

SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EMPREGANDO LEDS ALIMENTADO PELA REDE ELÉTRICA OU POR BATERIAS UTILIZANDO APENAS UM CONVERSOR CC-CC

Rafael A. Pinto, Thaís E. Bolzan, Marcelo R. Cosetin, Rodrigo F. Miranda, Tiago B. Marchesan, J. Marcos Alonso* e Ricardo N. do Prado, Member, IEEE

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Grupo de Inteligência em Iluminação – GEDRE

*Universidade de Oviedo, DIEECS – Tecnologia Eletrônica, Espanha
Santa Maria - RS
rafael@gedre.ufsm.br

Resumo - Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto para um sistema de iluminação pública empregando diodos emissores de luz (LEDs) sem consumo de energia a partir da rede elétrica durante o Horário de Ponta, alimentando o circuito por baterias. Além disso, as baterias podem manter o funcionamento do sistema durante uma possível falha no fornecimento de energia pela rede elétrica, operando como um sistema de iluminação de emergência. Estas aplicações são justificadas pela redução da demanda de energia do sistema elétrico de potência e aumento da confiabilidade do sistema de iluminação pública. A aplicação de LEDs para iluminação tem apresentado vantagens devido à longa vida útil dos LEDs agregado à sua alta eficiência luminosa, alto índice de reprodução de cores e emissão de luz direcional. O sistema proposto alimenta os LEDs através da rede elétrica, e através de baterias quando necessário, utilizando um único conversor CC-CC (Buck-Boost). Este mesmo conversor também é utilizado para carregar as baterias através da rede após o Horário de Ponta. O sistema proposto apresenta alta eficiência, alto fator de potência e atende à norma IEC 61000-3-2.

Palavras-Chave – Conversor Bidirecional, Conversores CC/CC, Horário de Ponta, Iluminação de Emergência, Iluminação Pública, LEDs.

STREET LIGHTING SYSTEM BASED ON LEDS SUPPLIED BY THE MAINS OR BY BATTERY USING A SINGLE DC-DC CONVERTER

Abstract – This paper presents a design methodology for a street lighting system based on light emitting diodes (LEDs) without energy consumption from the mains during the Peak Load Time using batteries to supply the circuit during this period. Besides, if a failure on the mains occurs, the batteries can keep the system working as an emergency lighting system. The decrease in energy demand from the generation power plants and transmission lines, and the reliability improvement of the street lighting system justify these applications. The LED

for lighting presents benefits due to its long useful life added to its high luminous efficiency, high color rendering index and directional light emission. The proposed system supplies the LEDs from the mains or from battery using only one DC-DC converter (Buck-Boost). This converter is also used to charge the batteries from the mains after the Peak Load Time. The proposed system has high efficiency, high power factor, and complies with the IEC 61000-3-2 standard.

Keywords – Bidirectional Converter, DC/DC Converters, Peak Load Time, Emergency Lighting, Street Lighting, LEDs.

I. INTRODUÇÃO

A iluminação pública tem uma contribuição significativa na aparência visual da cidade, além de proporcionar melhor visualização no trânsito, segurança aos cidadãos e propiciar atividades de lazer, comércio e cultura durante a noite. Contudo, ela também é responsável por aproximadamente 17% do consumo total de energia elétrica do país [1]. Além disso, a iluminação pública é um dos responsáveis pela sobrecarga do sistema elétrico durante o Horário de Ponta, pois é neste período do dia, em que a demanda é elevada, que as luzes da cidade são geralmente acionadas, carregando ainda mais o sistema elétrico [2].

Em função disso, as concessionárias de energia aplicam tarifas diferenciadas para o consumo de energia durante o Horário de Ponta, penalizando também o consumidor. Para tentar reduzir os gastos com energia elétrica, empresas e concessionárias têm desenvolvido produtos e estimulado o uso de fontes de energia alternativas durante o Horário de Ponta.

Portanto, uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica da rede neste período é acionar o sistema de iluminação pública através de baterias [3]. Projetos semelhantes têm sido feitos para sistemas de iluminação autônomos, destinados aos locais de difícil acesso à rede elétrica [4] e [5].

Os sistemas de iluminação pública atualmente são baseados em lâmpadas de descarga. Lâmpadas de descarga operam em corrente alternada e necessitam de um pulso elevado de tensão para sua ignição [6] e [7]. Estas características dificultam sua alimentação por baterias.

Artigo submetido em 18/11/2012. Revisado em 13/02/2013. Aceito para publicação em 05/03/2013 por Recomendação do editor Henrique A. C. Braga.

Entretanto, devido ao aumento no fluxo luminoso, alta eficiência luminosa e longa vida útil, o uso de LEDs em iluminação pública começou a ser difundido nos últimos anos [2], [8] e [9].

Um estudo de caso tem mostrado resultados positivos a favor do LED em substituição às lâmpadas de descarga para iluminação pública [10]. Dentre as principais justificativas apontadas estão a redução do consumo de energia elétrica e a redução do custo de manutenção. Neste caso, a redução no consumo de energia elétrica foi estimada em 87 %, com uma economia anual superior a dez mil dólares [11].

Além disso, LEDs operam em corrente contínua, não necessitam de ignição e apresentam baixa tensão de condução. Estas características fazem dos LEDs fontes de luz ideais para alimentação por baterias [12].

Então, neste trabalho é proposto um sistema de iluminação pública baseado em LEDs sem consumo de energia a partir da rede elétrica durante o Horário de Ponta, alimentando o circuito por baterias. Além disso, as baterias podem manter o funcionamento do sistema durante uma possível falha no fornecimento de energia pela rede elétrica, operando como um sistema de iluminação de emergência. Estas aplicações são justificadas pela redução da demanda de energia do sistema elétrico de potência e aumento da confiabilidade do sistema de iluminação pública.

As topologias empregadas em sistemas de iluminação geralmente são compostas por um estágio de correção do fator de potência e um estágio para controle da potência na carga [6], [13] e [14]. Para a aplicação proposta, há ainda a necessidade de um estágio para carregar a bateria e outro para alimentar os LEDs através da bateria quando necessário. Então, a Figura 1 representa os estágios de um sistema de iluminação empregando LEDs alimentado pela rede elétrica ou por baterias.

Entretanto, o sistema proposto utiliza apenas um conversor CC-CC (conversor Buck-Boost) para desempenhar as funções dos estágios mostrados na Figura 1. Este conversor é empregado para alimentar os LEDs através da rede elétrica ou da bateria. Os LEDs são alimentados em corrente contínua e a bateria é carregada com a mesma corrente dos LEDs, simplificando ainda mais a topologia e o circuito de realimentação. A utilização de um único

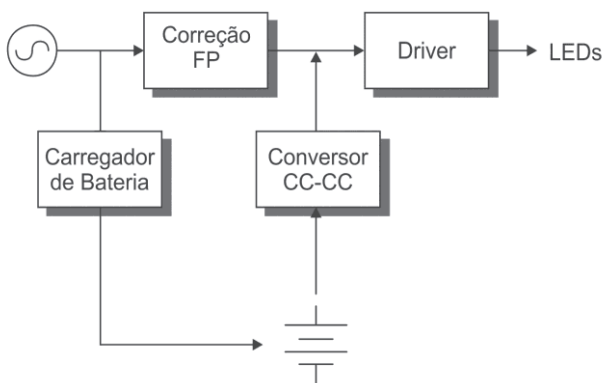


Fig. 1. Estágios de um sistema de iluminação baseado em LEDs alimentados pela rede elétrica ou por baterias.

conversor tem a vantagem de reduzir o número de componentes e, conseqüentemente, o volume e custo do circuito eletrônico. O conversor também é projetado para obter alto fator de potência e atender à norma IEC 61000-3-2 Classe C, que limita o conteúdo harmônico da corrente de entrada de um circuito aplicado à iluminação.

II. METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DA LUMINÁRIA

A luminária projetada visa substituir um sistema tradicional baseado em uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão (HPS) por LEDs. As principais características da lâmpada HPS analisada são mostradas na Tabela I [15]. Os LEDs escolhidos para compor a luminária são da família Luxeon Rebel [16]. Este LED é escolhido principalmente por apresentar alta eficiência luminosa com tamanho reduzido e longa vida útil.

Considerando que a luminária empregando o modelo de LED escolhido deve ter um fluxo luminoso semelhante ao do sistema tradicional, a quantidade de LEDs empregados na luminária proposta foi definida em trinta, atingindo um fluxo luminoso total de 5400 lm. A potência total dos LEDs é próxima à da lâmpada HPS, assim como sua eficiência luminosa. As características da luminária são mostradas na Tabela I.

Embora o fluxo luminoso total da luminária seja ligeiramente inferior ao da lâmpada HPS, a eficiência do refletor e a eficiência em condição mesópica para as fontes de luz não foram consideradas, já que o principal objetivo deste trabalho é a análise das características da topologia proposta. Por isso, espera-se que esta pequena diferença no fluxo luminoso seja compensada, e que a luminária proposta tenha uma eficiência superior à do sistema tradicional considerado. As características térmicas desta luminária empregando a topologia proposta são abordadas em [17].

Os LEDs podem ser conectados em um circuito de três maneiras diferentes: conexão série, conexão paralela ou série-paralela. Na conexão em série todos os LEDs estão submetidos à mesma corrente. Como a luminosidade emitida é proporcional à corrente de polarização direta, este tipo de ligação apresenta a vantagem de manter o mesmo brilho em todos os dispositivos. Além disso, a corrente é monitorada e controlada em apenas um braço, simplificando o circuito de realimentação [12]. Por estas características, os LEDs são conectados em série na luminária proposta.

Contudo, com este tipo de conexão, a falha de apenas um LED pode impossibilitar o funcionamento de toda a luminária. Isto ocorre porque a falha de um LED pode resultar em um circuito aberto, interrompendo o caminho da corrente para os demais. Esta é a principal desvantagem da conexão em série e que leva muitos projetistas a não utilizá-la. Então, para evitar este problema é empregado um circuito de proteção com a introdução de Diacs conectados em paralelo com alguns LEDs formando grupos. O funcionamento deste circuito de proteção é apresentado com maiores detalhes em [12]. Também poderia ser empregado um diodo zener em substituição ao Diac [18].

TABELA I
Características da fonte de luz

	HPS	30 LEDs
Modelo da Lâmpada	VIALOX NAV-E	LXML-PWC1-0100
Fluxo Luminoso Nominal	5600 lm	5400 lm
Potência Nominal	70 W	67,2 W
Eficiência Luminosa	80 lm/W	80,35 lm/W
Temperatura de Cor	1900 K	6500 K
IRC	≤ 25	70
Vida Útil Média	18000 h	50000 horas

III. METODOLOGIA PARA ESPECIFICAÇÃO DO BANCO DE BATERIAS

As baterias mais empregadas nos sistemas de iluminação tradicionais são as de Chumbo-Ácido. Estas baterias também são utilizadas em equipamentos hospitalares, fontes ininterruptas de energia, automóveis, motocicletas e veículos industriais e, por isso, são fabricadas em diversos modelos. Dentre os produtos recicláveis, este tipo de bateria ocupa os primeiros lugares, pois mais de 98% das baterias de chumbo-ácido são recicladas [19]. Os materiais podem ser reaproveitados em sua totalidade e o seu processo de reciclagem é regulamentado, evitando que haja prejuízos ao meio-ambiente ao término de sua vida útil.

A vida útil de uma bateria depende de alguns fatores, entre eles, a profundidade de descarga. Se a capacidade utilizada for inferior à capacidade total, a vida útil da bateria aumenta. Porém, uma bateria com maior capacidade deve ser empregada para manter a mesma autonomia, o que aumenta o custo inicial do sistema. Entretanto, um estudo analisando a influência da profundidade de descarga no custo total das baterias ao longo do tempo mostrou que o investimento inicial pode ser compensado com o aumento da vida útil [2].

A especificação de uma bateria ou um banco de baterias deve levar em conta a tensão de entrada e a autonomia necessária para o sistema a ser alimentado, bem como o custo, volume e peso de cada bateria. Uma das dificuldades de implementação de circuitos alimentados por baterias é a corrente elevada que circula pelos componentes eletrônicos, pois quanto menor a tensão de entrada do circuito, maior é a corrente de entrada, considerando que a potência seja mantida constante. Além disso, correntes maiores aumentam a energia dissipada em calor e reduzem a eficiência do circuito. Por isso, a conexão em série de baterias pode apresentar vantagens devido ao aumento da tensão total aplicada.

Assim, uma análise comparativa para diferentes bancos de baterias [20] alimentando a luminária de LEDs através de um conversor CC-CC foi realizada. A Tabela II mostra que a utilização de quatro baterias apresenta uma redução no volume superior a 45% comparado ao mesmo sistema alimentado com apenas uma bateria. Da mesma maneira, houve uma redução no peso de aproximadamente 33% e no custo em 25%. Portanto, o sistema proposto utiliza um banco de baterias composto por quatro baterias FNC 12190-C conectadas em série, totalizando 48 V.

IV. SISTEMA PROPOSTO

O conversor Buck-Boost tem a característica de fornecer tensões na saída maiores ou menores que a de entrada e com alto fator de potência. Por isso, o conversor Buck-Boost pode ser aplicado para a correção do fator de potência e ainda alimentar os LEDs a partir da rede (operando como abaixador de tensão) ou da bateria (operando como elevador de tensão).

TABELA II
Análise comparativa para bancos de baterias

Tensão Total	Número de Baterias	Modelo das Baterias	Volume	Peso	Custo
12 V	1	FNC 121200-C	100 %	100 %	100 %
24 V	2	FNC 12420-C	68 %	69,2 %	77,6 %
36 V	3	FNC 12260-C	68,4 %	66,9 %	72,7 %
48 V	4	FNC 12190-C	54,2 %	66,6 %	75,3 %

Para LED, estudos têm mostrado que sua alimentação com corrente constante propicia maior eficiência luminosa [21]-[23]. Da mesma forma, um dos métodos de carga de bateria é alimentá-la com corrente constante [24]. Por isso, se o valor da corrente de carga da bateria for projetado para o mesmo valor da corrente dos LEDs, a bateria pode ser conectada em série com os LEDs. Assim, o mesmo conversor que alimenta os LEDs pela rede elétrica também carrega a bateria quando necessário, como mostra a Figura 2.

As principais vantagens desta topologia são a redução significativa no número de componentes, uma vez que apenas um conversor CC-CC é empregado, e o controle da corrente é feito em apenas um braço. As etapas de operação do conversor são mostradas na Figura 3.

Neste circuito o relé R_{Bloqueio} (NA-NF) determina a fonte de alimentação do conversor (rede elétrica ou bateria). O relé R_{Carga} (NA-NF) conecta a bateria em série com os LEDs para recarregá-la. Assim, enquanto os relés R_{Bloqueio} e R_{Carga} estiverem em seu estado normalmente fechado, a rede alimenta o circuito e carrega a bateria. Neste caso, quando o interruptor M_1 entra em condução, a tensão de entrada é aplicada ao indutor, que armazena energia. Nesta etapa de funcionamento, o diodo de saída do conversor Buck-Boost impede que a corrente circule pela carga. Assim, quem mantém a energia nos LEDs e na bateria são os capacitores C_{LEDs} e C_{bat} , como mostra a Figura 3.a.

