

# SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE ALTA FREQUENCIA PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS

João Victor Mapurunga Caracas – j\_caracas@hotmail.com

Shigeaki L. Lima – shigeaki@dee.ufma.br

Nelson José Camelo – ncamelo@dee.ufma.br

Oswaldo Ronald Saavedra – o.saavedra@ieee.org

Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Engenharia Elétrica, Núcleo de Energias Alternativas

**Resumo.** Neste trabalho apresenta-se um sistema microcontrolado para iluminação pública com energia solar fotovoltaica composto de: controlador de carga e descarga da bateria, fotocélula e um conversor CC/CC em alta frequência, para alimentar lâmpadas fluorescentes compactas, com potência total de até 50 W. Descrevem-se a estratégia de implementação e suas características, face aos sistemas comerciais. O sistema desenvolvido apresenta custo competitivo, dimensões reduzidas, simplicidade e facilidade de construção. Seu desempenho foi avaliado através de testes com um protótipo em bancada de laboratório e em campo.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Iluminação pública, Inversores de alta frequência, Controlador de carga

## 1. INTRODUÇÃO

A iluminação pública é de grande importância no cotidiano das cidades, pois, entre outros fatos, contribui para o deslocamento e a segurança noturnos, tornando-se um recurso trivial e incorporado à arquitetura urbana. Todavia, quando se trata de um povoado sem acesso à eletricidade convencional, a iluminação pública propicia a reunião de pessoas em torno de uma luminária na praça de frente à igreja, ou no pátio de convívio preferencial – não só nas datas de festejos, comemorações e eventos culturais tradicionais, mas, além disso, no dia-a-dia – contribuindo para o desenvolvimento sócio-comunitário. A questão da iluminação pública com energia fotovoltaica ainda não foi suficientemente explorada no mercado. Trata-se de uma aplicação ainda recente, para a qual não foi desenvolvida uma tecnologia específica. Para configurar um sistema dessa natureza os projetistas recorrem a componentes de propósito geral, que às vezes são próprios para uso com energia convencional, ou cujas características servem para além do caso particular de iluminação pública. Com o projeto ora proposto pretende-se preencher esta lacuna tecnológica, ao desenvolver um produto que torne a iluminação pública mais atrativa inclusive quanto à variável econômica.

Com o intuito de melhorar o desempenho de instalações fotovoltaicas para iluminação pública, trabalhos diversos têm sido publicados, entre eles: um sistema para iluminação pública durante o pico de demanda de energia baseado em energia solar (Mineiro, 2003); um sistema para iluminação com inversor e carregador de bateria que busca o ponto de máxima potência, baseado em microcontrolador (Simões; Franceschetti, 2000); um controlador de carga e um inversor para lâmpadas fluorescentes compactas com forma de onda senoidal simétrica baseada em MOSFET (Joshi, 1997); a avaliação das características elétricas, de iluminamento e de suportabilidade a chaveamentos de lâmpadas fluorescentes compactas (Penna, 2003). Iluminação baseada em sistemas fotovoltaicos: Análise de desempenho sob condições de tensão não-senoidal (Mendes, F.2003). Neste trabalho descreve-se a implementação e testes de um kit fotovoltaico de iluminação pública, eficiente, compacto, leve e competitivo para o mercado nacional.

## 2. SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Na Fig. 1 representa-se um sistema autônomo de iluminação pública tendo como fonte primária a energia solar. De modo geral, tal sistema consiste dos seguintes componentes: painel solar, bateria, controlador de carga e descarga, fotocélula, inversor e luminária. A energia solar luminosa é convertida em eletricidade por um módulo solar fotovoltaico que eletricamente carrega uma bateria. O controlador monitora a bateria conectando-a ao módulo solar e habilitando o inversor em função do nível de tensão, evitando que haja carga ou descarga excessiva. Durante a noite, o conversor é habilitado pelo sinal da fotocélula ligando uma ou mais lâmpadas fluorescentes compactas, desde que a tensão da bateria esteja entre níveis pré-determinados. A montagem comercial de um kit fotovoltaico como este normalmente consiste na implementação de um sistema cujos componentes são comprados separadamente - às vezes de fabricantes diferentes - acarretando algumas desvantagens como, mais interligações e, principalmente, maiores dimensão e peso por unidade de potência. Esta situação caracterizada como negativa, prejudica especialmente as comunidades rurais remotas, posto que desestimula o poder público a fazer instalação destes equipamentos.

