

SISTEMA AUTÔNOMO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE ALTA EFICIÊNCIA BASEADO EM ENERGIA SOLAR E LEDS

Luciano Schuch, Marco A. Dalla Costa, Cassiano Rech, Leandro Michels,
Guilherme H. Costa*, Anderson S. dos Santos**

Universidade Federal de Santa Maria
UFSM – CT – DPEE
Av. Roraima, nº 1000,
97105-900 - Santa Maria, RS, Brasil

Universidade de Caxias do Sul*
Centro de Ciências Exatas e Tecnologia
Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130
95070-560 - Caxias do Sul, RS, Brasil

Intral S.A. – Ind. de Mat. Elétricos**
Laboratório de Reatores Eletrônicos
Travessa Rio Grande, 130
95098-750 - Caxias do Sul, RS, Brasil

schuch.prof@gmail.com, marcodc@gedre.ufsm.br, rech.cassiano@gmail.com, leandromichels@gmail.com, holsbach@gmail.com, anderson@intral.com.br

Resumo – Este artigo apresenta um sistema autônomo de iluminação pública baseado em energia solar como fonte primária de energia, baterias como fonte secundária e diodos emissores de luz (LED) como fonte luminosa. Esse sistema é apresentado como uma alternativa de iluminação para locais remotos, tais como rodovias, trevos, localidades isoladas e pontos turísticos. O sistema apresenta alta eficiência porque todos os estágios de conversão de energia operam com corrente contínua, sem a necessidade de um inversor comumente utilizado em sistemas de iluminação pública convencionais, os quais utilizam lâmpadas de descarga. O projeto da luminária de LEDs é realizado com o objetivo de gerar níveis de iluminação equivalentes a uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão (HPS) de 70 W. Esse projeto leva em consideração a resposta do olho humano para uma condição escotópica. O circuito de acionamento dos LEDs utiliza uma malha de corrente e o carregador de baterias utiliza três malhas distintas: rastreamento da máxima potência do painel solar, controle de corrente e controle de tensão. O modo de controle depende do estado das baterias (carregadas/ descarregadas) e do nível da irradiação solar. Resultados experimentais em malha fechada do circuito de acionamento dos LEDs e do carregador de baterias são apresentados para comprovar o funcionamento do sistema proposto.

Palavras-Chave – Baterias, Iluminação Pública, LED, Visão Escotópica, Visão Fotópica, Energia Solar.

A HIGH EFFICIENCY AUTONOMOUS STREET LIGHTING SYSTEM BASED ON SOLAR ENERGY AND LEDS

Abstract – This paper presents an autonomous street lighting system based on solar energy as primary source, batteries as secondary source, and lighting emitting diodes (LEDs) as lighting source. This system is presented as an alternative for remote localities, like roads, crossroads, and touristic places. Besides, it presents high efficiency, because all power stages are implemented in DC

current, avoiding the use of an inverter power stage, which is employed in conventional street lighting systems based on discharge lamps. The design of LEDs fixture is performed to replace a 70 W high pressure sodium (HPS) lamp. This design takes into account the human eye response in scotopic conditions. The LEDs driver is current controlled and the battery charger presents three control modes: maximum power point tracker (MPPT) mode; constant current mode; and constant voltage mode. The control mode depends on the battery state (charged/discharged), and solar irradiance level. LEDs driver and battery charger experimental results are presented.

Keywords – Batteries, Street lighting, LED, Fotopic Vision, Scotopic Vision, Solar Energy.

I. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira está baseada predominantemente na energia hidráulica. Isso se deve ao grande potencial hidroelétrico do país. Entretanto, embora o Sistema Interligado Nacional cubra uma vasta área do território brasileiro, ainda existem localidades sem fornecimento de energia elétrica [1]-[3].

As soluções tradicionalmente adotadas nessas localidades são baseadas em pequenos geradores a óleo diesel. Contudo, essas soluções não são economicamente viáveis para aplicações de iluminação pública em locais remotos, tais como em pequenas fazendas, rodovias e pontos turísticos isolados. Nestes casos, uma solução viável é o uso de sistemas autônomos de iluminação pública, os quais devem apresentar elevado rendimento, longa vida útil, e devem utilizar uma fonte de energia disponível no local.

Dentre as formas atualmente disponíveis para geração de energia elétrica em locais remotos, as fontes eólica e solar são as maiores expoentes. A energia eólica tem recebido grande destaque, principalmente na Europa, com a implantação de grandes campos de aerogeradores. Contudo, essa fonte de energia não se encontra disponível em quantidade suficiente em todos os locais geográficos. Além disso, a geração eólica envolve sistemas mecânicos que exigem manutenção periódica além da instalação e comissionamento dos aerogeradores não serem simples. Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos não possuem partes móveis, o que lhes confere longa vida útil (garantia do fabricante de 20 anos

Artigo submetido em 27/09/2010. Aceito para publicação em 22/01/2011 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

[3]), fácil instalação e modularidade [4]-[5]. Por estes motivos, o uso de energia solar é o mais adequado para aplicações em sistemas isolados de iluminação.

Com relação às lâmpadas empregadas em sistemas de iluminação pública, o principal tipo utilizado é o de descarga de alta pressão [6], tais como as lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão, de vapor de sódio e de multivapor metálico. Para realizar a ignição dessas lâmpadas bem como para garantir a estabilidade da corrente em regime permanente, esses sistemas exigem a utilização de um reator, geralmente eletromagnético [7]. Porém, em aplicações que utilizam baterias ou painéis fotovoltaicos como fonte primária, esse tipo de lâmpada apresenta algumas desvantagens: i) a sua vida útil é da ordem de 28.000 horas, bem menor que a dos painéis fotovoltaicos; ii) requerem o uso de um reator eletrônico que faça a conversão CC-CA, visto que os reatores eletromagnéticos tradicionalmente utilizados não operam com correntes contínuas, geradas por baterias ou painéis fotovoltaicos.

Uma alternativa para superar as desvantagens das lâmpadas de descarga de alta pressão supracitadas é o uso de LEDs. Pesquisas recentes demonstram a evolução gradual da eficiência luminosa e a qualidade de cor dos LEDs, o que viabiliza sua utilização em sistemas de iluminação [8]-[10]. As principais vantagens em utilizar LEDs em sistemas de iluminação pública são: sua elevada vida útil (de 50.000 até 100.000 horas), compatível com a vida útil dos painéis solares (de 20 a 30 anos); e também o fato de sua alimentação ser realizada em CC, dispensando a utilização de um inversor no sistema, aumentando a eficiência e reduzindo o custo.

Então, neste trabalho é proposto um sistema autônomo de iluminação pública para localidades remotas com elevado desempenho e longa vida útil. A energia solar é utilizada como fonte primária, baterias de chumbo-ácido como fonte secundária e LEDs de potência são empregados na luminária, substituindo as tradicionais lâmpadas de vapor de sódio. O gerenciamento e o controle do sistema foram implementados em um microcontrolador de baixo custo.

II. SISTEMA PROPOSTO

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos do sistema proposto, composto por cinco componentes básicos. Um painel fotovoltaico (PV) é responsável por carregar as baterias durante o período diurno através de um conversor CC-CC. Esse conversor opera em malha fechada para garantir a carga das baterias e a busca do ponto de máxima potência. Durante a noite, as baterias fornecem energia para os LEDs através do circuito de acionamento, o qual impõe um nível de corrente adequado aos LEDs, variando sua intensidade luminosa quando necessário. Todo o sistema opera em CC, dispensando

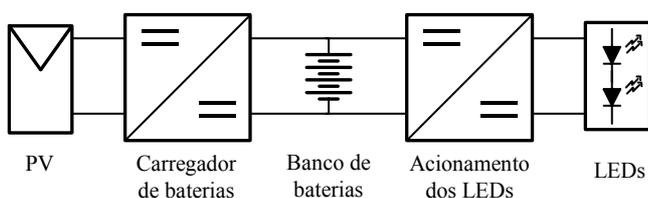


Fig. 1. Sistema proposto.

do um estágio inversor.