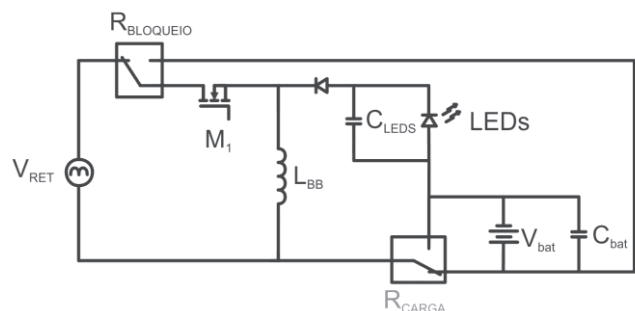


Fig. 2. Topologia proposta: conversor Buck-Boost Bidirecional para alimentação dos LEDs através da rede elétrica ou por bateria com correção do fator de potência e com recarga do banco de baterias em série com os LEDs.

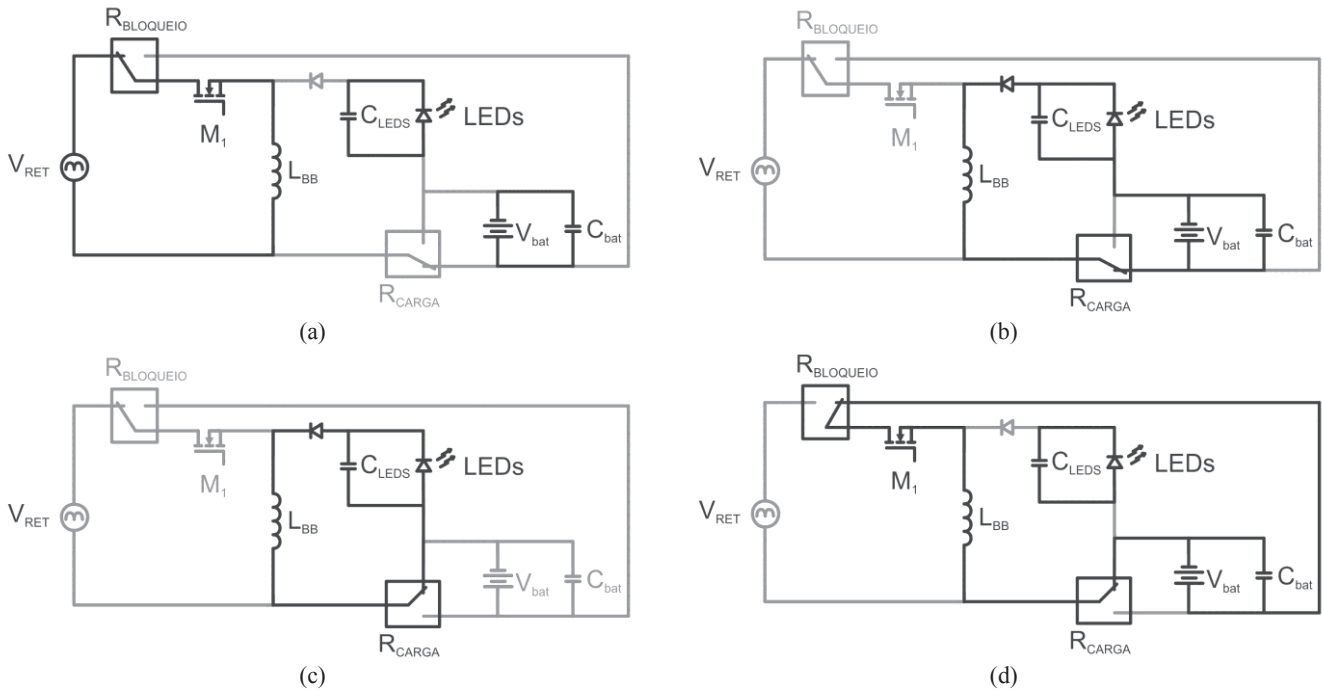


Fig. 3. Etapas de operação para a topologia proposta. Circuito alimentando os LED e recarregando a bateria através da rede elétrica com o interruptor em condução (a) e com o interruptor bloqueado (b); Circuito alimentando somente os LEDs com o interruptor bloqueado (c); Circuito alimentando somente os LED através da bateria com o interruptor em condução (d).

Quando o interruptor é bloqueado, a energia armazenada no indutor é transferida para a carga e para os capacitores, como mostra a Figura 3.b. O diodo determina o sentido de condução da corrente, por isso a polaridade da tensão de saída é oposta à de entrada. Quando o relé R_{Carga} desconecta a bateria do carregador, ao mesmo tempo conecta os LEDs diretamente na saída do conversor. Assim, somente os LEDs são alimentados a partir da rede, como mostra a Figura 3.c.

Durante o Horário de Ponta, ou em caso de falha no fornecimento de energia pela rede elétrica, o relé $R_{Bloqueio}$ conecta o terminal positivo da bateria à entrada do conversor, como mostra a Figura 3.d. Nesta situação, obrigatoriamente o relé R_{Carga} deve permanecer desconectado da bateria. Então, enquanto o interruptor conduz, a tensão da bateria é aplicada ao indutor e o capacitor C_{LEDs} mantém a corrente nos LEDs. Quando o interruptor é bloqueado, o indutor transfere sua energia aos LEDs através do diodo de saída do conversor Buck-Boost. Esta etapa é igual à mostrada na Figura 3.c, porém, com o relé $R_{Bloqueio}$ conectando a bateria à entrada do conversor.

Os capacitores de saída (C_{LEDs} e C_{bat}) devem ser empregados separadamente, caso contrário, durante a transição entre os estados do relé R_{Carga} , uma tensão elevada ($V_{LEDs} + V_{bat}$) seria aplicada instantaneamente aos LEDs, resultando em um pico de corrente prejudicial a estes dispositivos.

O sistema é monitorado por um microcontrolador que determina a fonte de alimentação utilizada (rede ou a bateria) bem como os instantes de acionamento do circuito de acordo com o Horário de Ponta. O microcontrolador (MCF51QE128) também controla o sistema de carga da bateria, aciona o interruptor em alta frequência e regula a

corrente nos LEDs. A corrente dos LEDs é monitorada através de um sensor de efeito hall (ACS712).

A comutação dos relés é realizada com zero de corrente (*Zero-Current Switching, ZCS*). Isto é implementado através do microcontrolador desabilitando o comando do interruptor M_1 por alguns instantes, enquanto ocorre a comutação do relé em ZCS. Este método evita a ocorrência de um arco-elétrico e reduz o desgaste dos contatos. Isto aumenta a vida útil do relé, uma vez que a vida mecânica deste componente é de aproximadamente 10^7 ciclos, aumentando a confiabilidade do sistema de iluminação.

V. METODOLOGIA DO PROJETO

O projeto do conversor Buck-Boost proposto segue as especificações da Tabela III. A luminária e o banco de baterias são descritos nas seções anteriores.

TABELA III
Especificação de Projeto para o Conversor Proposto

Características do Sistema Proposto Alimentado pela Rede	
Tensão Eficaz de Entrada	220 V_{CA}
Frequência da Rede	60 Hz
Número de LEDs	30
Tensão Máxima nos LEDs	102 V_{CC}
Corrente Nominal nos LEDs	700 mA
Frequência de Comutação	40 kHz
Rendimento Estimado	90 %
Características do Sistema Proposto Alimentado pela Bateria	
Número de Baterias	4
Tensão do Banco de Baterias	48 V_{CC}
Rendimento Estimado	90 %

A. Projeto do Sistema de Carga da Bateria

A capacidade da bateria é determinada considerando a energia e o tempo necessários para manter o sistema em funcionamento. Considerando a curva de demanda mostrada na Figura 4, a bateria deve alimentar o sistema no período compreendido entre 18 horas e 21 horas. Então, a autonomia do sistema deve ser superior a 3 horas de funcionamento. A capacidade da bateria é determinada por (1) e o tempo de carga por (2).

$$Bat_{Capacidade} = \frac{\frac{P_{LEDs}}{\eta} \times t_{func}}{V_{bat} \times PD \times TD \times EC} \quad (1)$$

$$t_{carga} = \frac{\frac{P_{LEDs}}{\eta} \times t_{func}}{V_{bat} \times I_{LEDs} \times EC} \quad (2)$$

Onde:

Bat _{Capacidade}	- Capacidade da bateria.
P _{LEDs}	- Potência total dos LEDs.
η	- Redimento estimado do circuito.
t _{func}	- Tempo de funcionamento do circuito.
V _{bat}	- Tensão do banco de baterias.
PD	- Profundidade de descarga da bateria (%).
TD	- Taxa de descarga (%).
EC	- Eficiência Coulômbica (%).
t _{carga}	- Tempo de carga da bateria.
I _{LEDs}	- Corrente nos LEDs.

