

Suprimento de Energia para Iluminação Pública em Horário de Ponta Utilizando Energia Solar

Edilson Mineiro S. Jr.¹, S. Daher¹, Cicero M. T. Cruz¹, Fernando L. M. Antunes¹, A. Ribamar Filgueira² e Kátia M. da Silva² Universidade Federal do Ceará² COELCE – Companhia Energética do Ceará

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico de suprimento de energia à iluminação pública na hora de pico de demanda do sistema elétrico. O sistema pode suprir a iluminação por até duas horas e meia, quando utilizadas lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão (HPS) de 70W e com radiação solar média de 5500W/m²/dia. Durante o dia, a energia solar é capturada por um painel fotovoltaico e armazenada em baterias de chumbo ácido através de um conversor boost. Este conversor possibilita a carga da bateria no ponto de máxima potência (MPP) do painel fotovoltaico. A noite a lâmpada HPS de 70W é ligada através de reator eletrônico, o qual opera seus interruptores com comutação em tensão nula (ZVS). O sistema é controlado por um microcontrolador RISC AT90S8535, que procura o ponto de máxima potência, monitora o nível das baterias e determina o tempo de funcionamento do conversor CC/CC, que possibilita o acionamento do reator eletrônico pelas baterias.

PALAVRAS-CHAVE

Painel Solar, Iluminação, Baterias, Reator Eletrônico e Microcontrolador

I. INTRODUÇÃO

O custo de um sistema fotovoltaico está amplamente relacionado com o que é considerado custo e o que é considerado benefício. Tomando-se os preços de mercado e o ciclo de vida de um sistema fotovoltaico, o custo da eletricidade gerada pode ficar em torno de 0,30 a 1,00 USD/kW. Este custo tem sido fator limitante no uso de sistemas

fotovoltaicos em comparação com custos de energia de origem hidráulica, nuclear ou fóssil. Considerando, entretanto, as dificuldades que hoje se impõem na construção de novas usinas geradoras, as dificuldades e custo na construção de novas linhas de transmissão, fatores como energia mais cara nas horas de pico de demanda e a desregulamentação do sistema elétrico que possibilita a compra de energia produzida em excesso pelo sistema fotovoltaico. A energia elétrica oriunda por sistemas fotovoltaicos já pode ser considerada economicamente viável.

Para amortização dos investimentos iniciais, é muito importante que se extraia o máximo de potência que o painel fotovoltaico possa fornecer. Como a potência de um painel muda com a temperatura, radiação solar e sua carga, se faz necessário o uso de um microcontrolador, juntamente com a eletrônica de potência, para ajustar a impedância elétrica dinâmica do painel fotovoltaico.

Este artigo descreve a implementação de um sistema fotovoltaico para iluminação pública, diferente de outras concepções de sistemas auto-suficientes [1,2,3], este é interligado a rede elétrica. O sistema supre de energia, através das baterias, uma lâmpada HPS de 70W por até duas horas e meia, tempo em que ocorre o pico de demanda do sistema elétrico.

A carga das baterias de chumbo ácido é feita por um conversor boost com ciclo de trabalho controlado por um microcontrolador AT90S8535 da Atmel[®], este dispositivo possibilita que a carga seja feita no ponto de máxima potência do painel. Ao anoitecer, o sistema utiliza o próprio painel fotovoltaico como sensor de luz e liga o conversor CC/CC tipo flyback, este atua durante um período de duas horas e meia, momento em que é utilizada a energia inicialmente armazenada nas baterias, e a rede elétrica encontra-se desconectada. A saída do conversor CC/CC é ligada diretamente no barramento CC do reator eletrônico. Este por sua vez através, de um circuito meia ponte e um circuito ignitor, liga a lâmpada.

O diagrama em blocos do sistema pode ser visualizado na figura 1. Este sistema é dividido em quatro subsistemas controlados diretamente pelo microcontrolador: reator eletrônico (*ballast*); o conversor CC/CC; o controlador de carga das baterias e a acionamento do corretor de fator de potência (PFC).

Projeto de P&D executado com recursos proveniente do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da COELCE - ciclo 2001/2002, através da parceria celebrada entre a Universidade Federal do Ceará (UFC) com anuência da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC).