O projeto do sistema de iluminação com LEDs proposto visa substituir os sistemas de iluminação atualmente existentes, que geralmente utilizam lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão. Para tanto, na próxima seção é proposta uma metodologia que possibilita ao projetista equiparar a eficiência luminosa do sistema baseado em LEDs aos sistemas padrão, os quais seguem normas de projeto bem definidas. Através de uma avaliação da sensibilidade da visão humana sob condições fotópicas e escotópicas e do espectro de potência de cada fonte luminosa, busca-se equiparar a eficiência luminosa de um módulo com LEDs a uma lâmpada a vapor de sódio de alta pressão de 70 W, mais especificamente do modelo Vialox Nav-E Standard da OSRAM.

A determinação da quantidade de LEDs a ser empregada na luminária (módulo) é de grande importância no dimensionamento do sistema de iluminação proposto. O dimensionamento tanto dos painéis solares fotovoltaicos, quanto do banco de baterias, depende deste fator.

III. DIMENSIONAMENTO DA QUANTIDADE DE LEDS

A quantidade de LEDs necessária na luminária depende das características da lâmpada de vapor de sódio para a qual se deseja ter uma equivalência luminosa.

Uma aproximação da distribuição espectral de potência da lâmpada Vialox Nav-E Standard (70 W) da OSRAM pode ser vista na Figura 2. Outras características importantes deste modelo são:

- Fluxo luminoso = 5600 lm;
- Índice de Reprodução de Cores (CRI) ≤ 25 ;
- Vida útil média = 28000 horas;
- Eficiência da luminária = 80%.

O conhecimento da característica de visão escotópica do olho humano será empregado neste projeto para o correto dimensionamento da quantidade de LEDs na luminária.

A. Visão fotópica e escotópica

O olho humano possui dois tipos de receptores na retina, chamados cones e bastonetes, encarregados de transmitir os sinais visuais ao cérebro. Cada tipo de receptor responde de forma distinta a excitações com diferentes comprimentos de

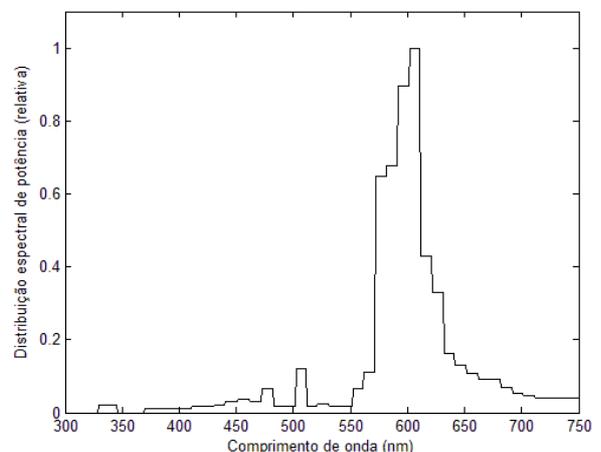


Fig. 2. Distribuição espectral de potência da lâmpada Vialox Nav-E Standard da OSRAM.

onda. Sendo assim, diferentes frequências serão mais (ou menos) percebidas pelo olho conforme os níveis médios de iluminação do ambiente. Em condições ambientes de alta luminosidade, os cones são os receptores majoritários, o que qualifica a visão fotópica. Em condições ambientes de baixa luminosidade, os bastonetes são os receptores majoritários, o que qualifica a visão escotópica. Em uma condição de luminosidade intermediária, tem-se a visão mesópica, na qual cones e bastonetes são responsáveis de forma mais equânime pela percepção da luz. A Figura 3 representa a sensibilidade do olho humano com relação ao comprimento de onda da luz, para as condições de visão fotópica e escotópica [11].

O sistema atual de fotometria, que determina o fluxo luminoso das fontes de luz, está baseado na visão fotópica. Ou seja, a lâmpada a ser substituída, descrita na seção anterior, possui 5600 lm em condições de visão fotópica. Mas, quando se trata de iluminação pública em locais isolados, como é o objetivo deste trabalho, a visão escotópica é a mais adequada a ser considerada. O percentual equivalente do fluxo luminoso nominal (fotópico) numa condição de visão específica é denominado fluxo efetivo ou lumens efetivos [12].

B. Características dos LEDs empregados

Existe uma grande variedade de LEDs de potência no mercado, exigindo um estudo prévio para determinar o modelo mais indicado a ser utilizado. O método mais comum para obtenção da luz branca é através de LEDs azuis recobertos com uma camada de fósforo, para que sejam emitidos outros comprimentos de onda. Desta forma, podem ser obtidos LEDs de cor branco frio (*cool white*), branco neutro (*neutral white*) e branco morno (*warm white*), sendo que a única diferença reside na camada de fósforo empregada. Os LEDs de cor branco frio são os mais eficientes, dada a aplicação em questão, por utilizarem menor quantidade de fósforo, e também por produzirem luz com comprimento de onda mais próximo ao pico de sensibilidade do olho humano, quando considerada a visão escotópica. Por este motivo, é proposta a utilização de LEDs de cor branco frio.

Atualmente, LEDs de 350, 700 e 1000 mA estão disponíveis comercialmente. Através de um estudo de mercado é facilmente constatável que os modelos de 700 mA apresentam melhor relação custo-benefício. Sendo assim, é proposto

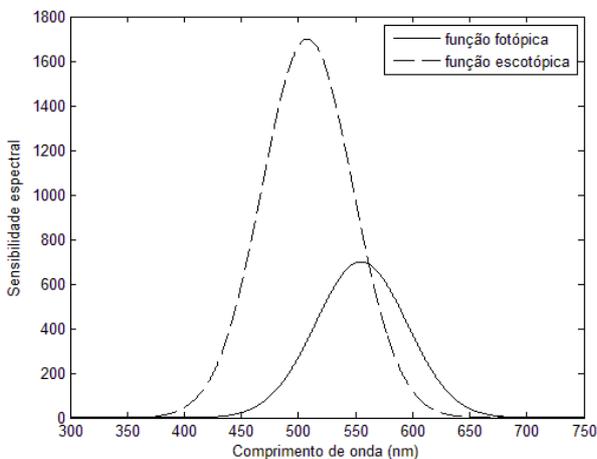


Fig. 3. Sensibilidade do olho humano em função do comprimento de onda da luz.

o uso de LEDs modelo Luxeon Rebel – Cool White Lambertian – 145 lm @ 700 mA. Na Figura 4 é apresentada uma aproximação da distribuição espectral de potência deste dispositivo. Outras importantes características desse modelo são:

- Fluxo luminoso = 145 lm;
- CRI ≥ 70 ;
- Vida útil média = 50000 horas;
- Eficiência da luminária = 90%.

C. Cálculo do número de LEDs

Como discutido na Seção III.A, o fluxo luminoso de uma fonte (característica nominal fornecida pelo fabricante) é determinado considerando-se a visão humana em condição fotópica. Entretanto, as características de iluminação do ambiente interferem na condição da visão (fotópica ou escotópica). De forma a relacionar a percepção humana com o fluxo luminoso da fonte, é definida uma grandeza chamada eficiência luminosa. A eficiência de uma fonte luminosa pode ser determinada pela ponderação entre a distribuição do espectro de potência dessa fonte (Figuras 2 e 4) e a sensibilidade espectral da visão humana (Figura 3). Logo, o número de LEDs a ser utilizado na luminária será calculado em função das eficiências da lâmpada a ser substituída e do modelo de LED escolhido, ambos numa condição escotópica.

Em outras palavras, a eficiência de uma fonte luminosa, em uma determinada condição de luz, pode ser determinada pela integração do espectro de potência ponderado pela sensibilidade espectral da visão humana [13]. Esta metodologia leva a uma figura de mérito chamada lumens efetivos, definida em (1):

$$lm_{ef}(cond, fonte) = \int P(fonte, \lambda) V(cond, \lambda) d\lambda \quad (1)$$

onde:

- cond* - Condição de iluminação (fotópica ou escotópica).
- fonte* - Identifica a fonte de luz.
- λ - Comprimento de onda.
- $P(fonte, \lambda)$ - Função da distribuição espectral de potência.
- $V(cond, \lambda)$ - Função da sensibilidade espectral do olho humano para uma condição específica de luz.