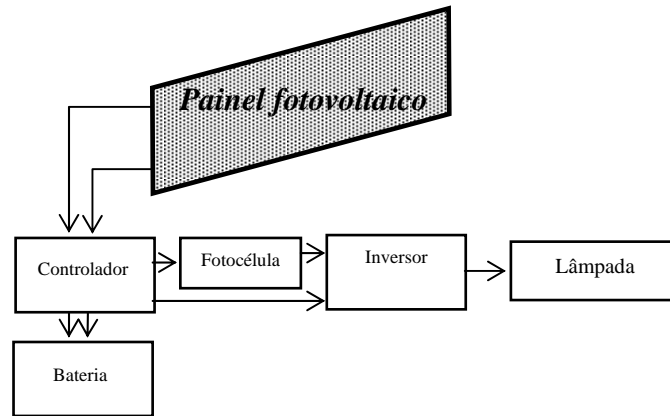


Fig. 1 – Diagrama de blocos de um sistema fotovoltaico de iluminação pública convencional

### 3. ESTRATÉGIA DE IMPLEMENTAÇÃO

A estratégia adotada neste trabalho para implementação do sistema mostrado na Fig. 1 foi: embutir em um só chip todo o controle; usar um fotodiodo (minúsculo diante de uma fotocélula comercial); aumentar a frequência para diminuir o tamanho do transformador; adotar lâmpadas fluorescentes compactas porque já estão a venda em qualquer empório comercial; e reduzir o peso total do kit de modo que possa mais facilmente ser acomodado na ponta de um poste ou outro suporte qualquer. A idéia foi incorporar em um único bloco a implementação dos circuitos do controlador, do conversor e da fotocélula (está tendo como sensor um fotodiodo). Na Fig. 2 mostram-se os blocos funcionais do sistema como concebido.

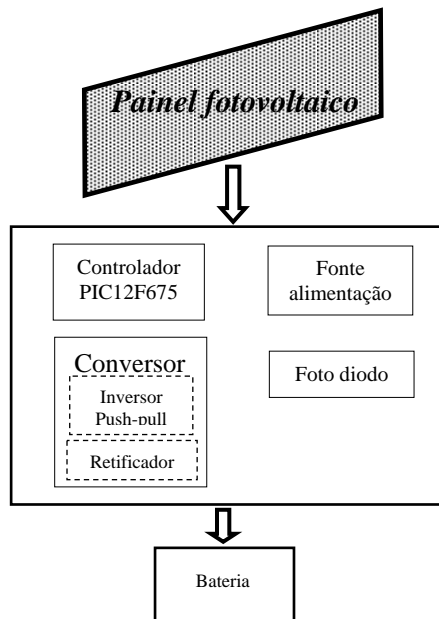


Fig. 2 – Blocos funcionais do sistema de iluminação fotovoltaica.

#### 3.1 Controlador de carga e descarga microcontrolado

A função principal do controlador é monitorar o nível de tensão da bateria para conectá-la ou não ao módulo solar e habilitar ou não o inversor. Para isto, ele é composto de dois subcircuitos – um para o controle de carga e outro para o de descarga. O primeiro implementa a histerese (a) da Fig. 3; o segundo, a (b). Dessa forma, quando a bateria atinge seu valor de carga máxima, portanto  $V_{bat} = 13,7 \text{ V}$ , a saída Cc do controlador de carga sobe, desconectando o módulo solar da bateria. Somente quando  $V_{bat}$  volta a  $12,5 \text{ V}$ , a saída Cc cai conectando a bateria ao painel solar. Quando a bateria atinge o valor  $V_{bat} = 11 \text{ V}$  a saída Cd do controlador de descarga cai e desliga o oscilador, parando o consumo de energia pela luminária. Somente após  $V_{bat}$  voltar a  $12 \text{ V}$  o oscilador é reabilitado com Cd alto. Este modo de operação evita sobrecarga ou descarga completa da bateria, que são situações indesejáveis. Os limites  $12 \text{ V}$  e  $12,5 \text{ V}$  aqui foram arbitrados. O limite de  $11 \text{ V}$  tem uma tolerância de  $0,5 \text{ V}$ , pois com  $10,5 \text{ V}$  a bateria está no vale da descarga plena

podendo se danificar irreversivelmente. Como limite de carga plena aqui foi usado 13,7 V, mas este valor depende do tipo da bateria, pois, para algumas o fabricante recomenda usar o controlador com corte de carga em 14,8 V.