Edilson Mineiro S. Jr. é consultor e aluno de mestrado da Universidade Federal do Ceará (e-mail: edilson@dee.ufc.br)

S. Daher é consultor da Universidade Federal do Ceará, está cursando o doutorado (e-mail: sdaher@dee.ufc.br)

Cícero M. T. Cruz é professor da Universidade Federal do Ceará (e-mail: cicero@dee.ufc.br)

Fernando L. M. Antunes é professor da Universidade Federal do Ceará (e-mail: fantunes@dee.ufc.br)

A. Ribamar Filgueira é engenheiro da Companhia Energética do Ceará COELCE (e-mail: aribamar@coelce.com.br)

Kátia M. da Silva é engenheira da Companhia Energética do Ceará (katia@coelce.com.br)

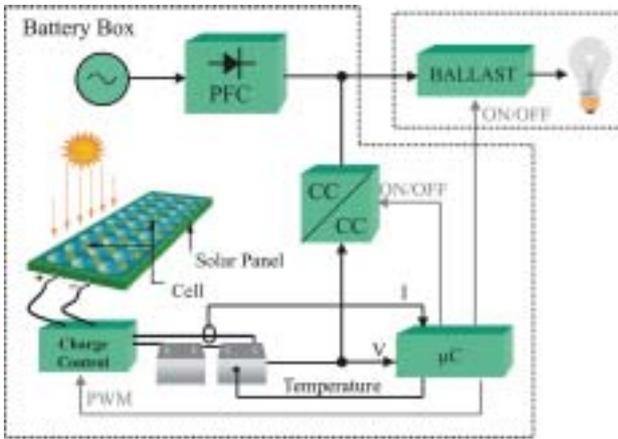


FIGURA 1 – Diagrama em blocos do sistema desenvolvido.

II. DIMENSIONAMENTO DOS PAINÉIS E BATERIAS

Para o dimensionamento dos painéis fotovoltaicos e das baterias, o sistema pode ser simplificado [4].

A potência média que deverá ser fornecida pelo banco de baterias durante o funcionamento do sistema é definida pela equação 1.

$$P_{Bat} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (1)$$

P_{Bat} → Potência média fornecida pelo banco de baterias.

η → Eficiência do sistema.

P_{out} → Potência drenada pela carga.

Já o consumo do sistema em amperes hora por (Ah/dia) é definida pela equação 2.

$$Ah_L = \frac{P_{Bat} \cdot t_{func}}{V_{cc}} \quad (2)$$

Ah_L → Consumo diário da carga.

t_{func} → Tempo de funcionamento da carga por dia (h/dia).

V_{cc} → Tensão do barramento (12V, 24V, etc.).

A capacidade média de geração, em amperes hora por dia de cada painel fotovoltaico de 12V, é dada pela equação 3.

$$Ah_d = \frac{I_{Rs} \cdot R_{med}}{R_s} \quad (3)$$

Ah_d → Capacidade fornecida pelo módulo fotovoltaico em um dia.

R_{med} → Radiação média diária do local de instalação.

R_s → Radiação solar padrão (1000 W/m²).

I_{RS} → Corrente fornecida pelo módulo para radiação R_s .

O número mínimo de painéis fotovoltaicos necessários para o consumo especificado é dado pela equação 4.

$$Np = \frac{Ah_L \cdot V_{cc}}{Ah_d \cdot 12} \quad (4)$$

Ah_L → Capacidade de consumo diário da carga.

A capacidade total das baterias necessária para o funcionamento do sistema é dada pela equação 5.

$$C_{bat} = \frac{Ah_L \cdot d \cdot V_{cc}}{Dc \cdot V_{bat}} \quad (5)$$

C_{bat} → Capacidade total das baterias.

d → Dias de autonomia.

V_{cc} → Tensão barramento.

Dc → Profundidade de descarga.

V_{bat} → Tensão na bateria.

As baterias geralmente são especificadas pelo produto da corrente pelo tempo (Ah), esta característica é fornecida para um funcionamento ininterrupto de 20 horas. Sempre que se desejar utilizar o potencial máximo da bateria em um curto intervalo de tempo, deve-se aplicar à especificação de Ah um índice de correção retirada de curvas fornecidas pelo fabricante.