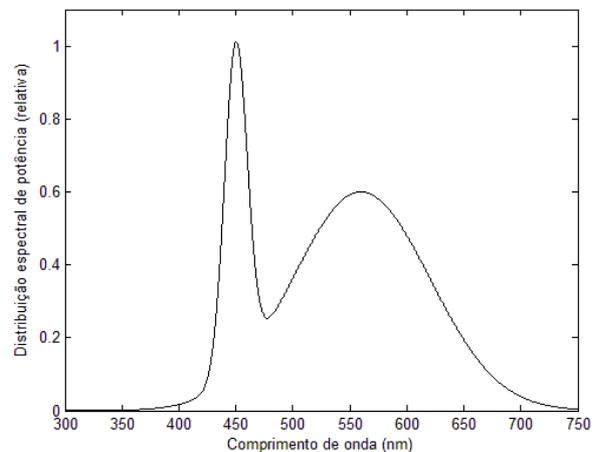


Fig. 4. Distribuição espectral de potência do LED Luxeon Rebel – Cool White Lambertian.

A distribuição espectral de potência característica, quando informada pelo fabricante, geralmente corresponde a uma família de fontes, as quais assumem diferentes potências nominais e fluxos luminosos. Devido a este fato, esta característica é geralmente avaliada de forma normalizada, como apresentado nas Figuras 2 e 4. Nestes casos, é necessário ponderar a distribuição espectral de potência por uma constante correspondente ao fluxo luminoso nominal (iluminação efetiva sobre condição fotópica).

Com relação à iluminação efetiva da lâmpada a ser substituída, entre as condições escotópica e fotópica, usando (1) chega-se ao valor aproximado de 0,73. Esse valor indica que a lâmpada Vialox Nav-E Standard apresenta apenas 73% da sua luminosidade nominal numa condição escotópica, a qual representa uma fonte de iluminação efetiva de aproximadamente 4088 lm. Usando a mesma metodologia para o modelo do LED definido na Seção III.B, chega-se ao valor aproximado de 2,23. Esse valor indica que o LED apresenta 223% do seu fluxo luminoso nominal, quando em condição escotópica, o qual representa uma fonte luminosa efetiva de aproximadamente 323 lm.

Para substituir a lâmpada Vialox, na condição específica deste trabalho, levando em consideração os 4088 lumens efetivos na condição escotópica, 13 LEDs do modelo proposto seriam suficientes para obter o mesmo fluxo luminoso. Considerando que os LEDs apresentam uma redução de 20% da sua capacidade luminosa ao longo de sua vida [14], que os valores nominais dos parâmetros dos LEDs são fornecidos para 25°C (em operação normal apresentam uma redução com a temperatura) e considerando um fator de segurança de aproximadamente 30%, chega-se à proposta de uma luminária contendo 20 LEDs.

IV. DIMENSIONAMENTO DO PAINEL FOTOVOLTAICO E DO BANCO DE BATERIAS

Os principais parâmetros utilizados no dimensionamento do painel e do banco de baterias são mostrados na Tabela I. Inicialmente, deve-se calcular o consumo diário. Para esta aplicação, foi considerado que durante a metade do tempo de funcionamento (6 horas) a luminária estará operando com uma variação da intensidade luminosa de 50%. Logo:

$$E = \frac{P \cdot t_{aut}}{2} + \frac{P \cdot t_{aut}}{2} = 567 \text{ Wh / dia} \quad (2)$$

$\eta_w \eta_{bat} \eta_D$

Para o correto dimensionamento de um sistema fotovoltaico é necessário obter a radiação solar na localidade onde será instalado o mesmo. Neste trabalho será considerada a radiação

TABELA I
Principais parâmetros de projeto

Autonomia	$t_{aut} = 12 \text{ h}$
Potência Máxima	$P = 50 \text{ W}$ (dimerização 50%)
Eficiência da fiação	$\eta_w = 98\%$
Eficiência do carregador de baterias	$\eta_{bat} = 90\%$
Eficiência do circuito de acionamento dos LEDs	$\eta_D = 90\%$
Fator de correção do painel fotovoltaico	$FC = 0,9$
Radiação solar	$R = 3,57 \text{ kWh/m}^2$
Tensão do banco de baterias	$V_{bat} = 24 \text{ V}$

solar da cidade de Caxias do Sul – RS, Brasil (29.168°S, 51.179°W) a qual apresenta um inverno rigoroso para o padrão brasileiro. Através do software SUNDATA [15] obteve-se o nível da radiação solar de 3,57 kWh/m² para o mês de junho, como verificado na Figura 5, sendo este o menor valor do ano e que foi considerado neste projeto.

O painel fotovoltaico empregado foi o KD205GX-LP da Kyocera, descrito na Tabela II. Esse tipo de painel, de silício monocristalino, apresenta uma eficiência superior às outras tecnologias, necessitando de menor área para produção da mesma quantidade de energia. Isso resulta em painéis menores, facilitando sua fixação aérea em postes e resultando em um menor impacto visual do sistema.

A partir das especificações mostradas na Tabela II, pode-se calcular a capacidade de geração do painel por:

$$P_{PV} = V_{mp} I_{mp} SP FC = 659 \text{ Wh / dia} \quad (3)$$

em que SP é definido como o sol pleno:

$$SP = \frac{R}{1 \text{ kWh/m}^2} = 3,57 \quad (4)$$

O número resultante de painéis é calculado por:

$$N = \frac{E}{P_{PV}} = \cong 0,86 \quad (5)$$

Sendo $N < 1$, é necessário o uso de apenas um painel fotovoltaico (consideradas as especificações mostradas na Tabela II).

Levando em consideração que o sistema proposto será instalado em locais isolados ou de difícil acesso, o sistema de armazenamento de energia elétrica (banco de baterias) deve apresentar uma alta eficiência energética, confiabilidade e a mínima necessidade de manutenção.

A capacidade e a vida útil da bateria dependem de diversos fatores, como regime de carga e descarga, manutenção, temperatura e idade [16]. Dentre esses fatores, o regime de carga e descarga apresenta a maior influência na vida útil e na capacidade da bateria [17]. A escolha do método de carga mais adequado depende principalmente do tipo de bateria e de sua aplicação. Para o caso de baterias VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*), um dos métodos mais adequados e de fácil implementação é o método IU (um nível de corrente e um nível de tensão) [17], [18].

As baterias utilizadas em sistemas fotovoltaicos, devido à produção não regular de energia elétrica, estão sujeitas às mais variadas condições de operação. Como exemplo, ciclos

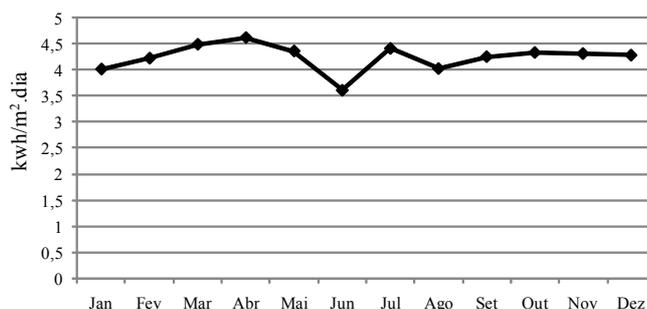


Fig. 5. Radiação média mensal em Caxias do Sul – RS para plano inclinado de 49°.

TABELA II

Especificações do painel fotovoltaico KD205GX-LP

Potência	205 Wp
Tensão na máxima potência (V_{mp})	26,6 V
Corrente na máxima potência (I_{mp})	7,71 A
Dimensões (mm)	1500 x 990 x 36
Peso	18,5 kg

de carga e descarga irregulares, sobrecarga em dias de alta insolação e descarga profunda em dias seguidos de baixa radiação solar, são fatores que penalizam consideravelmente a vida útil das baterias.