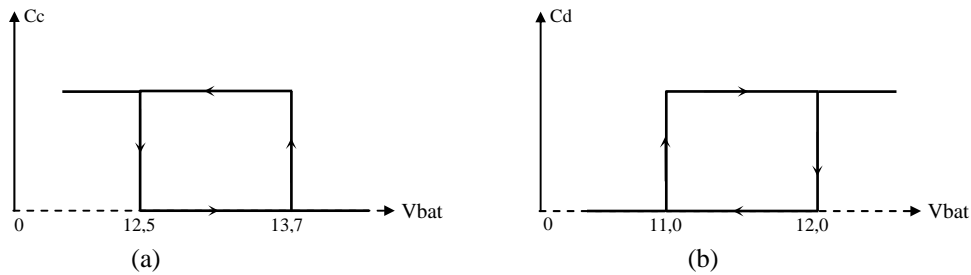


Fig. 3 - Histerese do controlador de carga e descarga da bateria  
 (a): Cc – sinal do controlador de carga ; (b): Cd – sinal do controlador de descarga

O controlador mostrado na Fig. 4 foi implementado usando-se um microcontrolador PIC12F675, devido ao seu baixo custo e recursos técnicos adequados para simplificar o projeto, dos quais foram utilizados: dois ADCs de 10 bits, um para monitorar a tensão do fotodiodo e conseqüentemente controlar a operação do inversor; e outro para monitorar a tensão da bateria, que juntamente com duas saídas digitais - para acionamento dos MOSFETs - compõem o controlador de carga e descarga. Os níveis de referência destas medições podem ser reprogramados em função de redefinição dos limites de tensão nas histereses da Fig. 3, bem como da luminosidade que habilitará o inversor.

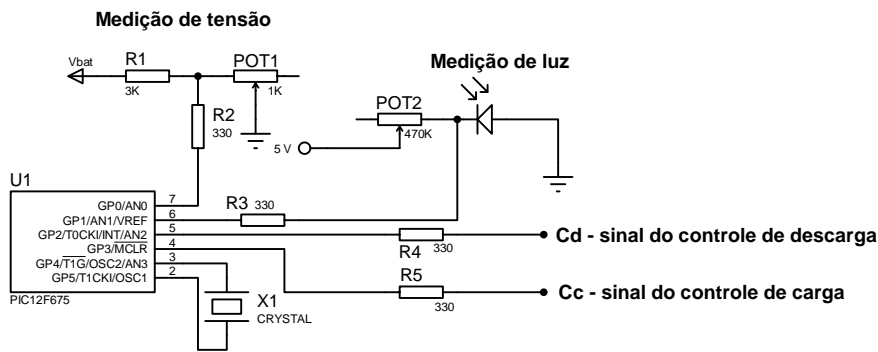


Fig. 4 – Controlador implementado com o PIC12F675 - e o circuito fotocélula.

### 3.2 Fotocélula

Na Fig.4, seção anterior, mostra-se o circuito da fotocélula, implementado com um fotodiodo em substituição ao dispositivo tradicional, bem mais caro, à base de LDR. Este circuito em conjunto com o controlador de descarga, permite que a luminária seja energizada somente quando a bateria estiver carregada e apenas à noite, ou seja, entre 18 e 6 horas. Na Tab. 1 tem-se o estado da luminária de acordo com os sinais enviados pelo controlador e fotocélula.

Tab. 1 – Situação da luminária de acordo com a luz do dia e a tensão da bateria.

| PERIODO         | BATERIA    | Cd | LUMINÁRIA |
|-----------------|------------|----|-----------|
| Dia             | Carregada  | 1  | Apagada   |
| Dia             | Descarreg. | 1  | Apagada   |
| Noite: 18 – 6 h | Carregada  | 0  | Acessa    |
| Noite           | Descarreg. | 1  | Apagada   |

### 3.3 Conversor cc/ca/cc: inversor push-pull + ca/cc

Para implementação do inversor foi escolhida a topologia push-pull, com chaveamento em alta freqüência visando conseguir um menor tamanho físico do conjunto. Seu princípio de funcionamento baseia-se na condução complementar das chaves  $S_1$  e  $S_2$ , comandas pelos sinais  $Q_1$  e  $Q_2$ , criando tensões alternadas nos enrolamentos primários e secundário do transformador elevador de 12 + 12 V / 220 V, conforme ilustrado na Fig. 3.