Para uma radiação média de 5500W/m²/dia em Fortaleza-Ceará-Brasil, funcionamento de 2,5 horas, uma eficiência do sistema de 80%, lâmpada HPS de 70W, um dia de autonomia, profundidade de descarga de 30% e uma tensão de barramento das baterias de 24V, as baterias ficaram dimensionadas em duas estacionárias de 45Ah e um painel fotovoltaico de 75W. As baterias utilizadas foram do modelo 12MC45 da Moura e o painel fotovoltaico o SP75 de 75W da Siemens®.

III. CONTROLADOR DE CARGA DA BATERIA

Para maximizar a potência de saída do painel fotovoltaico, deve-se utilizar algoritmos de procura do ponto de máxima potência do painel (MPPT). Para um perfeito dimensionamento do sistema é necessária a compreensão do modelo da célula de um módulo fotovoltaico [5], a qual é mostrado na figura 2. Sendo R_s a resistência resultante dos metais de contato com a carga (*fingers*) e R_p resultante das resistências advindas da própria junção *pn* que constitui a célula fotovoltaica.

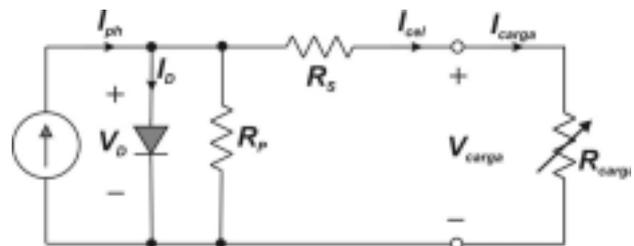


FIGURA 2 - Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica com carga.

O modelo elétrico, próximo ao real, de uma célula do módulo fotovoltaico pode ser matematicamente representado pela equação 6.

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 \cdot \left(e^{\frac{q}{A \cdot k \cdot T} (V_{charge} + I_{cell} \cdot R_s)} - 1 \right) - \frac{V_{charge} + I_{cell} \cdot R_s}{R_p} \quad (6)$$

I_{cell} → Corrente fornecida pela célula (em A).

I_{ph} → Corrente representando o efeito fotoelétrico (em A).

I_0 → Corrente de saturação ou corrente de escuro (em A).

q → Magnitude de carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

V_{charge} → Tensão aplicada na carga R_{load} .

A → Fator de idealização para junção p-n.

K → Constante de Boltzmann's ($8,65 \cdot 10^{-5}$ eV/K).

T → Temperatura (em K).

Como o módulo fotovoltaico é formado por uma associação de células, é possível representa-lo pela figura 3 [6]. Aonde R_{SM} é a resistência série equivalente, R_{PM} a resistência paralela equivalente do módulo, NP número de células em paralelo e NS número de células em série e I_{phM} a corrente fornecida pela fonte de corrente do módulo.

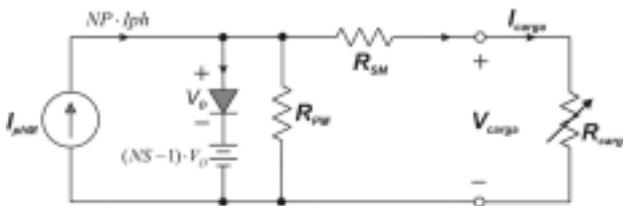


FIGURA 3 - Modelo para o módulo fotovoltaico

O manual do fabricante fornece a corrente máxima que equivalente a corrente de curto-circuito (I_{curto}), tensão máxima equivalente à tensão em aberto (V_{aberto}), corrente nominal equivalente a corrente em MPP (I_{MPP}) e tensão nominal equivalente à tensão em MPP (V_{MPP}). Estes valores são fornecidos para uma radiação de 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C , os valores para o módulo SP75 são mostrados na tabela 1.

TABELA 1
Características elétricas do módulo SP75 da Siemens.

Módulo SP75 de 75W (Siemens)	
Máxima corrente (I_{curto})	4,8 A
Máxima tensão (V_{aberto})	21,7 V
Corrente nominal (I_{MPP})	4,4 A
Tensão nominal (V_{MPP})	17 V

No ponto de máxima potencia, considerando que R_{PM} é muito maior que R_{SM} , a corrente máxima (I_{curto}) pode ser aproximada à corrente fornecida pela fonte de corrente do módulo (I_{phM}) e a tensão máxima (V_{aberto}) à tensão de polarização do diodo (V_D) mais a da fonte. O circuito equivalente é mostrado na figura 4.