Levando em consideração estas premissas, a bateria pode ser classificada como o componente mais sensível de um sistema fotovoltaico autônomo, uma vez que se não for utilizada de forma correta, pode apresentar uma vida útil reduzida. Com isso, o aumento do índice de manutenção do sistema acaba gerando um custo adicional e também um impacto negativo no meio ambiente devido ao descarte desse elemento, que contém metais pesados.

Considerando os custos de cada componente, o banco de baterias acaba sendo um dos mais onerosos em um sistema fotovoltaico [19], podendo representar até 15% dos custos iniciais para a instalação do sistema fotovoltaico, ou até mesmo 46% se forem considerados os custos de manutenção [20]. Este aumento nos custos se dá principalmente pelo fato das baterias possuírem vida útil inferior aos demais componentes do sistema. Em aplicações cíclicas, onde diariamente a bateria se carrega e descarrega, o custo das baterias é o de maior impacto ao longo da vida útil do sistema.

As baterias de chumbo-ácido seladas são as recomendadas para este projeto por serem de fácil aquisição no mercado nacional, apresentarem custo reduzido e grande densidade de energia. Contudo, a vida útil, ou seja, o número de ciclos, é severamente influenciado pela profundidade da descarga. Como exemplo pode-se citar as baterias Freedom [21], que podem suportar mais de 950 ciclos se a profundidade da descarga não ultrapassar 30%, podendo este número ser reduzido a menos de 200 ciclos se for descarregada em 80% da sua capacidade.

A Figura 6 mostra a relação entre o custo, vida útil e profundidade de descarga, onde se verifica que o custo reduz com a diminuição da profundidade da descarga. Nesta análise foi considerado o custo durante 20 anos de um banco de baterias para suprir uma potência de 50 W, autonomia de 12 h e tensão de 12 V. Foram utilizadas baterias Moura Clean, cuja vida útil sofre pouca influência da temperatura ($< 50^{\circ}\text{C}$) [18]. Outra vantagem desse modelo é que o processo de

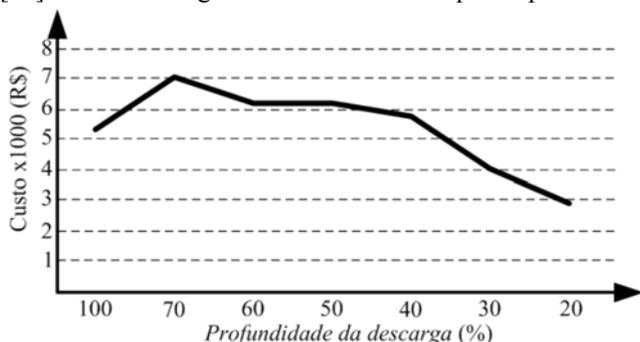


Fig. 6. Custo de um banco de baterias em função da profundidade da descarga diária, ao longo de 20 anos.

carga é mais rápido e existirá uma reserva de energia nas baterias para períodos longos de baixa insolação quando a profundidade de descarga é baixa. Desta forma, a norma NBR14298:1999 é atendida, uma vez que o sistema proposto possui autonomia superior a 36 horas, sendo maior que a autonomia de 24 horas estabelecida pela norma [22]. O custo avaliado nesta análise foi consultado em [23].

A capacidade em Ah do banco de baterias é definida por:

$$C_{Ah} = \frac{E}{V_{bat}} = 23,62 \text{ Ah} \quad (6)$$

Contudo, a capacidade de descarga deve ser de aproximadamente 30% da capacidade mínima, o que resulta em $C_{Ah} = 7,08 \text{ Ah}$. Em virtude dos modelos comerciais e da disponibilidade para ensaios, optou-se por utilizar duas baterias Moura Clean de 63 Ah (12MC63) ligadas em série. Outros modelos podem ser empregados sem alteração na metodologia utilizada.

V. PROJETO DOS CONVERSORES ESTÁTICOS

O sistema proposto é composto pelo carregador de baterias/MPPT e pelo circuito de acionamento dos LEDs, que operam em momentos distintos: (i) durante a noite o conversor para acionamento dos LEDs opera para garantir a iluminação e (ii) durante o dia o carregador recarrega as baterias.

Deve-se destacar que a luminária proposta apresenta duas formas de dimerização: uma de 50% da potência (madrugada) e outra de acordo com a luminosidade local (adquirida por um LDR). Nesta última forma de dimerização, altera-se a referência da corrente dos LEDs para manter a mesma sensação visual no local com reduzido consumo de energia. Os sistemas de ajuste e interface dos horários de dimerização estão em fase de estudos e especificações, não sendo o foco deste trabalho.

A. Acionamento dos LEDs

O projeto do conversor para alimentação da luminária de LEDs depende basicamente da tensão de entrada, fornecida pelo banco de baterias, que é de 24 V. Outros fatores que influenciam o projeto do conversor são a quantidade de LEDs na luminária e a configuração dos mesmos. Na Seção III foi definido que 20 LEDs são suficientes para a aplicação proposta. A ligação destes LEDs pode ser em série, paralela ou mista. Para a configuração paralela ou mista, é obrigatória a utilização de um circuito de controle de corrente nos distintos ramos de LEDs, de modo a manter o nível de corrente constante em todos os LEDs do circuito. Portanto, a configuração série foi selecionada devido a sua simplicidade e baixo custo. Logo, os parâmetros de projeto são:

- Entrada: 24 V.
- Saída: 68 V, 700 mA, 47,6 W.
- Frequência do conversor: 50 kHz.

A escolha do conversor que alimentará os LEDs baseia-se nos parâmetros de projeto mostrados acima, ou seja, é necessário um conversor elevador de tensão. Dentre os possíveis conversores para esta aplicação, o mais indicado é o conversor *Boost*, devido a sua simplicidade, baixo custo e elevado rendimento. Este conversor pode ser visto na Figura 7, e os

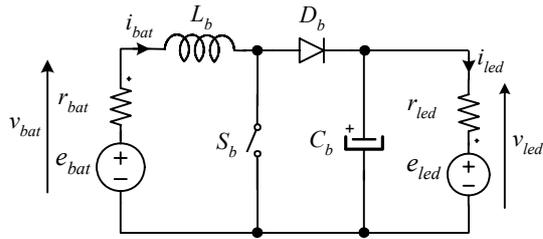


Fig. 7. Circuito equivalente do conversor Boost empregado para o acionamento dos LEDs.

Tabela III
Principais parâmetros do circuito de acionamento LEDs implementado.

Parâmetro	Descrição
e_{bat}	24V - 2 x 12MC63
L_b	640 μ H, 80 volts em núcleo EE30/14
C_b	1 μ F / 100V polipropileno
M_b	IRF530 - $V_{DS} = 100V$, $I_D = 14A$
D_b	MUR860
LEDs	20 x Luxeon Rebel - Cool White Lambertian - 145 lm @ 700 mA

principais componentes utilizados na implementação são apresentados na Tabela III.

B. Carregador de baterias

O projeto do conversor para carga do banco de baterias e busca do ponto de máxima potência depende basicamente da tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos, que é de 26,6 V para o ponto de máxima potência (V_{mp}), bem como da corrente e da tensão de carga do banco de baterias. Nesta aplicação, a corrente de carga máxima será de 8 A e a tensão nominal do banco é 24 V. Assim, os parâmetros de projeto são:

- Entrada: 26,6 V.
- Saída: 24 V, 8 A, 192 W.
- Frequência do conversor: 20 kHz.

Como a tensão de saída é inferior à tensão de entrada, a topologia do carregador de baterias deve ser abaixadora de tensão. Entretanto, com o aumento da temperatura do painel, a tensão de saída se reduz. Ainda, para obter maior flexibilidade na troca do modelo do painel (12 V, 24 V ou 36 V), sem afetar a escolha da topologia, a mesma foi definida como sendo o conversor Cúk, mostrado na Figura 8, pelas seguintes características:

- Tensão de saída pode ser inferior ou superior à de entrada;
- Correntes de entrada e de saída são contínuas (a estrutura do conversor utilizado apresenta naturalmente um indutor em série com a entrada e outro com a saída).