Um banco de baterias composto por quatro baterias conectadas em série apresenta uma redução significativa no custo, volume e peso, conforme mostrado na Seção III. Portanto, a tensão do banco de baterias é de 48V. Com o objetivo de aumentar a vida útil do banco de baterias, a profundidade de descarga considerada no projeto é de 30 % [2]. Além disso, a taxa de descarga da bateria obtida através dos dados fornecidos pelo fabricante é de 95 % e a eficiência coulômbica estimada em 95 % [20]. Para o caso considerado, quatro baterias de 19 Ah são suficientes para garantir uma autonomia superior a 3 horas.

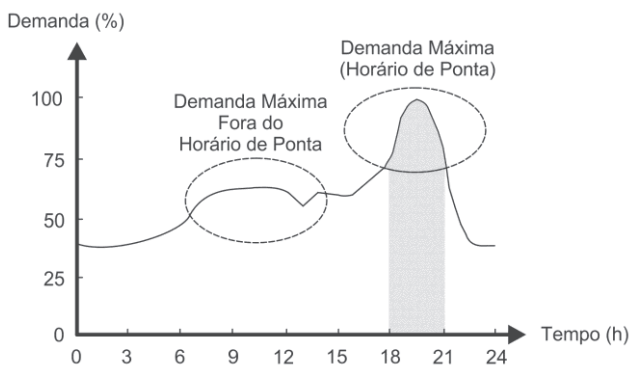


Fig. 4. Curva de carga típica para um dia de semana no Brasil [25].

A corrente de carga da bateria deve ser a mesma corrente que circula através dos LEDs (700 mA). Desta forma, o tempo de carga é de aproximadamente 7,5 horas. Contudo, a bateria pode ser carregada durante a noite, período do dia em que a demanda é menor. Assim, considerando a curva de demanda mostrada na Figura 4, a carga da bateria pode ser feita entre 22 horas e 6 horas.

B. Projeto do Conversor Buck-Boost Alimentado pela Rede

O conversor Buck-Boost operando no modo de condução descontínua (MCD) pode ser empregado como estágio de correção do fator de potência. Se a razão cíclica for mantida constante durante o período da rede, a corrente de entrada do conversor é pulsada em alta frequência, mas quando filtrada, seu valor médio segue a forma de onda da tensão de entrada, resultando em alto fator de potência.

Portanto, o conversor Buck-Boost é projetado para operar em modo de condução descontínua quando alimentado pela rede. Assim, a razão cíclica máxima é dada por (3). Entretanto, quando alimentado pela rede, este conversor apresenta duas etapas de operação. Na primeira delas, a bateria é carregada com a mesma corrente dos LEDs e a tensão máxima de saída do conversor é igual a 150 V ($V_{LEDs} + V_{bat}$).

Na segunda etapa, somente os LEDs são alimentados e a tensão máxima de saída é igual a 102 V (V_{LEDs}). A tensão de pico da entrada é 311 V. Então, para a primeira etapa, a razão cíclica máxima é 32,5%, enquanto para a segunda etapa, a razão cíclica máxima é 24,7 %. Considerando o limite inferior de razão cíclica como o pior caso (segunda etapa), o valor especificado para o ciclo de trabalho é 23 %.

A potência de saída do conversor para a segunda etapa de operação é igual à potência máxima da luminária de LEDs (71,4 W). Assim, baseado na energia necessária para alimentar a luminária com o valor de razão cíclica especificado, o valor da indutância do conversor Buck-Boost pode ser obtido por (4). Para o sistema proposto, a indutância calculada para o conversor Buck-Boost é de 403,4 μH.

$$D_{m\acute{a}x} = \frac{V_O}{V_{in_pk} + V_O} \quad (3)$$

$$L_{BB} = \frac{V_{in_pk}^2 \times D^2}{4 \times \left(\frac{P_{LEDs}}{\eta} \right) \times f_S} \quad (4)$$

Onde:

D _{máx}	- Razão cíclica máxima.
V _O	- Tensão de saída do conversor.
V _{in_pk}	- Tensão de pico da rede elétrica.
L _{BB}	- Indutância do conversor Buck-Boost.
D	- Razão cíclica de operação.
f _S	- Frequência de comutação.

O valor da indutância calculado para uma das etapas de operação deve ser suficiente para manter a potência nas demais etapas, pois o indutor não pode ser alterado com o circuito em funcionamento. Por isso, para a primeira etapa de operação, a razão cíclica deve ser aumentada para manter a tensão de saída no valor desejado ($V_{LEDs} + V_{bat}$). Assim, o valor da razão cíclica para a primeira etapa de operação é de 27,9 %, e pode ser obtido por (5).

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \left(\frac{P_{LEDs} + P_{bat}}{\eta} \right) \times f_S \times L_{BB}}{V_{in_pk}^2}} \quad (5)$$

A ondulação de corrente nos LEDs deve ser limitada para evitar danos a este semiconductor, bem como redução no fluxo luminoso e eficiência luminosa [21]. Assim, o capacitor de saída é projetado para limitar a ondulação da corrente nos LEDs provocada pela tensão de entrada retificada, e pode ser calculado por (6). A resistência dinâmica dos LEDs para a luminária projetada é 13.95 Ω e a ondulação de corrente considerada é de 30%. A frequência da rede elétrica é 60 Hz e o valor comercial do capacitor empregado é 680 μF .

A vida útil dos capacitores eletrolíticos geralmente varia entre 1.000 e 15.000 horas dependendo das suas condições de operação, o que é considerada curta se comparada à vida útil dos LEDs, que podem chegar a 50.000 horas. Então, para evitar que a vida útil do capacitor eletrolítico seja o fator limitante da vida útil do sistema completo, o capacitor de barramento empregado é do modelo EPCOS B43501-A2687-M (680 μF / 200 V). Para as condições de projeto (ondulação de corrente na carga e sua frequência), este capacitor terá a mesma vida útil dos LEDs (50.000 horas) se a temperatura ambiente for inferior a 68°C, conforme especificação do seu fabricante [26].

A tensão máxima no interruptor é 461 V, calculada através da Equação (7). Seu valor máximo ocorre quando os LEDs são alimentados junto com a carga da bateria através da rede elétrica.

$$C_{LEDs} = \frac{1}{2\pi \times f_{rede} \times R_d \times \Delta I_{LEDs}} \quad (6)$$

$$V_{ds_m\acute{a}x} = V_{ent_pico} + V_{LEDs} + V_{bat} \quad (7)$$

Onde:

- C_{LEDs} - Capacitor de saída do conversor.
- R_d - Resistência dinâmica dos LEDs.
- ΔI_{LEDs} - Ondulação da corrente nos LEDs.
- f_{rede} - Frequência da rede.
- $V_{ds_m\acute{a}x}$ - Tensão máxima no interruptor.

C. Projeto do Conversor Alimentado pela Bateria

O conversor Buck-Boost alimentado pelo banco de baterias pode ser projetado para o modo de condução contínuo ou descontínuo, já que a correção do fator de potência não é necessária. Entretanto, a corrente de pico é maior para o conversor operando no modo de condução descontínuo. Além disso, devido à especificação de projeto, a frequência de operação em MCD ficou limitada em 20 kHz, o que causa um aumento no tamanho do indutor bem como a possibilidade de ruído audível. Por isso, o modo de condução contínuo (MCC) foi escolhido para o funcionamento do circuito alimentado pela bateria.