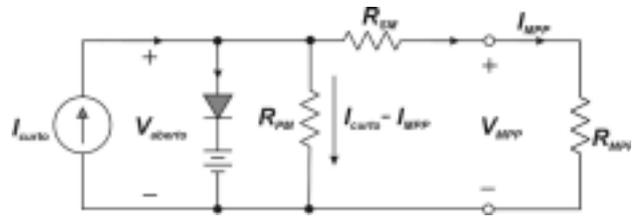


FIGURA 4 - Circuito equivalente do módulo no ponto de máxima potência.

Equacionando o circuito da figura 6, pode ser determinado o valor de R_{SM} pela equação 7.

$$R_{SM} = \frac{V_{aberto} - V_{car\ g a}}{I_{MPP}} \Rightarrow R_S = \frac{21,7 - 17}{4,4} \cong 1,068\Omega \quad (7)$$

Analogamente, o valor de R_{PM} pode ser encontrado pela equação 8.

$$R_{PM} = \frac{V_{aberto}}{I_{curto} - I_{MPP}} \Rightarrow R_P = \frac{21,7}{4,8 - 4,4} \cong 54,25\Omega \quad (8)$$

A curva característica $I \times V$, corrente versus tensão, obtida através da simulação do modelo no PSPICE® é apresentada na figura 5

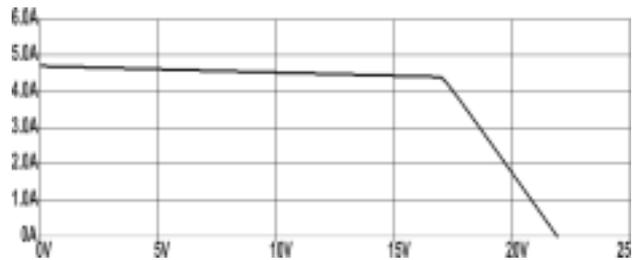


FIGURA 5 – Curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico, obtida por simulação.

Podem ser observado o comportamento dual do módulo fotovoltaico, à esquerda da curva como fonte de corrente e a direita como fonte de tensão.

Na figura 6 é apresentada a curva $P \times V$, corrente versus tensão, também obtida por simulação

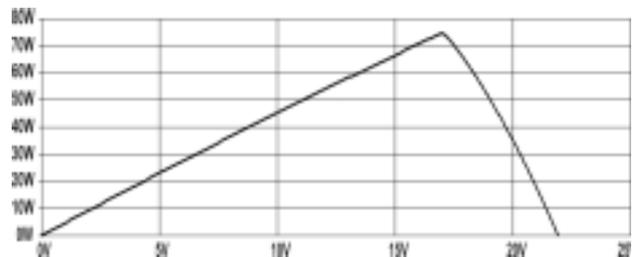


FIGURA 6 – Curva $P \times V$ do módulo fotovoltaico, obtida por simulação.

Através da análise das figuras 5 e 6 percebe-se que a curva simulada está muito próxima da curva real do módulo, mostrada na figura 7, o que assegura a confiabilidade dos resultados obtidos em relação ao modelo.

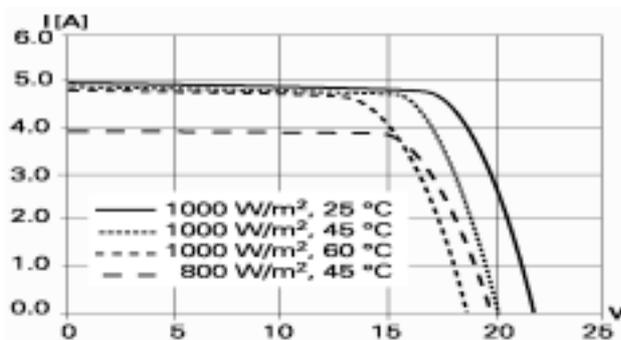


FIGURA 7 - Curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico, retirada do manual do fabricante.