Esse conversor tem o propósito de garantir a operação do painel no ponto de máxima potência. Esta condição é satisfeita quando se garante o casamento de impedâncias entre o painel fotovoltaico e a impedância de entrada do conversor Cúk. Como a impedância de saída do módulo fotovoltaico tem variações provocadas pela mudança da irradiação solar e temperatura interna do painel, a impedância de entrada do conversor deve ser ajustável.

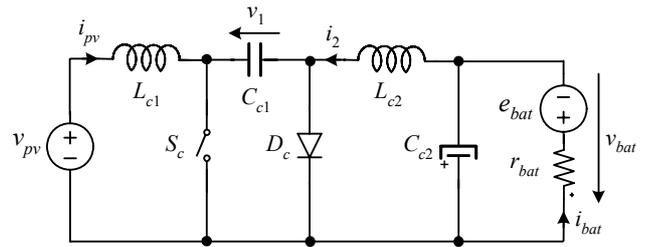


Fig. 8. Circuito equivalente do conversor Cúk empregado no carregador de baterias.

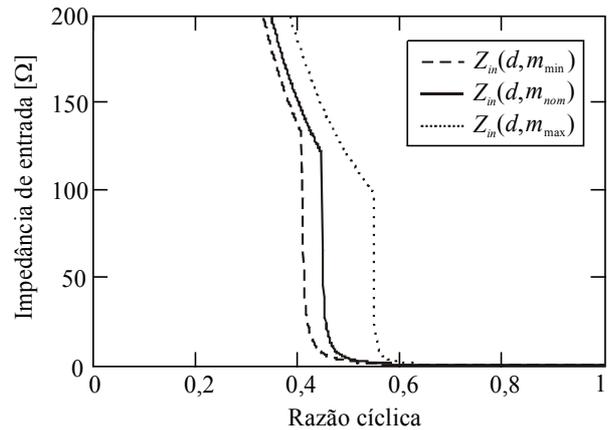


Fig. 9. Impedância de entrada do conversor Cúk empregado no carregador de baterias.

Tabela IV
Principais parâmetros do carregador de baterias implementado.

V_{pv}	26,6V Painel fotovoltaico (KD205GX-LP)
L_{C1}	1,4mH - Núcleo EE55/21 75 Voltas
L_{C2}	1,4mH - Núcleo EE55/21 75 Voltas
C_{C1}	150 μ F - Capacitor eletrolítico 250V
C_{C2}	33 μ F - Capacitor eletrolítico 250V
S_c	SPW47N60C3 - Cool MOS Power Transistor
D_c	MUR830 - Diodo rápido
V_{bat}	24V - 2 x 12MF63

Por este motivo, analisou-se a impedância de entrada do conversor Cúk em função da razão cíclica (d), conforme (7):

$$Z_{in}(d, m) = \begin{cases} \frac{2L_{C1}f_{sw}}{d^2 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}, & d < \frac{1}{1 + \frac{1}{m}} \\ \frac{r_{bat}(1-d)^2}{d^2} \frac{1}{1 - \frac{1-d}{d} \frac{1}{m}}, & d \geq \frac{1}{1 + \frac{1}{m}} \end{cases} \quad (7)$$

onde f_{sw} é a frequência de comutação, r_{bat} é a resistência interna da bateria e $m = V_{bat}/V_{pv}$ (tensão da bateria / tensão do PV). A Figura 9 mostra a impedância de entrada do conversor Cúk para condições extremas de operação do painel e do banco de baterias (vide Tabelas II e III). Essa figura foi obtida considerando-se: (i) tensões nominais do banco de baterias e do PV ($m = 0,902$); (ii) mínima tensão das baterias e máxima tensão dos painéis ($m_{min} = 0,767$), e (iii) máxima tensão das baterias e mínima tensão dos painéis ($m_{max} = 1,2$). Como se pode observar, a impedância de entrada pode ser ajustada de 0 a ∞ ohms em todos os pontos de operação. Logo, este conversor é adequado para rastrear o ponto de

máxima potência dos painéis para qualquer condição de irradiação solar e carga do banco de baterias.

Um problema enfrentado em alguns sistemas carregadores de bateria empregando painéis fotovoltaicos é a descarga das baterias através de um caminho de condução reversa. Em muitos conversores este caminho de condução é evitado pela utilização de um diodo de bloqueio em série com o painel [24]. No conversor Cúk o uso de um diodo de bloqueio não é necessário uma vez que o capacitor C_{c1} impede a circulação de corrente contínua pelo painel em ambos os sentidos quando o conversor não estiver operando.

Com base nestas considerações foi realizado o projeto do conversor Cúk. Os valores dos componentes utilizados na implementação são mostrados na Tabela IV.

VI. ESTRUTURA DE CONTROLE

Nesta seção será apresentada a estrutura de controle e gerenciamento do sistema autônomo de iluminação proposto. A estrutura completa de controle, que foi implementada digitalmente, é mostrada na Figura 10. O esquema de controle emprega duas malhas independentes entre si, sendo uma para o controle da carga do banco de baterias e busca do ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos, e outra para o controle da corrente dos LEDs. Esta última estrutura é empregada para se efetuar o controle, de forma indireta, da intensidade luminosa dos LEDs. É importante destacar que não há interação entre as malhas de controle, tendo em vista que os dois sistemas operam em momentos distintos. Quando a irradiação solar é significativa, o banco de baterias é carregado pelo conversor Cúk e os LEDs permanecem desligados. Por outro lado, quando há pouca ou nenhuma irradiação solar, o conversor *Boost* que alimenta LEDs entra em operação, enquanto que o carregador de baterias permanece desli-

gado.

A. Controle do circuito de acionamento dos LEDs

A estrutura de controle da intensidade luminosa da luminária é mostrada na parte superior do bloco de controle da Figura 10. Como se pode observar na figura, o controle da intensidade luminosa dos LEDs é feito através de uma malha de corrente, sendo a corrente de referência (i_{led}^*) gerada por um resistor dependente de luz (LDR) que monitora a intensidade luminosa local e determina a corrente a ser imposta ao conjunto de LEDs (dimerização). Através da dimerização, a corrente dos LEDs pode variar de zero até a corrente nominal. Conseqüentemente, reduz-se a potência consumida e aumenta-se o desempenho do sistema como um todo.

O compensador C_b , empregado para a regulação da corrente dos LEDs, é do tipo proporcional-integral (PI), tendo como base a medida da corrente dos LEDs (i_{led}). Neste sistema, esta medida é obtida através de um resistor *shunt* em série com os LEDs. A referência de corrente i_{led}^* é calculada com base na intensidade luminosa medida através de um LDR. A referência de corrente é inversamente proporcional à tensão medida pelo LDR (v_{luz}), resultando na dimerização da luminária.

Além da dimerização através do LDR é realizada outra dimerização em função do horário, ou seja, durante a madrugada a corrente máxima é limitada em 50%. Isso se deve à redução de circulação de pessoas neste horário e em virtude da aplicação do sistema proposto (iluminação pública). Deve-se destacar que para cada aplicação específica (características locais) um ajuste da faixa de do horário da dimerização deve ser realizada. Como o sistema que gera a referência para os LEDs é implementado em um microcontrolador, existe uma grande flexibilidade para modificações na estratégia de iluminação sem alterações no hardware.

