 2006. *Light-Emitting Diodes (Second Edition)*, 2006). E. Fred Schubert.
- Singer, S., Fuchs, A., 1996. Multiphase AC-DC conversion by means of loss-free resistive networks. *IEE Proceedings - Circuits, Devices and Systems* 143, 233–240.
- Soares, G.M., Almeida, P.S., Alonso, J.M., Braga, H.A.C., 2017. Capacitance Minimization in Offline LED Drivers Using an Active-Ripple-Compensation Technique. *IEEE Transactions on Power Electronics* 32, 3022–3033.
- Soares, G.M., Alonso, J.M., Braga, H.A.C., 2018. Investigation of the Active Ripple Compensation Technique to Reduce Bulk Capacitance in Offline Flyback-Based LED Drivers. *IEEE Transactions on Power Electronics* 33, 5206–5214.
- Tang, Z., Wang, G., Xie, X., 2011. White LED power supply based on Buck converter with active ripple compensation, in: 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet). Presented at the 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), pp. 943–946.
- Veeramallu, V.K.S., Porpandiselvi, S., Narasimharaju, B.L., Mounika, D., 2017. Reduced ripple current three phase parallel loaded resonant converter for LED lighting, in: 2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI). Presented at the 2017 International Conference on Inventive Computing and Informatics (ICICI), pp. 307–311.
- Zhang Bo, Yang Xu, Xu Ming, Chen Qiaoliang, Wang Zhaoan, 2009. Design of Boost-Flyback Single-Stage PFC converter for LED power supply without electrolytic capacitor for energy-storage, in: 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Presented at the 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 1668–1671.