Para o MCC, a razão cíclica do conversor é obtida da mesma maneira apresentada em (3), para o circuito alimentando somente os LEDs. Porém, a tensão de entrada é a tensão do banco de baterias (V_{bat}). Então, o valor calculado é de 68 %.

A indutância do conversor já foi definida em (4). Assim, a ondulação da corrente no indutor, a corrente média de entrada e a corrente de pico no interruptor são obtidas em (8), (9) e (10), respectivamente.

$$\Delta I_{BB} = \frac{V_{bat} \times D}{2 \times L_{BB} \times f_S} = 1A \quad (8)$$

$$I_{ent_m\acute{e}d_bat} = \frac{P_{LEDs}}{V_{bat}} = 1,49A \quad (9)$$

$$I_{ds_pico_bat} = I_{ent_m\acute{e}d_bat} + \Delta I_{BB} = 2,5A \quad (10)$$

Onde:

- ΔI_{BB} - Ondulação da corrente no indutor.
- $I_{ent_m\acute{e}d_bat}$ - Corrente média de entrada.
- $I_{ds_pico_bat}$ - Corrente de pico no interruptor.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Conversor Buck-Boost Alimentado pela Rede

As formas de onda da tensão e corrente nos LEDs, quando alimentados pela rede elétrica, são mostradas na Figura 5, juntamente com o valor da potência. Enquanto os LEDs são alimentados pela rede, há uma ondulação na corrente de aproximadamente 30%, devido à variação da tensão retificada na entrada. O valor médio da corrente é mantido em 682 mA e a tensão média nos LEDs em 90,8 V. Portanto, a potência de saída do conversor é de 62 W.

Para analisar o rendimento da topologia, bem como o estágio de correção do fator de potência, as formas de onda da tensão e corrente de entrada do circuito são mostradas na Figura 6. A corrente eficaz na entrada é 305 mA e a potência de entrada é de 67,1 W. Então, o rendimento da topologia é de 92,4 %.

Para obter esta forma de onda de corrente na entrada do circuito, foi empregado um filtro LC, responsável por filtrar as componentes harmônicas de alta frequência do lado do conversor para a rede. O valor da indutância e valor da capacitância empregadas neste filtro são 1 mH e 470 nF, respectivamente.

Através desta figura é possível perceber que a corrente segue a tensão senoidal, proporcionando um alto fator de potência. A taxa de distorção harmônica total é 7,1 % e o fator de potência é 0,9975.

A tensão e corrente no interruptor são mostradas na Figura 7. A corrente de pico no interruptor é aproximadamente 4 A, e seu valor eficaz considerando a ondulação de baixa frequência é de 776 mA. A tensão de bloqueio no interruptor é de 464 V.

A Figura 8 mostra as formas de onda da tensão e corrente na saída do conversor quando a bateria é carregada em série com os LEDs. Por isso, a tensão é igual a 142V ($V_{LEDs} + V_{bat}$) e a corrente nos LEDs é igual à da bateria (708 mA). A potência de saída do conversor é a potência dos LEDs mais a potência de carga da bateria, então o valor total da potência de saída é 101 W.

As formas de onda da tensão e corrente de entrada do circuito são mostradas na Figura 9. A corrente eficaz é de 494 mA e a potência de entrada é de 108 W. Então, o rendimento da topologia é de 93.5 %. A taxa de distorção harmônica total é 5,5 % e o fator de potência é 0.9985.

A tensão e corrente no interruptor (IRFPE50) são mostradas na Figura 10. A corrente de pico no interruptor é aproximadamente 4,6 A, e seu valor eficaz considerando a ondulação de baixa frequência é de 1,6 A. A tensão de bloqueio no interruptor é de 512 V. A Figura 11 mostra o conteúdo harmônico da corrente de entrada para o circuito proposto, o qual está de acordo com a norma IEC 61000-3-2.

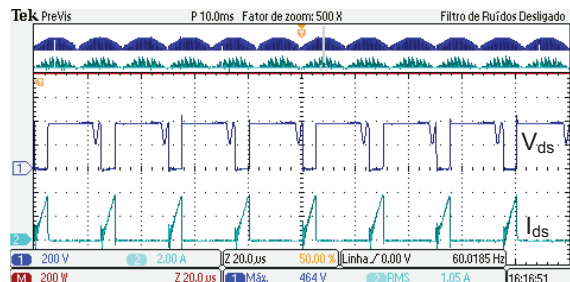


Fig. 7. Tensão e corrente no interruptor para o circuito proposto alimentando somente os LEDs através da rede elétrica (200 V/div, 2 A/div, 20 μ s/div).

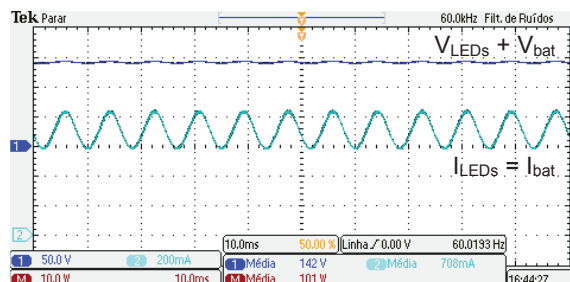


Fig. 8. Tensão total na saída ($V_{LEDs} + V_{bat}$) e corrente de saída ($I_{LEDs} = I_{bat}$) (50 V/div, 200 mA/div, 10 ms/div).

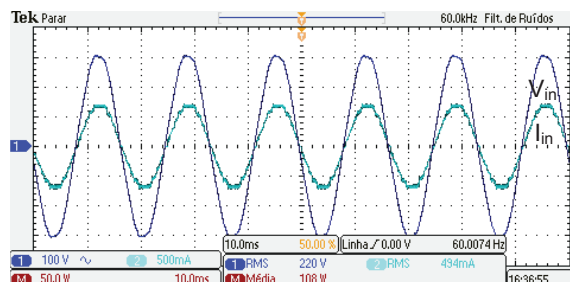


Fig. 9. Tensão e corrente de entrada para o circuito proposto alimentando os LEDs e recarregando a bateria através da rede (100 V/div, 500 mA/div, 10 ms/div).

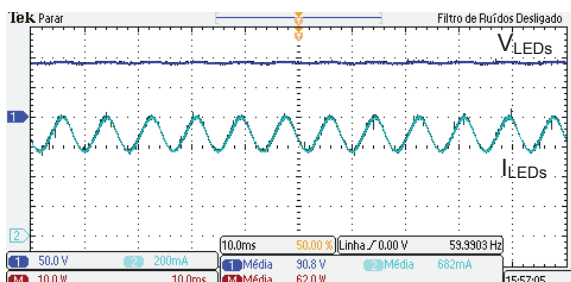


Fig. 5. Tensão e corrente nos LEDs para o circuito alimentado através da rede elétrica (50 V/div, 200 mA/div, 10 ms/div).

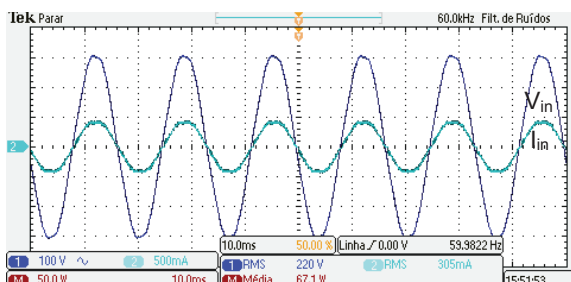


Fig. 6. Tensão e corrente de entrada para o circuito proposto alimentando somente os LEDs através da rede elétrica (100 V/div, 500 mA/div, 10 ms/div).