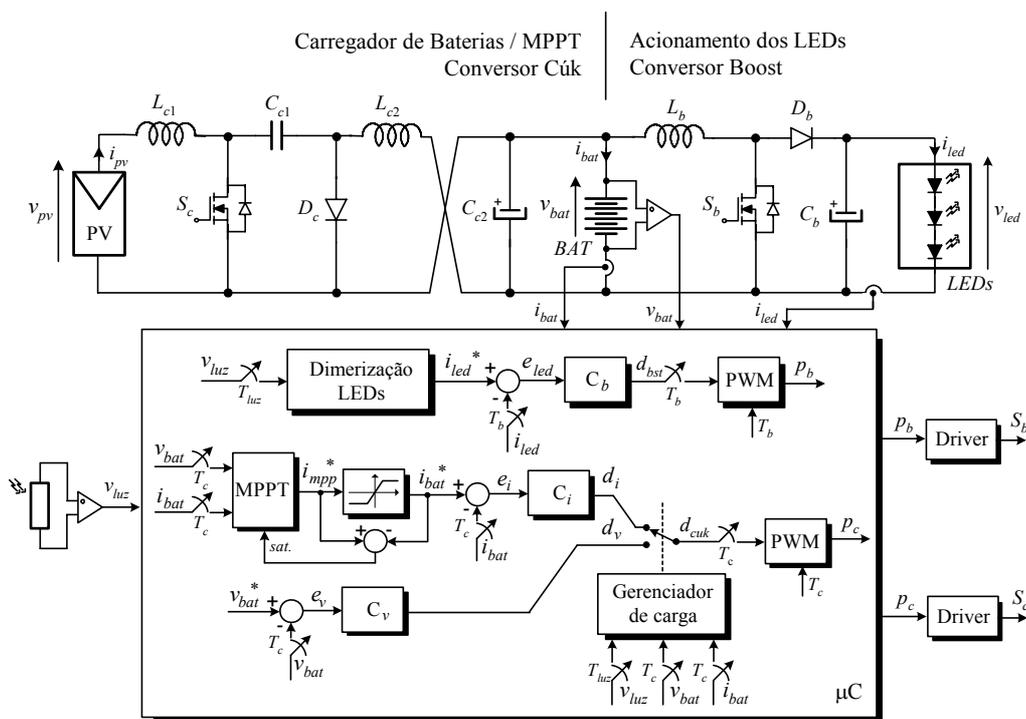


Fig. 10. Sistema de controle digital do carregador de baterias e do conversor de acionamento dos LEDs.

B. Controle da carga do banco de baterias e rastreamento do ponto de máxima potência dos painéis fotovoltaicos

A estrutura de controle da carga do banco de baterias e do rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico é mostrada na parte inferior da Figura 10. O controle da carga do banco de baterias utiliza duas malhas de controle, uma de corrente e outra de tensão, que operam independentemente entre si. Esta estrutura é necessária para a implementação do método de carga recomendando pelo fabricante de baterias, denominado de método um nível de corrente e um nível de tensão (método I-U).

A Figura 11 ilustra como a carga é realizada. As duas malhas operam de forma alternada, de acordo com o estado de carga das baterias e da energia disponível no painel fotovoltaico:

- Modo Corrente: quando a tensão das baterias for inferior a um valor máximo definido, assume-se que as baterias estão descarregadas. Neste caso, regula-se a corrente de carga das baterias através do conversor Cúk em um valor igual ou inferior a $0,1C_{Ah}$.
- Modo Tensão: quando a tensão das baterias for superior a um valor máximo definido, assume-se que as baterias estão plenamente carregadas. Nesta situação, o controlador regula a tensão no banco de baterias (denominada de tensão de flutuação) para manter o estado de carga completo.

No sistema proposto, as malhas de controle da carga das baterias foram implementadas da seguinte forma:

- Malha de corrente: controlador PI (representado por C_i na Figura 10), com referência gerada (i_{bat}^*) pelo algoritmo de rastreamento da máxima potência, sendo esta corrente máxima limitada em 5 A.
- Malha de tensão: controlador PI (representado por C_v na Figura 10), com referência de tensão constante de 2,2 V por célula (13,4 V por bateria).

A comutação entre estas duas malhas é efetuada pelo gerenciador de carga das baterias, cuja decisão relativa ao modo de operação é tomada a partir das medidas da corrente de carga (i_{bat}) e da tensão das baterias (v_{bat}).

Contudo, diferentemente do método I-U convencional, a corrente de carga das baterias (i_{bat}^*) não é constante. Neste sistema, as baterias são carregadas com a máxima corrente disponível pelo sistema de conversão solar. Para garantir a máxima conversão de energia dos painéis e, conseqüentemente, a máxima corrente de carga das baterias, é empregado um algoritmo para busca do ponto de máxima potência (MPPT). O método de busca do ponto de máxima potência utilizado foi Perturbação e Observação (P&O) [25]-[26], que

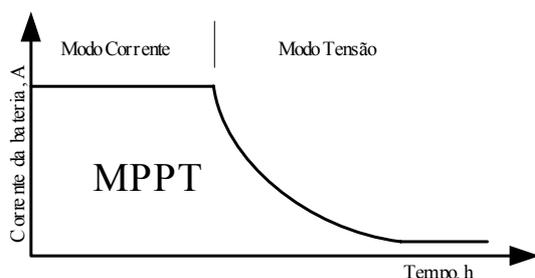


Fig. 11. Representação do método de carga I-U.

é baseado na alteração da referência de corrente (i_{mpp}^*) e na comparação da potência disponibilizada pelo arranjo de painéis fotovoltaicos antes e depois desta alteração, definindo o sentido da próxima perturbação. Em sua forma convencional, o algoritmo de MPPT emprega as medidas da tensão (v_{pv}) e da corrente (i_{pv}) na entrada do conversor para calcular a potência de entrada. Neste sistema, diferentemente dos algoritmos MPPT convencionais, se utiliza a corrente da bateria (i_{bat}) e a tensão da bateria (v_{bat}) para este cálculo. Esta modificação não resulta em impacto negativo no rastreamento da máxima potência porque os conversores Boost e Cúk nunca operam simultaneamente. Desta forma, garante-se o rastreamento do ponto de máxima potência de todo o sistema de conversão de energia, incluindo os painéis e o conversor de entrada. E, adicionalmente, suprime-se um sensor de corrente e um sensor de tensão no sistema.

Uma limitação na referência de corrente de carga das baterias foi inserida para evitar que a corrente máxima de carga seja ultrapassada. Esta é uma situação pouco freqüente, uma vez que a insolação raramente atinge os níveis máximos. Nestes casos, o algoritmo de MPPT é desabilitado, e o conversor opera fora do ponto de máxima potência. Para limitar a corrente de carga máxima das baterias, o que as protege de danificação por sobreaquecimento, foi adicionado um saturador entre i_{mpp}^* e i_{bat}^* de $0,1C_{Ah}$, como mostra a Figura 10. Assim, o algoritmo de MPPT somente é habilitado quando a corrente de carga se encontra na área sob a curva da Figura 11.

Além das malhas de controle já mencionadas, foi adicionada uma proteção que monitora a corrente das baterias enquanto a malha de tensão atua. Caso a corrente ultrapasse o limite de 5 A, o que pode ocorrer devido a algum defeito nas baterias, o algoritmo retorna para malha de corrente, mantendo esta corrente de limitação.

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um protótipo foi implementado em laboratório e diversos resultados experimentais foram obtidos para validar o projeto e o desempenho de todo sistema. Inicialmente serão mostrados alguns resultados do circuito de acionamento dos LEDs e na seqüência do carregador de baterias.

A Figura 12 mostra as formas de onda de tensão e corrente de entrada no conversor *Boost*, onde se observa a tensão do banco de baterias e a corrente exigida do mesmo. A Figura 13 apresenta a tensão e corrente no arranjo de LEDs para três condições de dimerização. Na Figura 13(a) observa-se que a corrente máxima nos LEDs não ultrapassa o valor de 1 A, ficando abaixo do recomendado pelo fabricante. O rendimento do conversor *Boost* foi de 94% na potência nominal.

Os resultados relativos ao carregador de baterias são mostrados nas Figuras 14 e 15. Na Figura 14 é apresentada a tensão e a corrente fornecida pelo painel fotovoltaico durante a carga das baterias. A Figura 15 mostra a corrente e tensão impostas às baterias durante o modo corrente. Como pode ser verificado nestas formas de onda, o princípio de funcionamento do conversor Cúk, com um indutor em série na entrada e outro na saída, permite que a corrente drenada do painel e também a corrente de carga das baterias apresentem baixos valores de ondulação. Isto resulta em um melhor aproveitamento do painel solar e também na conservação da vida útil

das baterias. O rendimento do conversor Cúk durante o modo corrente, foi de 86%.