Para diminuir a corrente nos conversores e minimizar as perdas por condução dos interruptores, foi optada por uma tensão de barramento das baterias de 24V. Contudo, esta especificação limitou ao uso de um conversor CC/CC elevador de tensão, o conversor escolhido foi o *boost*.

Como o módulo fotovoltaico possui comportamento dual no ponto de máxima potência, como fonte de corrente e fonte de tensão, é indispensável a utilização de um capacitor (C_e) em paralelo ao painel. Este componente, mostrado na figura 8, além de garantir que a entrada do *boost* seja uma fonte de tensão, possibilita diminuir a variação de tensão da saída do painel, melhorando assim, a sintonia do MPP.

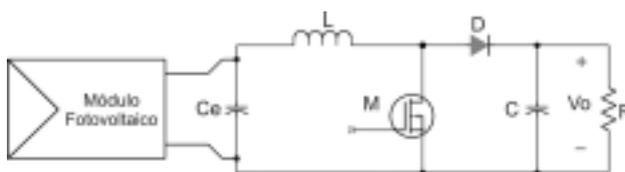


FIGURA 8 - Conversor boost conectado a um módulo fotovoltaico e com capacitor de entrada.

Considerando que toda a energia da variação de corrente é fornecida pelo capacitor em paralelo ao painel (C_e), pode ser determinada a equação 8.

$$\frac{1}{2} C_e (V_{MAX}^2 - V_{MIN}^2) = \frac{1}{2} L (I_{MAX}^2 - I_{MIN}^2) \quad (9)$$

C_e → Capacitor em paralelo com o painel.

V_{MAX} → Valor máximo da ondulação na tensão de entrada do *boost*.

V_{MIN} → Valor mínimo da ondulação na tensão de entrada do *boost*.

L → Indutor do *boost*.

I_{MAX} → Valor máximo da ondulação na corrente de entrada do *boost*.

I_{MIN} → Valor mínimo da ondulação na corrente de entrada do *boost*.

Equacionando em termos da corrente nominal e sua variação, da equação 9, chega-se a equação 10.

$$C_e = \frac{L \cdot I_{NOM} \cdot \Delta I}{V_{NOM} \cdot \Delta V} \quad (10)$$

I_{NOM} → Corrente nominal da entrada do *boost*.

ΔI → Ondulação na corrente na entrada do *boost*.

V_{NOM} → Tensão nominal da entrada do *boost*.

ΔV → Ondulação na tensão da entrada do *boost*.

O circuito simulado é mostrado na figura 9, o indutor *boost*, $L1$ é dimensionado para que o conversor trabalhe em condução contínua.

O capacitor $C1$, equivalente ao capacitor C_e , limita as ondulações de tensão no painel, bem como garante que na entrada do conversor seja uma fonte de tensão. Os valores de $R1$, representando R_{PM} , e $R2$, representando R_{SM} , foram obtidos a partir dos dados fornecidos pelo manual do fabricante. Para representar a resistência do cabo elétrico da bateria e sua indutância, foram utilizados $L2$ e $R4$, que também representa o resistor shunt utilizado como sensor de corrente.

Como a bateria pode ser considerada como uma fonte de tensão constante, é necessário apenas monitorar a corrente de carga da bateria [7] para determinar o ponto de máxima potência e não a potencia de entrada do painel, o que é normalmente utilizado [8,9,10]. A tensão na bateria também é monitorada, apenas para evitar sobrecarga, o que poderia danificar estes acumuladores.

O algoritmo de procura do ponto de máxima potencia é semelhante ao utilizado por E. Koutroulis [8], porem utilizando a corrente de carga da bateria.