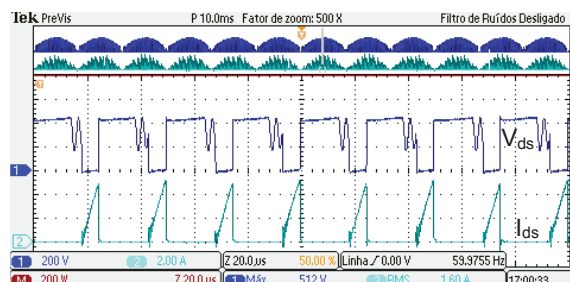


Fig. 10. Tensão e corrente no interruptor para o circuito proposto alimentando os LEDs e carregando a bateria através da rede (200 V/div, 2 A/div, 20 μ s/div).

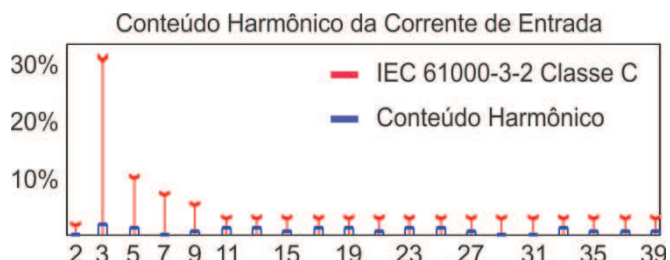


Fig. 11. Conteúdo harmônico da corrente de entrada para o circuito proposto alimentando os LEDs e recarregando a bateria.

B. Conversor Buck-Boost Alimentado pela Bateria

Na Figura 12 a tensão e corrente nos LEDs alimentados através da bateria são apresentadas. A corrente é mantida constante em 685 mA e a potência de saída do conversor é de 60,6 W.

A tensão e corrente de entrada são mostradas na Figura 13. Nesta etapa de operação, o conversor opera no modo de condução contínua, e o capacitor em paralelo com a bateria reduz a ondulação de corrente, o qual contribui para o aumento da vida útil da bateria. A tensão da bateria é 48,2 V e a corrente média é 1,42 A. A potência de entrada é de 68,5 W, resultando em um rendimento de 88,4 %.

Na Figura 14, a tensão e corrente no interruptor para o circuito alimentado pela bateria são apresentadas. A corrente eficaz é de 1,96 A e a tensão máxima no interruptor é de 196 V.

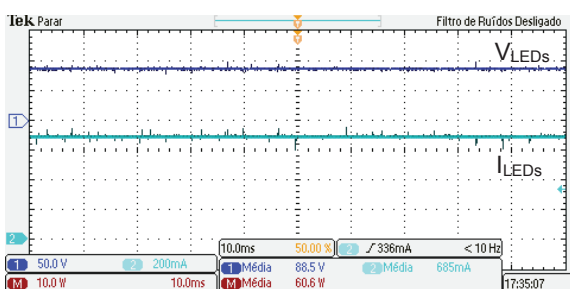


Fig. 12. Tensão e corrente nos LEDs para o circuito proposto alimentado através das baterias (50 V/div, 200 mA/div, 10 ms/div).

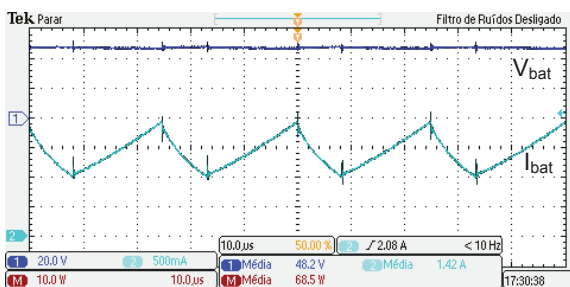


Fig. 13. Tensão e corrente de entrada para o circuito alimentado através das baterias (100 V/div, 500 mA/div, 10 ms/div).

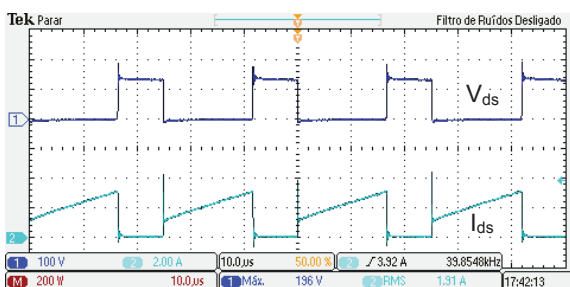


Fig. 14. Tensão e corrente no interruptor para o circuito alimentado através das baterias (100 V/div, 2 A/div, 10 μs/div).

VII. GERENCIAMENTO E CONTROLE DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO PROPOSTO

Para gerenciar e controlar o sistema de iluminação pública foi utilizada uma plataforma microcontrolada. Neste sistema, foram definidos quatro modos de operação: Modo Normal

(MN), Modo Recarga (MR), Modo Horário de Ponta (MHP) e Modo de Emergência (ME). No MN somente os LEDs são alimentados através da rede elétrica, no MR a bateria é conectada ao circuito para efetuar sua recarga. Quando o sistema está em MHP, significa que os LEDs devem ser alimentados através das baterias. O ME mantém a luminária acesa alimentando o circuito por baterias na ausência de energia da rede elétrica.

Além de alterar entre os modos de operação, o sistema de gerenciamento é responsável pelo controle da corrente nos LEDs. Para manter o valor médio da corrente nos LEDs igual ao valor nominal, foi projetado um compensador $C_i(z)$ do tipo Integral (I) para cada modo de operação utilizando a técnica de alocação de pólos através da ferramenta SISOTool do MatLab®. O diagrama de blocos da malha de corrente é mostrado na Figura 15 e o ganho do conversor Analógico/Digital (A/D), H_i é obtido por (11).

As equações características para os compensadores foram discretizadas utilizando a técnica Retentor de Ordem Zero (Zero-Order Hold, ZOH) e amostradas numa frequência de 40 kHz. As equações de diferenças são exibidas em (12), (13) e (14), respectivamente para o MN, MR e MHP.

$$H_i = \frac{2^{N_b} \cdot H_{se}}{V_{hr} - V_{lr}} \quad (11)$$

$$d_{k_A} = d_{k_A-1} + 1.008 \cdot e_{k_A-1} \quad (12)$$

$$d_{k_B} = d_{k_B-1} + 2.0935 \cdot e_{k_B-1} \quad (13)$$

$$d_{k_C} = d_{k_C-1} + 1.039 \cdot e_{k_C-1} \quad (14)$$

Onde:

- N_b - Número de bits do conversor A/D.
- H_{se} - Ganho do sensor de corrente.
- V_{hr} - Referência alta de tensão do A/D.
- V_{lr} - Referência baixa de tensão do A/D.

Para a análise do controle, o diagrama de bode é mostrado na Figura 16 e a resposta ao degrau na Figura 17, sendo que essa análise foi feita para o MN. A banda passante do sistema é de aproximadamente 12 Hz, uma década abaixo da frequência de ondulação da saída do conversor Buck-Boost, a fim de evitar uma distorção na corrente de entrada. Para o MHP e o ME, onde a bateria é a fonte de alimentação do circuito, a banda passante é de 4 kHz, uma década abaixo da frequência de comutação.

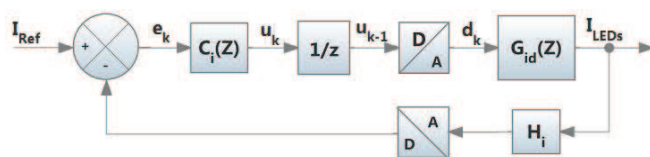


Fig. 15. Diagrama de blocos da malha de corrente.