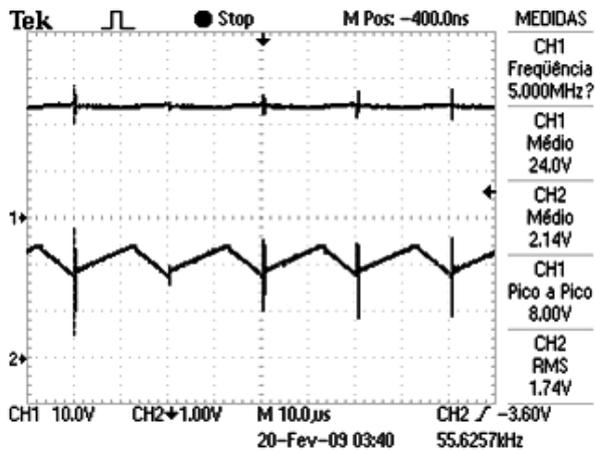
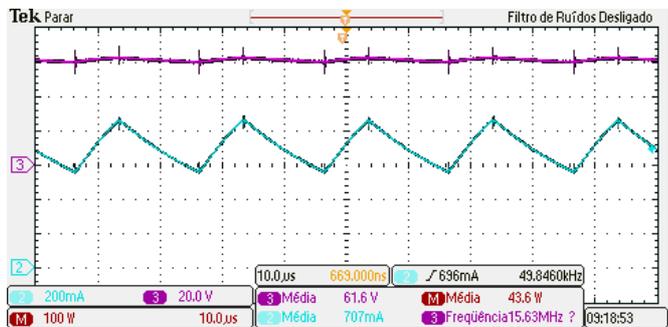
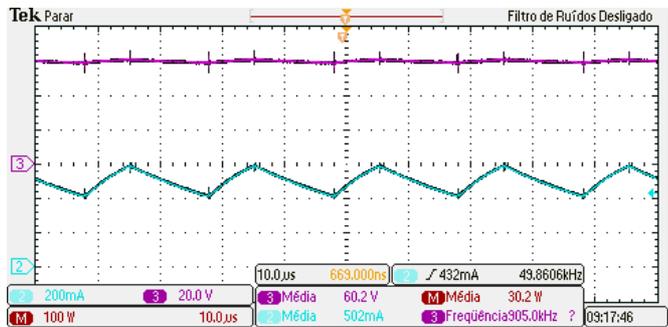


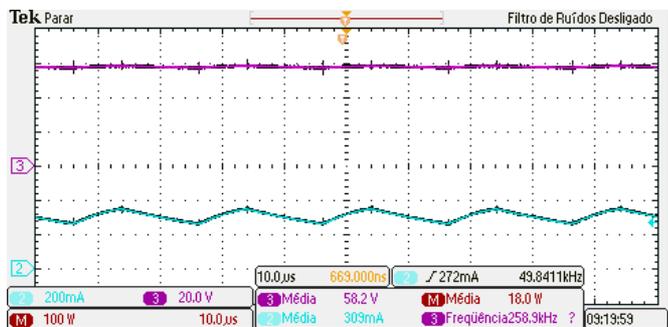
Fig. 12. Tensão (acima) e corrente (abaixo) do banco de baterias (10V/div; 1A/div; 10µs/div).



(a) $I_{LED} = 700 \text{ mA}$, $\eta = 94\%$.



(b) $I_{LED} = 500 \text{ mA}$, $\eta = 95,4\%$.



(c) $I_{LED} = 300 \text{ mA}$, $\eta = 96\%$.

Fig. 13. Tensão (acima) e corrente (abaixo) no arranjo de LEDs (20V/div; 0,2A/div; 10µs/div).

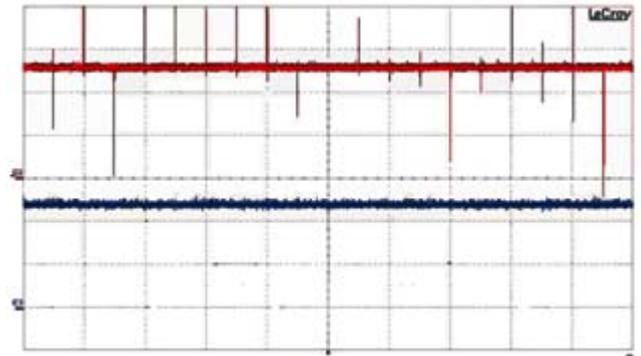


Fig. 14. Tensão (acima) e corrente (abaixo) do painel fotovoltaico (10V/div; 2A/div; 100µs/div).

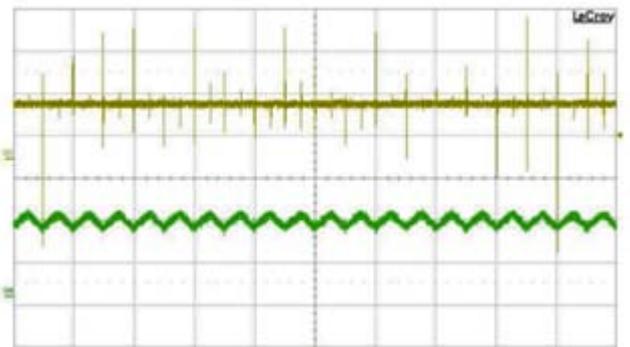


Fig. 15. Tensão (acima) e corrente (abaixo) das baterias (20V/div; 2A/div; 100µs/div).

VIII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um sistema autônomo de iluminação pública, que utiliza a energia solar como fonte primária, baterias como fonte secundária e a fonte luminosa é à base de LEDs. Esse sistema apresenta-se como uma alternativa para localidades isoladas e de difícil acesso, bem como para estradas e trevos. Essa solução também pode ser adotada como uma alternativa para iluminação pública em centros urbanos podendo atuar como iluminação de emergência. O sistema proposto apresenta alto rendimento, pois todas as etapas de conversão de energia são CC, o que facilita a implementação e o controle.

Foi apresentado um estudo sobre a visão fotópica e escotópica para o correto dimensionamento da quantidade de LEDs da luminária proposta. Para a substituição de uma lâmpada a vapor de sódio de alta pressão de 70W são necessários 20 LEDs (Luxeon Rebel – Cool White Lambertian – 145 lm @ 700 mA), os quais apresentam o mesmo efeito luminoso em condições escotópicas.

Dentre os principais elementos do sistema proposto, a saber: conversores estáticos, painel fotovoltaico, baterias e LEDs. As baterias são os elementos mais sensíveis e acarretam no maior custo ao longo da vida útil do sistema. Pois, sua vida útil é pequena (inferior a 4 anos) e quando não forem corretamente utilizadas, podem ter sua vida drasticamente reduzida. Deste modo, optou-se por utilizar duas baterias ligadas em série e uma profundidade de descarga de 30%, maximizando sua vida útil e reduzindo custo com manutenção e substituição das mesmas.

O método de carga do banco de baterias implementado visou a maximização da vida útil das mesmas, limitando a corrente de carga quando esta atinge $0,1C_{Ah}$. Nas demais condições, buscou-se extrair a máxima potência do painel solar fotovoltaico através do método P&O. Deste modo, garante-se o estado de carga das baterias, extraindo a máxima potência do painel quando possível e, ao mesmo tempo, preservando a vida útil das baterias através dos níveis de corrente impostos às mesmas.

Comprovou-se a obtenção do MPPT através do conversor Cúk por meio da análise da variação da impedância de entrada do mesmo, em função da variação da razão cíclica. Deste modo, comprovou-se que é possível realizar o casamento de impedância entre o painel solar fotovoltaico e o carregador de baterias, em qualquer condição de operação.