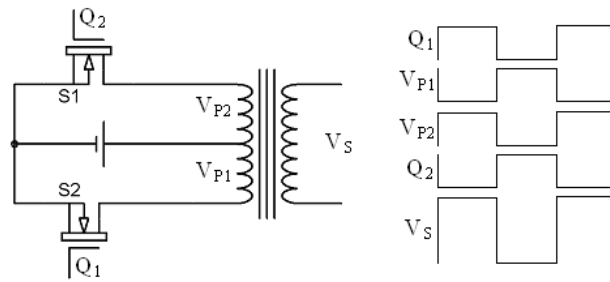


Fig. 5 – Inversor de topologia push-pull.

Para o comando das chaves foi implementado um oscilador de onda quadrada com duas saídas  $Q_1$  e  $Q_2$  defasadas de  $180^\circ$  e frequência de 20 kHz. O sucesso dessa configuração push-pull nesta frequência - implementação mostrada na Fig. 5 - se deve exclusivamente ao CI TC4428 “Dual High-Speed Power MOSFET DRIVERS”. Na saída do inversor foi acrescentada uma ponte retificadora de onda completa com diodos rápidos, finalizando a construção do conversor de alta frequência. Assim, o conversor fornece um sinal CC, evitando danos ao circuito eletrônico da lâmpada fluorescente PL que tem, internamente, uma ponte retificadora projetada com diodos adequados apenas para a frequência da rede (60 Hz).

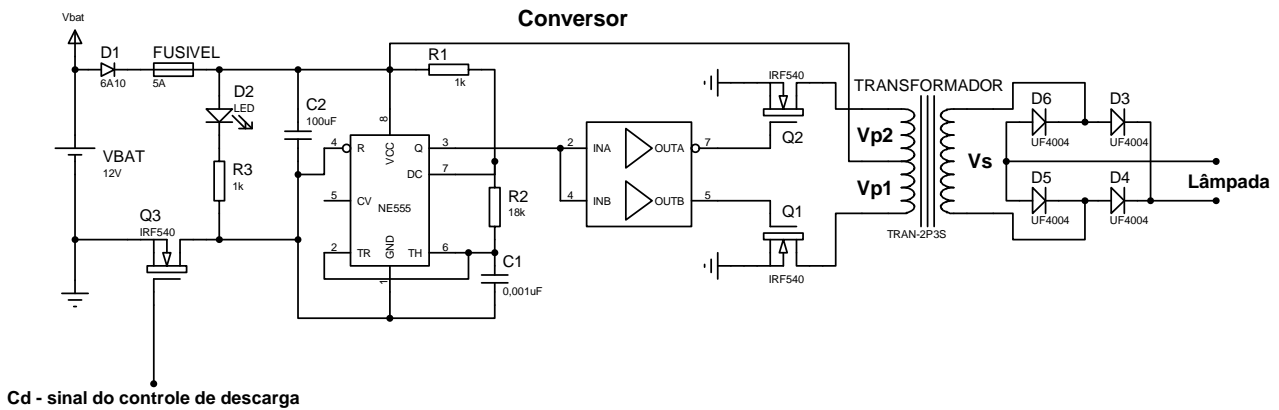


Fig. 6 – Circuito conversor CC/CC push-pull de alta frequência.

#### 4. TESTES E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo desenvolvido foi submetido a um intenso conjunto de testes e provado no campo. O teste do controlador de carga e descarga em laboratório foi realizado com uma fonte de tensão variável, simulando o módulo fotovoltaico, e uma bateria de chumbo-ácido. Nestes testes o controlador respondeu de acordo com os pontos de transição definidos nos ciclos de histerese da Fig. 3. O teste do circuito fotocélula foi feito em bancada, ora cobrindo o fotodiodo para simular noite, por exemplo; Os testes de campo foram feitos com um módulo de 75 Wp,  $V_{m\acute{a}x}=21,7$  V,  $I_{sc}=4,8$  A e uma bateria de chumbo-ácido de 45Ah, comprovando-se, neste caso, os resultados de laboratório. Na Fig.7 é mostrado o diagrama de testes do controlador no laboratório.