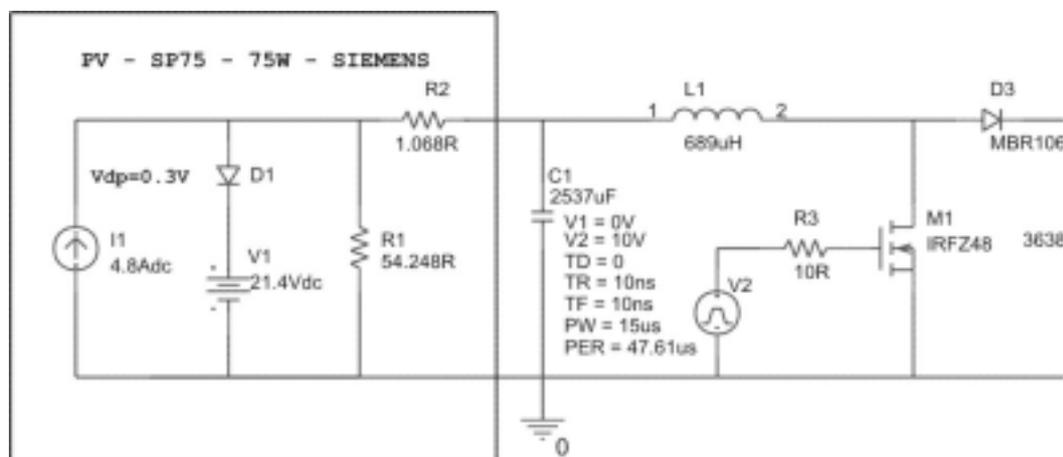


FIGURA 9 – Circuito simulado do controlador de carga com o painel SP75 da Siemens®

IV. CONVERSOR CC/CC

O conversor CC/CC utilizado foi do tipo flyback, este conversor possibilita a elevação de tensão entre 20 e 28V das baterias para 311V do barramento CC do reator eletrônico. Este conversor também possibilita a isolação entre as baterias e o reator eletrônico, devido a sua boa regulação cruzada, a realimentação é efetuada por um enrolamento auxiliar.

Para o seu controle foi utilizado o CI 3524, o qual o microcontrolador habilita apenas o seu funcionamento, ligando ou desligando.

V. REATOR ELETRÔNICO

O uso de um reator eletrônico possibilitou a conexão direta a um barramento CC, além de possuir uma elevada eficiência, quando comparado ao reator convencional, e um tamanho reduzido.

O inversor utilizado no reator eletrônico é uma estrutura meia ponte, a qual o seu modelo simplificado pode ser visualizado na figura 10. A frequência de comutação dos interruptores é de 33kHz, pois neste valor não foi observada ressonância acústica para a lâmpada da Phillips® modelo SON 70W E [11]. O circuito tanque, formado por L_o e C_c , foi dimensionado para o inversor trabalhar com comutação em tensão nula (ZVS) [12].

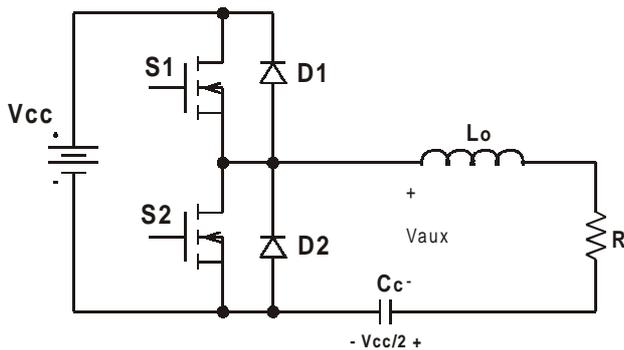


FIGURA 10 - Modelo simplificado da estrutura meia ponte para HPS.

A figura 11 mostra o circuito de potência do reator eletrônico completo.