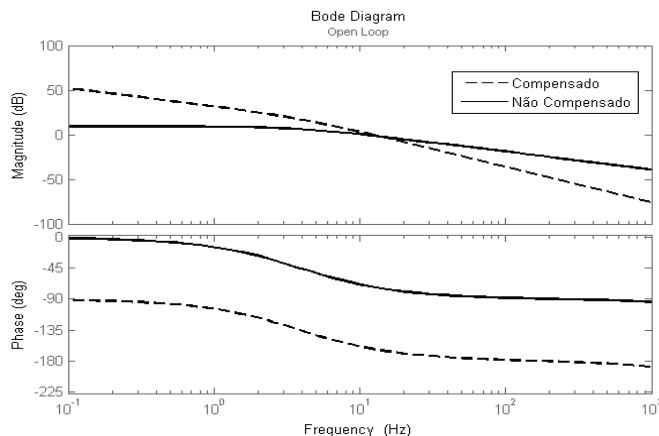


Fig. 16. Diagrama de Bode em malha aberta para o sistema compensado e não compensado, para o circuito operando no MN.

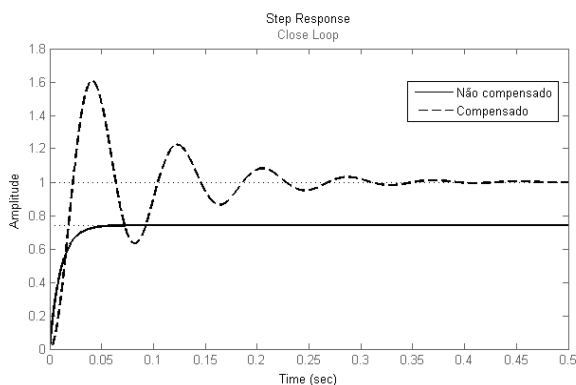


Fig. 17. Resposta ao degrau para o sistema operando em malha fechada, sem compensador e com compensador.

Então, para verificar o comportamento da topologia operando em malha fechada, os resultados experimentais obtidos durante a transição entre os modos de operação MHP e MR são mostrados na Figura 18. Na primeira etapa, os LEDs são alimentados através da bateria. Cada segundo desta etapa de operação representa uma hora de funcionamento real do sistema. Por isso, os LEDs são alimentados através das baterias apenas por 3 segundos, representando 3 horas de funcionamento durante o Horário de Ponta. Logo após, há um intervalo ao qual o interruptor M_1 é bloqueado para que a comutação dos relés seja feita em ZCS. Na próxima etapa, o circuito alimenta os LEDs e recarrega as baterias através da rede elétrica.

A Figura 19 mostra as formas de onda da corrente de entrada, da corrente nos LEDs e da corrente nas baterias durante as transições entre os modos de operação MR, MN e MR. No Modo Recarga, a rede elétrica alimenta os LEDs e recarrega a bateria. Logo após a comutação dos relés em ZCS, somente os LEDs são alimentados através da rede elétrica. Com isso, é possível observar que a corrente na bateria é zero e a corrente de entrada tem um valor menor. Na terceira etapa a bateria é novamente conectada ao circuito para efetuar a recarga.

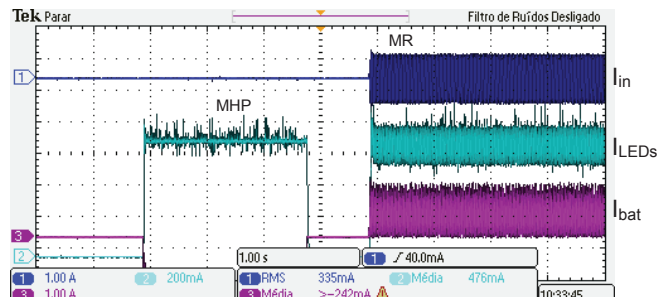


Fig. 18. Formas de onda da corrente de entrada, da corrente nos LEDs e da corrente nas baterias durante as transições entre os modos de operação MHP e MR.

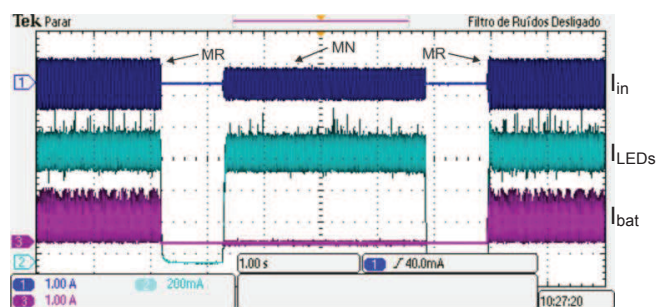


Fig. 19. Formas de onda da corrente de entrada, da corrente nos LEDs e da corrente nas baterias durante as transições entre os modos de operação MR, MN e MR.

VIII. CONCLUSÃO

O sistema proposto alimenta os LEDs através da rede elétrica e através de baterias quando necessário. Entretanto, seu diferencial está na utilização de um único conversor CC-CC (Buck-Boost) ao invés de dois ou mais conversores como geralmente ocorre em sistemas de iluminação. As aplicações para esta topologia são justificadas pela redução da demanda de energia do sistema elétrico de potência durante o horário de ponta e aumento da confiabilidade do sistema de iluminação pública, mantendo seu funcionamento através das baterias durante o horário de ponta e sob uma possível falha no fornecimento de energia pela rede elétrica.

A análise e especificação das baterias são importantes para a redução de custo, do peso e volume. O banco de baterias foi projetado para ser recarregado com a mesma corrente dos LEDs, evitando o uso de outro conversor e reduzindo o circuito de controle, pois a corrente é controlada em apenas um braço. Isto reduz a quantidade de componentes e simplifica o projeto, tornando o sistema mais robusto e atrativo para ser comercializado. A topologia proposta também pode ser aplicada para alimentar outros tipos de carga, bem como sistemas de iluminação de emergência de baixa potência para uso residencial.