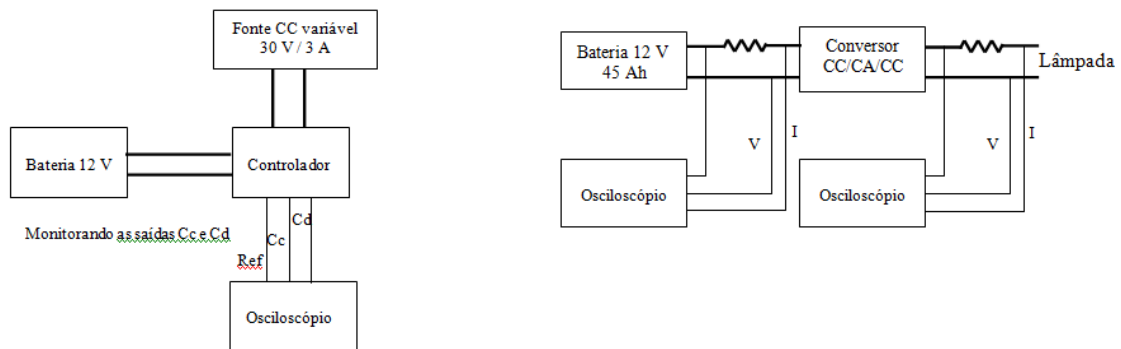


Fig. 7 – (a) Diagrama de testes do controlador para monitorar as saídas Cc e Cd.  
(b) Diagrama de testes do conversor.

Nos testes do conversor realizados em laboratório foram utilizadas uma bateria de 45Ah, lâmpadas fluorescentes compactas PL e resistências shunt como sensor de corrente conforme a Fig. 7(b). Durante o teste do inversor foram usadas três lâmpadas compactas PL totalizando 46 W, usadas de formas diversas para ver como se comporta o conversor em diferentes níveis de carga, respeitando é claro a potência máxima do transformador utilizado. Após inúmeros testes em laboratório pode-se constatar o funcionamento do circuito inversor de acordo com o esperado. Na Fig. 9 mostra-se a forma de onda de corrente e tensão da bateria. Percebe-se a presença de spikes na corrente, que poderia causar aquecimento na bateria, reduzindo sua vida útil (GURDJIAN; MAXWELL, 2002). No entanto por tratar-se de um inversor de baixa potência, os spikes observados foram apenas da ordem de 0,8 Ap-p.

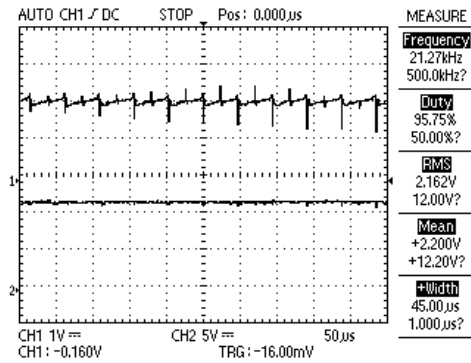


Fig. 8 Forma de onda de corrente e tensão na bateria  
 $I = 2,15 \text{ A}$   $V_{\text{bat}} = 12 \text{ V}$  alimentando o conversor com 25,8 W

Nas Figs 9(a) e 9(b) observam-se as formas de onda na entrada e saída do retificador, respectivamente, em 20 kHz. Podendo-se constatar em 9(a) a simetria na onda AC e a ausência de spikes de tensão significativos, e em 9(b) spikes de corrente da ordem de 0,7 A na alimentação da lâmpada. Não se pode observar caráter prejudicial nesses spikes, a não ser a possível criação de uma interferência eletromagnética para equipamentos nessa faixa de frequência.

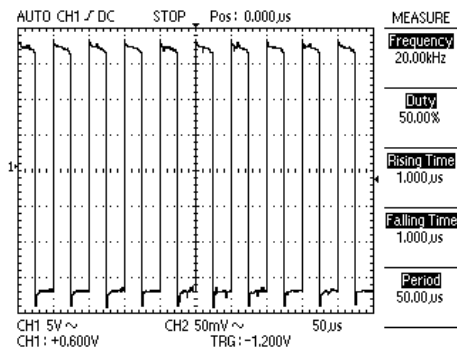


Fig. 9(a) Tensão na saída do transformador

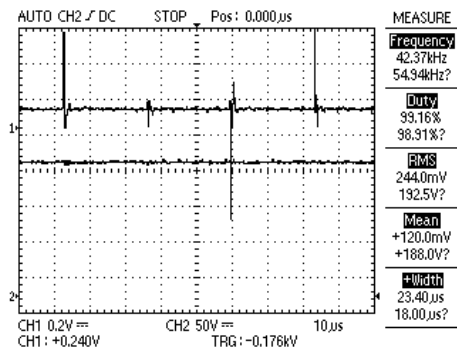


Fig. 9(b) Corrente e tensão na saída do retificador

Arbitrariamente duas medições foram feitas para cálculo de rendimento do conjunto bateria-conversor, cujos valores estão registrados na Tab. 2. Nota-se um rendimento pouco maior do que 80% introduzidas pelo transformador e principalmente pelos diodos da ponte retificadora. Após o conjunto ser submetidos aos testes laboratoriais, também foi exposto à prova em campo, onde funciona satisfatoriamente há mais de dois meses, com uma lâmpada PL de 34 W.