As metodologias de projeto dos conversores Cúk (carregador de baterias/MPPT) e do conversor Boost (acionamento dos LEDs) foram apresentadas e comprovadas experimentalmente. Sendo o rendimento do conversor Boost de 94% e do conversor Cúk de 86% ambos para carga nominal.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Universidade de Caxias do Sul e à Intral S/A Indústria de Materiais Elétricos pelo apoio técnico e financeiro para realização deste projeto. Em especial ao engenheiro Marcelo Toss, que atua junto à Intral S/A.

REFERÊNCIAS

- [1] Inserção das Energias Alternativas Renováveis no Setor Elétrico Brasileiro?, 3º Fórum Brasileiro de Energia Elétrica, 2003.
- [2] Ministério de Minas e Energia, *Programa Luz para Todos*, (www.mme.gov.br), 2005.
- [3] Disponível em: <http://www.kyocerasolar.com>
- [4] J. M Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. P. Guisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, N. Moreno-Alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no 4, pp. 1002-1016, June 2006.
- [5] C. H. G. Treviso, A. E. Demian Jr., A. L. B. Ferreira, "No-break Para Aplicações Residenciais, Comerciais e Industriais de 5kW com Interface para Painel Solar", *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, Vol. 14-No.3, pp. 173-180, 2009.
- [6] M. A. D. Costa, T. B. Marchesan, J. S. 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)*, vol. 15, no.2, pp. 115-124, 2010.
- [7] R. E. da Costa, J. S. da Silveira, F. L. Tomm, T. B. Marchesan, A. Campos, R. N do Prado, "Warm-Up and Steady-State Control of High-Pressure Sodium Lamps Applied to Public Lighting Systems", *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 2008.
- [8] A. Zukauskas, M. S. Shur, R. Coaska. *Introduction to Solid-State Lighting*, Ed. Wiley Inter-Science, 2002.
- [9] A. Consoli, M. Cacciato, V. Crisafulli, "Power Converters For Photovoltaic Generation Systems in Smart Grid Applications", *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, Vol. 14-No.4, pp. 251-257, 2009.
- [10] Disponível em: www.philipsumileads.com/uploads/166/WP14-pdf
- [11] Y. He, M. Rea, A. Bierman, J. Bullough, "Evaluating Light Source Efficacy Under Mesopic Conditions Using Reaction Times", *Proc of Illuminating Eng. Soc. of North America Annual Conf.*, pp.236-257, 1996.
- [12] I. Lewin, "Lumen Effectiveness Multipliers for Outdoor Lighting Design", *Journal of the Illuminating Engineering Society*, pp. 40-52, 2001.
- [13] T. Goodman, A. Forbes, H. Walkey, "A Practical Model for Mesopic Photometry", in *Proc of XVIII IMECO*, pp.1-6, 2006.
- [14] Disponível em: www.philipsumileads.com/uploads/28/DS64-pdf
- [15] Disponível: HTT.cresesb.cepel.br/potencial_solar.htm
- [16] H. Akagi, L. Maharjan, "A Battery Energy Storage System Based on a Multilevel Cascade PWM Converter", *Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, vol. 14-no.4, pp. 221-231, 2009.
- [17] IEEE, *Recommended practice for sizing lead-acid batteries for photovoltaic (PV) systems*, 16 March 2001.
- [18] Disponível: [HTTP://www.moura.com.br](http://www.moura.com.br)
- [19] S. Duryea, S. Islam, W. Lawrance, "A Battery Management System For Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems", *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 7, Issue: 3, pp. 67-72, 1999
- [20] IEA, *Management of Storage Batteries Used in Stand-Alone Photovoltaic Power Systems – Report IEA PVPS T3-10:2002*, International Energy Agency (IEA) 2002
- [21] Disponível: http://www.sistab.com.br/produtos/baterias/selada_livre/selada_delphi.pdf
- [22] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, *NBR14298:1999. Sistemas fotovoltaicos - Banco de baterias - Dimensionamento*. RC: S.d.], 10p
- [23] Disponível: <http://www.dbsbaterias.com.br>
- [24] J. C. Wiles, D.L.King, "Blocking Diodes and Fuses in Low-Voltage PV Systems", *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp.1105-1108, 1997.
- [25] K. C. Oliveira, M. C. Cavalcanti, G. M. S. Azevedo, and F. A. S. Neves, "Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems", *VII INDUSCON*, 2006.
- [26] V. Salas, M. J. Manzanar, A. Lazaro, A. Barrado, E. Olias, "The Control Strategies for Photovoltaic Regulators Applied to Stand-Alone Systems", *IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, Vol. 4, pp. 3274-3279, 2002.

DADOS BIOGRÁFICOS

Luciano Schuch, nascido em de 1974 em Santa Maria, é engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Santa Maria (1999); mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (respectivamente

em 2001 e 2007). Atualmente é Professor Adjunto e chefe do Departamento de Processamento de Energia Elétrica (DPEE) da UFSM. Suas áreas de interesse incluem Circuitos Eletrônicos, atuando principalmente no desenvolvimento de conversores de alto desempenho, integração de sistemas, técnicas de comutação suave e fontes alternativas de energia.

Marco Antonio Dalla Costa, nascido em 03/10/1978 em Santa Maria – RS, possui graduação em Engenharia Elétrica e Mestrado em Eletrônica de Potência pela Universidade Federal de Santa Maria (2002 e 2004, respectivamente). Finalizou o curso de doutorado na Universidad de Oviedo - Espanha em fevereiro de 2008, obtendo as qualificações de "Sobresaliente Cum Laude", "Doctorado Europeo" e também recebendo o título de "Premio Extraordinario de Doctorado". Atualmente, é Professor Adjunto na Universidade Federal de Santa Maria. É autor de mais de 20 artigos completos publicados em periódicos internacionais Qualis A1, e mais de 60 artigos científicos publicados em congressos internacionais e nacionais. É revisor dos seguintes periódicos: Electronics Letters, IEEE Transactions on Plasma Science, IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Transactions on Power Electronics e Revista Eletrônica de Potência (SOBRAEP). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: LED drivers, electronic ballasts (reatores eletrônicos), self-oscillating drivers, dimming de lâmpadas de descarga de alta e baixa pressão, ressonâncias acústicas e eficiência de circuitos eletrônicos.

Cassiano Rech nasceu em Carazinho, RS, Brasil, em 1977. Formou-se em Engenharia Elétrica e obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), em 1999, 2001 e 2005, respectivamente. De 2005 a 2007, atuou como professor da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI). De 2008 a 2009, atuou como professor da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Desde 2009 é professor da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde atua junto ao Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC). Suas áreas de interesse inclu-

em modelagem e controle de conversores estáticos de potência, fontes ininterruptas de energia e conversores multiníveis. Atualmente, é membro da SOBRAEP e IEEE-PELS.

Leandro Michels nasceu em Não-Me-Toque, RS, Brasil, em 1979. Formou-se em Engenharia Elétrica e obteve o título Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, em 2002 e 2006, respectivamente. Realizou estágio de Pós-Doutorado na mesma instituição em 2007. Entre 2008 e 2009 atuou como professor da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Desde 2009 é professor adjunto do Departamento de Processamento de Energia Elétrica da UFSM. Suas áreas de interesse são: modelagem e controle de conversores estáticos, fontes ininterruptas de energia, controle digital aplicado, e fontes renováveis de energia.

Guilherme Holsbach Costa é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2000), e possui mestrado e doutorado também em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003 e 2007, respectivamente). Atualmente, é professor Adjunto do curso de Engenharia de Controle e Automação, na Universidade de Caxias do Sul (RS), e coordenador do curso de Automação Industrial. Atua na área de processamento de sinais, com ênfase em processamento de imagens digitais. Tem experiência nessa área, atuando principalmente nos seguintes temas: super-resolução, registro, filtragem adaptativa e visão computacional.

Anderson Soares dos Santos é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Passo Fundo (1999), mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2004). Atualmente é Supervisor da área de novos desenvolvimentos da Engenharia do Produto da empresa Intral S.A e Professor da Universidade de Caxias do Sul. Suas principais áreas de interesse incluem reatores eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga de alta pressão e LEDs.