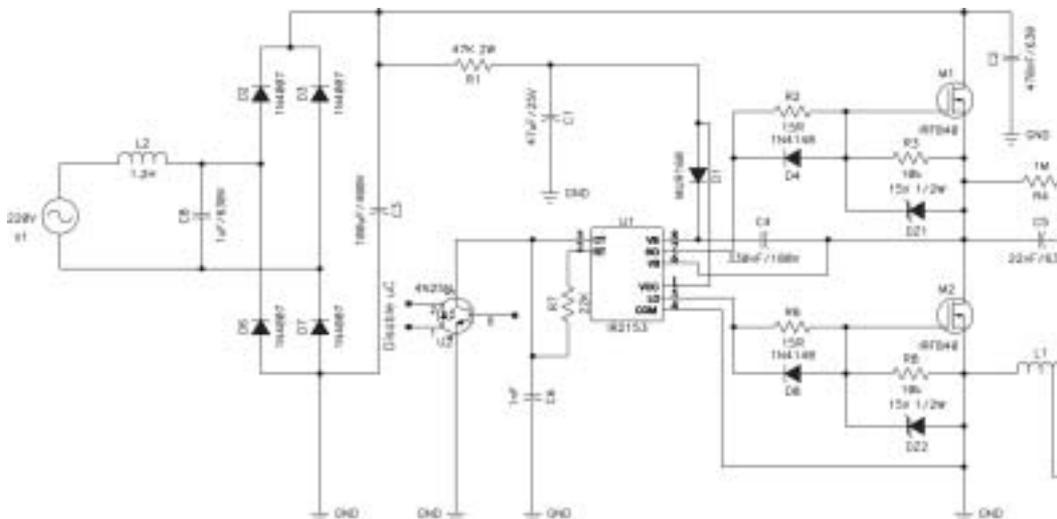


FIGURA 11 - Circuito implementado do reator eletrônico.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na figura 12 é mostrada a tensão e a corrente do circuito montado, para o ciclo de trabalho fixo, o qual praticamente não se observa ondulação na tensão e corrente no módulo fotovoltaico.

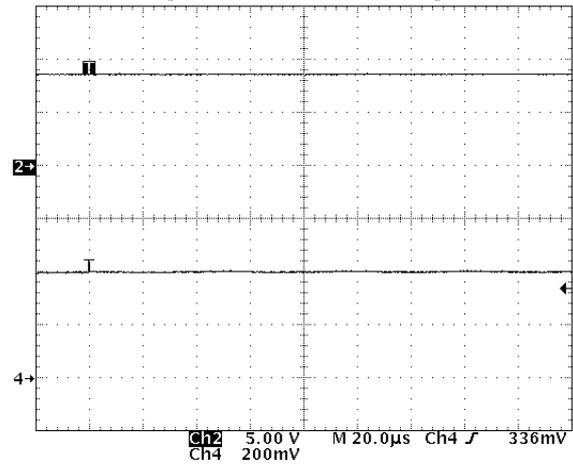


FIGURA 12 - Tensão no módulo fotovoltaico, canal 2 (5V/div), e corrente, canal 4 (2A/div).

A corrente de carga da bateria pode ser observada na figura 13. A ondulação na corrente é amenizada pelo capacitor de saída do boost.

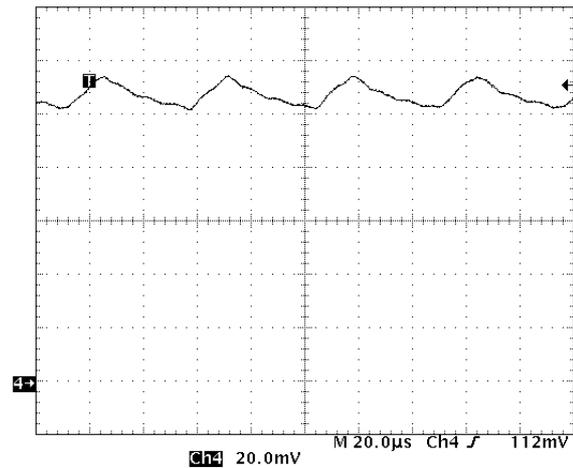


FIGURA 13 - Corrente de carga das baterias (200mA/div).

A tensão e corrente na lâmpada podem ser observadas na figura 14.

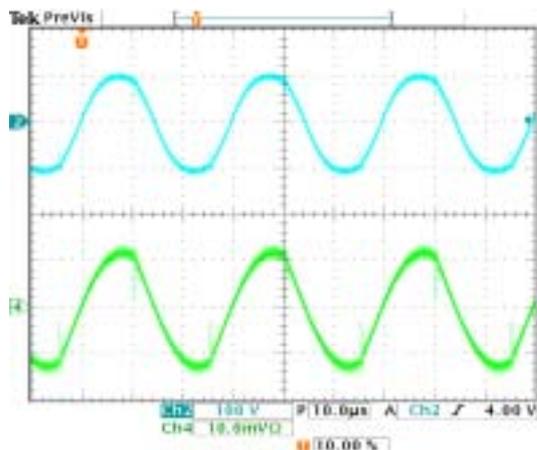


FIGURA 14 – Tensão, canal 2 (50V/div), e corrente, canal 4 (1A/div) na lâmpada.

A figura 15 mostra uma foto do controlador de carga desenvolvido.