Tab. 2 - Medição de rendimento do sistema bateria-conversor para dois valores de carga PL.

|         | CORRENTE | TENSÃO | POTENCIA | RENDIMENTO |
|---------|----------|--------|----------|------------|
| ENTRADA | 2,45A    | 12,9V  | 31,58W   |            |
| SAIDA   | 0,120A   | 215V   | 25,8W    | 81,6%      |
| ENTRADA | 1,7A     | 12,9V  | 21,93W   |            |
| SAIDA   | 0,085A   | 217V   | 18,44W   | 84,1%      |

## 5. CONCLUSÕES

Obteve-se um sistema compacto, isto é, de boa relação potência/peso ou potência/volume, principalmente devido ao transformador de alta frequência. Também eficiente, tendo em vista que o rendimento do conversor, pouco mais de 80%, na frequência de 20 kHz pode ser considerado bom. Os diodos da ponte retificadora do conversor contribuíram para perda de eficiência. No entanto ela foi adotada como uma técnica simples para evitar danos à lâmpada PL que passou a ser alimentada praticamente com uma tensão contínua – a onda quadrada do inversor push-pull retificada. A grande vantagem foi, com isto, reduzir o volume e o peso – principalmente do transformador – sem onerar o custo final do sistema. Outras melhorias podem ser futuramente incorporadas, como redução dos spikes de corrente na bateria e aumento de rendimento do conversor.

## REFERÊNCIAS

- Duarte, J.L.; Wijntjens, J.A.A.; Rozenboom, J.; “Designing light sources for solar-powered systems” Power Electronics and Applications, Fifth European Conference on , 13-16 Sep. 1993.
- Gurdjian, Ed; Maxwell, Carol. Inverter Technology. Disponível em: <<http://www.rvtechstop.com/articles/Invte-ch2-s.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2002.
- Joshi, H.V.; “Solar PV charge controller and an efficient SPRL MOSFET based sine symmetrical inverter for compact fluorescent lamp” Power Electronics and Drive Systems, Proceedings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE, 1997. [S.I], 1997. v.1.
- Mendes, F.; Camelo, N. J.; Saavedra O. R.; Santos, W. M.; Iluminação baseada em sistemas fotovoltaicos: Análise de desempenho sob condições de tensão não-senoidal. In: Proceedings of the 5th Latin-American Congress Electricity Generation and Transmission. Guaratinguetá: UNESP, 2003, v. 1, pp. 1-6.
- Mendes, F.; Camelo, Nelson José ; Saavedra, Osvaldo R. . Photovoltaic Inverter Controller for Public Lighting Systems. In: 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2003, Ceará. Anais do COBEP 2003. Fortaleza : UFC, 2003. v. 1. p. 1037-1040.
- Mineiro, E. S. JR., Daher, S., Cruz, c. and antunes, F., Power Electronics System for Solar Energy Supply of Public Lighting during Peak Demand, The 7th Brazilian Power Electronics Conference. COBEP, 2003.
- Penna, C., Enersul, Resende, J. W., Samesima, M. I., Avaliação das Características Elétricas, de Iluminamento e de Suportabilidade a Chaveamentos de Lâmpadas Fluorescentes Compactas, II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL, 2003.
- Simões, M. Godoy, Franceschetti, N. N. “A RISC microcontroller based photovoltaic system for illumination applications”. In: IEEE-APEC APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE, New Orleans, Louisiana, 2000. v.3, February 6 -10, 2000, p. 479-485.

**Abstract.** *In this paper, the development, implementation and tests results of the conditioning and advantageous use of PV energy in public lightening systems is presented. Such a system is composed by a charge and discharge controller, a photocell and a high frequency CC/CC converter to energize fluorescent lamps. The developed system is very competitive once that it has a low cost, small size and it's very simple and easy to be constructed. A prototype test is used to evaluate the project's performance.*

**Key words:** Public lighting; Photovoltaic energy; Inverter, controller.