Os resultados experimentais confirmam a metodologia de projeto utilizada e mostram que o sistema proposto apresenta alta eficiência, alto fator de potência e atende à norma IEC 61000-3-2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte para este trabalho fornecido pela CAPES e CNPq, bem como à NEWMAX pela doação das baterias utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] G. J. C. da Costa, "Iluminação econômica: cálculo e avaliação", *EDIPUCRS*, pp 561, 2005..
- [2] M. A. D. Costa et. al, "A high efficiency autonomous street lighting system based on solar energy and LEDs", *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, pp. 265 - 273, 2009.
- [3] E. M S. Junior, S. Daher, F. L. M. Antunes, C. M. T. Cruz, "Photovoltaic system for supply public illumination in electrical energy demand peak", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, Nineteenth Annual IEEE*, vol.3, pp. 1501- 1506, 2004.
- [4] A. Schittler et al., "Sistema de iluminação residencial baseado em LEDs e energia solar", *Congresso Brasileiro de Automática*, 2008.
- [5] L. Schuch et. al, "Sistema autônomo de iluminação pública de alta eficiência baseado em energia solar e LEDs", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, fevereiro de 2011.
- [6] L. M. F. Morais, P.F. Donoso-Garcia, S. I. Seleme Júnior, P. C. Cortizo, M. A. S. Mendes, "Reator eletrônico para lâmpada de vapor de sódio de alta pressão com alto fator de potência utilizando formas de onda de tensão sintetizadas via PWM", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, fevereiro de 2008.
- [7] D. Rodovalho, F. V. R. da Silva, E. A. A. Coelho, L. C. de Freitas, J. B. Vieira Júnior, "Proposta de uma topologia de reator eletrônico utilizado para acionar uma ou mais lâmpadas HPS com forma de onda de tensão sintetizada", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, maio de 2009.
- [8] X. Long, J. Zhou, "An intelligent driver for Light Emitting Diode street lighting", *Automation Congress*, pp. 1-5, 2008.
- [9] D.R. Nuttall et al, "Design of a LED street lighting system", *IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, pp.436-440, 2008.
- [10] LUMILEDS, "Lansing street lighting", <www.philipslumileds.com/uploads/57/CS11-pdf>, 2008.
- [11] OSRAM, "Case study: Lansing city street lights", 2010.
- [12] R. A. Pinto, M. R. Cosetin,, T. B. Marchesan, A. Campos,R. N. do Prado, "Lâmpada Compacta Empregando LEDs", *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, v. 14, p. 133-140, 2009.
- [13] T. B. Marchesan, M. D. Costa, M. Perdigão, J. M. Alonso, R. N. Prado, "Analysis and design of two flyback-based integrated converters for the implementation of LFSW electronic ballasts", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, novembro de 2008.
- [14] M. A. D. Costa, T. B. Marchesan, J. F. da Silveira, R. N. Prado, J. M. Alonso, "Estudo comparativo entre topologias integradas para alimentação de lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, maio de 2010.
- [15] OSRAM, Catálogos e Produtos, VIALOX NAV-E, 2010.
- [16] LUXEON, Luxeon Rebel: General Purpose White Portfolio, Folha de Especificação, 2010.
- [17] V. Bender et. al., "An Optimized Methodology for LED Lighting Systems Designers", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2012.
- [18] W. Dunn, D. Williams, "LED circuit with zener diodes", *United States Patent Application Publication*, US 2012/0062819 A1, 2011.
- [19] Battery Council International, "Battery Recycling: Recycling and Sustainability Brochure", <https://batteryCouncil.site-ym.com/>, 2012.
- [20] NEWMAX, Catálogo de Produtos, Disponível em: http://www.newmax.com.br/baterias/br/pages/baterias_12v.asp. 2010.
- [21] P. S. Almeida, F. J. Nogueira, L. F. A. Guedes, H. A. C. Braga, "An experimental study on the photometrical impacts of several current waveforms on power white LEDs," *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp.728-733, 11-15 Sept. 2011.
- [22] M. Schmid et al., "Evaluation on the efficiency of power LEDs driven with currents typical to switch mode power supplies", *Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting*, 2007.
- [23] G. Sauerländer et al., "Driver electronics for LEDs", *Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 5, p. 2621-2626, 2006.
- [24] T. B. Lazzarin, "Estudo e implementação de um carregador de baterias com uma técnica de avaliação de sua vida útil", *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*, 2006.
- [25] PROCCEL EPP – Eficiência Energética nos Prédios Públicos, Manual do Pré-Diagnóstico Energético - Autodiagnóstico na Área de Prédios Públicos. Rio de Janeiro, 2010.
- [26] EPCOS – Aluminum electrolytic capacitors, Snap-in capacitors, Series/Type: B43501, Setembro de 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael A. Pinto nasceu em Santa Maria, Brasil, em 1984. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2007), mestrado (2008) e doutorado (2012) pela Universidade Federal de Santa Maria. É professor do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM/UFSM) desde 2009 e pesquisador do grupo GEDRE – Inteligência em Iluminação desde 2002. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, sistemas de iluminação, conversores CC-CC, iluminação de estado sólido (LEDs). Rafael é membro da SOBRAEP desde 2007.

Thaís E. Bolzan, nascida em Santa Maria, Brasil, em 1994. É formada em eletrotécnica (2012) pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM/UFSM). Atualmente está fazendo graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É membro do grupo GEDRE – Inteligência em Iluminação desde 2010. Suas áreas de

interesse são: eletrônica de potência, iluminação de estado sólido (LEDs), sistemas de iluminação, conversores CC-CC.

Marcelo R. Cosetin, nascido em 1985 em Horizontina, Brasil. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Santa Maria em julho de 2011. Pesquisador do grupo GEDRE - Inteligência em Iluminação desde 2007. No primeiro semestre de 2011 realizou Estágio Curricular Supervisionado junto ao Fraunhofer Institute - IZM - Berlim, Alemanha. Atualmente realiza Mestrado junto ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Tem como suas principais áreas de pesquisa: iluminação inteligente, LEDs, reatores eletrônicos e iluminação pública.

Rodrigo F. Miranda, nascido em Santa Maria, Brasil, em 1989. Atualmente é aluno de graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria e membro do grupo GEDRE – Inteligência em Iluminação. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, iluminação de estado sólido (LEDs), sistemas de iluminação, conversores CC-CC.

Tiago B. Marchesan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) pela mesma Universidade. Realizou seu doutorado com estágio na Universidad de Oviedo, Espanha. Atualmente é Professor Adjunto do Departamento de Eletrônica e Computação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, tendo atuado como pesquisador do Grupo WEG (Weg Equipamentos Elétricos S.A.), professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e da Universidade do Noroeste do Estado do RS (UNIJUI). Atua, principalmente, nas seguintes áreas: Projeto e desenvolvimento de reatores eletrônicos para lâmpadas de descarga em alta e baixa pressão, fontes chaveadas, métodos de correção do fator de potência, controle de intensidade luminosa, e em inovações na área de transformadores de potência (Grupo WEG T&D).

J. Marcos Alonso, nascido em 27/09/1967 em Gijón – Espanha, possui graduação em Engenharia Industrial e Doutorado pela Universidad de Oviedo, em 1990 e 1994, respectivamente. De 1990 a 1994 trabalhou como Professor Assistente no Departamento de Eletrônica da Universidade de Oviedo. De 1997 a 2007 trabalhou como Professor Associado no mesmo departamento, onde desde 2007 é Professor Catedrático.

Prof. Alonso é primeiro autor de mais de setenta artigos publicados em congressos internacionais e revistas de eletrônica de potência; e é co-autor de mais de duzentos artigos. Seus tópicos de interesse incluem: reatores eletrônicos de alta frequência, modelagem de lâmpadas de descarga, conversores eletrônicos para geração de ozônio, conversores eletrônicos para aplicações eletrostáticas, topologias para correção do fator de potência, e conversores estáticos de alta frequência em geral. Prof. Alonso é orientador de seis teses de doutorado na área de eletrônica de potência e possui seis patentes espanholas concedidas.

Prof. Alonso foi premiado pelo governo espanhol no Programa de Intensificação de Atividades de Pesquisa, no período de 2008-2012. Também recebeu o prêmio intitulado Early Career Award, do IEEE Industrial Electronics Society em 2006. Recebeu o prêmio best paper award em 2009 no congresso IEEE International Symposium on Industrial Electronics, também o second prize paper award em 2005 no congresso IEEE Industry Applications Society Meeting, Production and Application of Light Committee, e também o prêmio IEEE Industrial Electronics Society Meritorious Paper Award, em 1996.

Dr. Alonso é membro ativo do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), onde colabora como revisor de periódicos, chairman em congressos, organizador de sessões especiais, entre outras atividades. Desde outubro de 2002 colabora como Editor Associado no IEEE Transactions on Power Electronics no tema de Aplicações de Iluminação. Também colaborou como Guest Editor no Special Issue on Lighting Applications, publicado na IEEE Transactions on Power Electronics, em maio de 2007. Também é membro do European Power Electronics Association e pertence ao International Steering Committee of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), onde normalmente colabora como topic co-chair. Também é membro do International Ozone Association (IOA).

Ricardo N. do Prado, nascido em Itapiranga-SC em 1961. Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em 1984. Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1987 e 1993, respectivamente. Em 1986 trabalhou como Professor Substituto na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). De 1987 a 1992 trabalhou como Professor Assistente na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Desde 1993 está com a Universidade Federal de Santa Maria, onde atualmente é Professor Associado junto ao Departamento de Processamento de Energia Elétrica. De 2005 a 2006 realizou estágio pós-doutoral junto ao Fraunhofer Institute, Alemanha. É autor de mais de 250 artigos técnicos publicados em congressos e revistas nacionais e internacionais. Seus tópicos de interesse incluem: conversores estáticos, lâmpadas de descarga de alta e baixa pressão, eficiência luminosa, reatores eletrônicos, LEDs como fontes de luz e correção do fator de potência. Dr. Prado é membro fundador da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, membro da Sociedade Brasileira de Automática e de várias sociedades da IEEE. Também é revisor da Revista Eletrônica de Potência, Revista Brasileira de Automática e de várias revistas da IEEE.