FIGURA 15 – Foto do controlador de carga.

A figura 16 mostra a foto do reator eletrônico implementado.

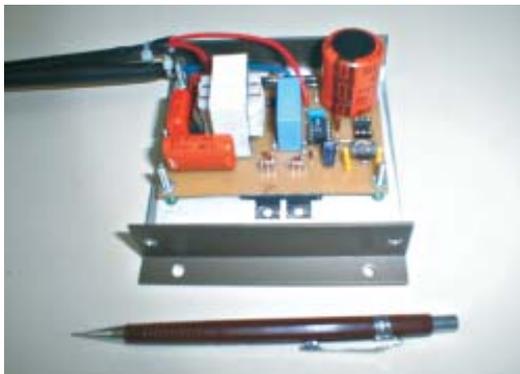


FIGURA 16 – Foto do reator eletrônico implementado.

A figura 17 mostra a foto do reator eletrônico implementado e a lâmpada HPS no momento da sua ignição.



FIGURA 17 – Foto da lâmpada no momento da ignição.

VII. CONCLUSÕES

O controlador de carga, o conversor *boost* utilizado para possibilitar o módulo fotovoltaico trabalhar no seu ponto de máxima potência, foi dimensionado e os resultados foram comparados através de simulações no *PSPICE*. Este método, validou o circuito utilizado e o seu dimensionamento.

O uso de um circuito em meia ponte para o reator eletrônico, possibilitou a montagem do reator eletrônico de baixo custo, o qual foi mais reduzido com a utilização do ignitor incorporado.

A utilização de técnicas avançadas de comutação, ZVS, possibilitou a redução das perdas e conseqüentemente um acréscimo na eficiência do circuito. Outro ponto positivo desta técnica foi à redução das interferências eletromagnéticas.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Harrington e T. D. Hund, "Photovoltaic lighting system performance", *IEEE 25th Photovoltaic Specialists Conference*, May 1996, pp. 1307-1310.
- [2] G. Loois, H. de Gooijer, T. van der Weiden e X. Vallvé, "Large scale market introduction of PV public lighting", *2th Word Conference and Exhibition Photovoltaic Solar Energy Conversion*, July 1998, pp. 3107-3110.
- [3] N. N. Franceschetti, E. B. Schonward e M. Godoy Simões, "Solar energy based public area illumination system", *COBEP*, vol. 1, 1999, pp. 487-492.
- [4] D. C. Martins, M. Mezaroba e I. Barbi, "Treatment of the Solar Energy for a Water Pumping System Using a Current-Fed Parallel Resonant Push-Pull Inverter", *COBEP*, 1999.
- [5] C. Hua e C. Shen, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system", *Applied Power Electronics Conference and Exposition 1998 - APEC '98*, Conference Proceedings, Thirteenth Annual, vol. 2, 15-19 Feb. 1998, pp. 679-685.
- [6] M. Veerachary, T. Senjyu e K. Uezato, "Maximum power point tracking control of IDB converter supplied PV system", *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 148, no. 6, nov. 2001, pp. 494-502.
- [7] F. A. Himmelstoss, A. Laimer e A. Brock, "Microcontroller solar battery charge", *2th Word Conference and Exhibition Photovoltaic Solar Energy Conversion*, July 1998, pp. 3127-3130.
- [8] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis e N. C. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system", *IEEE Tran. On Power Electronics*, vol. 16, no. 1, Jan. 2001, pp. 46-54.
- [9] L. Zhang, A. Al-Amoudi e Yunfei Bai, "Real-time maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems", *IEE Conf. Power Eletronics and Variable Speed Drives*, Set. 2000, pp. 124-129.
- [10] M. F. Shraif, C. Alonso e A. Martinez, "A simple robust maximum power point control (MPPC) for ground photovoltaic generators", *Intern. Power Eletronics Conf.*, 2000, pp. 158-163.
- [11] F. S. Cavalcante, "Reatores eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 70W" *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – INEP/EEL, UFSC, Florianópolis, Dezembro de 2001.*
- [12] A. Anderson S. "Sistema eletrônico para lâmpadas de descarga de alta pressão para iluminação de exteriores", *Exame de qualificação*, Santa Catarina, Florianópolis, Julho de 2001.