

SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Luiz Francisco Coelho Coutinho

Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará
Área da Indústria – Av. 13 de maio, 2081 – Benfica.
CEP: 60.040-531, Fortaleza, CE – Brasil.
coutinho@cefet-ce.br

René Pastor Torrico Bascopé

Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia – Campus do Pici, s/n Bloco 706 Caixa Postal 6001
CEP: 60.455-760, Fortaleza, CE – Brasil.
rene@dee.ufc.br

3.4 Outros Componentes de Sistemas Fotovoltaicos

Resumo – Este trabalho tem o objetivo de mostrar o desenvolvimento de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água em áreas rurais. O sistema é de fácil construção, baixo custo e construído com materiais facilmente encontrados no mercado nacional. É composto basicamente por painéis fotovoltaicos, por um conversor cc/ca em configuração ponte completa, por um transformador de baixa frequência funcionando como elevador de tensão e por uma bomba vibratória submersa. O controle é implementado por um simples microcontrolador. São mostrados resultados experimentais para justificar a operação do protótipo.

Palavras-chave: Inversor de Tensão, Microcontrolador, Sistema Fotovoltaico.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e análise de um sistema de bombeamento de água alimentado através de células fotovoltaicas usando o inversor *Full-Bridge* de tensão, para aplicações em áreas desprovidas de rede de energia elétrica e para uma demanda típica de 50 a 70 l/hab/dia [Chiguru, Naum e Barbosa, 1999].

A estrutura de potência é particularmente simples e robusta e cujas principais vantagens do conversor são: um único estágio de processamento de energia, baixa distorção harmônica da corrente de carga e isolamento natural através de um transformador de baixa frequência.

Princípios de operação, procedimento de projeto, simulações em computador e resultados experimentais são apresentados.

2. SISTEMA PROPOSTO

Diferentes configurações de sistemas de bombeamento fotovoltaico foram estudadas e avaliadas. Algumas incluíam um sistema de armazenamento da energia fotogerada em baterias, outras simplesmente alimentam um motor, que bombeará a água para um reservatório elevado na forma de energia potencial. Este segundo sistema, com configuração bem mais simples e predominante hoje em dia é constituído basicamente de um arranjo fotovoltaico, de um inversor e de uma bomba conforme mostra a Fig.1, e que é estudado neste trabalho.

Existe ainda um sistema bem mais simples que não faz o uso do inversor. Neste caso a energia fornecida pelo arranjo fotovoltaico é entregue diretamente a um motor CC que é acoplado à bomba. Porém, o motor CC apresenta as desvantagens de ter um alto custo e problemas de manutenção por desgaste de peças mecânicas.

Devido ao caráter estocástico da radiação solar, a previsão da eficiência média em longo prazo da bomba é uma tarefa difícil, porém, sabe-se que certamente será bem menor que a eficiência nominal. De uma maneira geral a eficiência do sistema inversor-bomba situa-se na faixa de 25-40%.

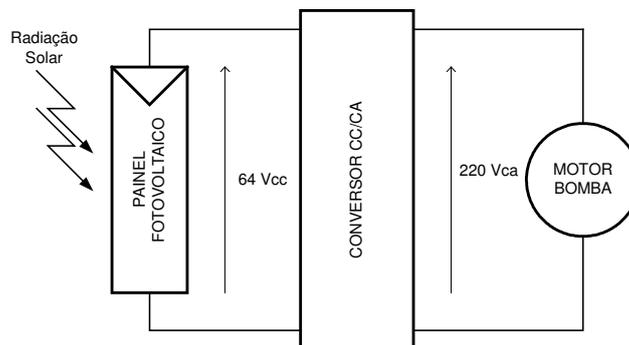


Figura 1 - Sistema simplificado de bombeamento proposto.

Conforme mostrado na Fig.1, a energia fornecida ao sistema de bombeamento de água será obtida unicamente de painéis fotovoltaicos, cujas especificações e o dimensionamento do número de painéis necessários para o sistema proposto serão tratados mais adiante, assim como o projeto do inversor que receberá como entrada uma tensão de 64 Vcc dos painéis fotovoltaicos a qual será convertida para 220 Vca numa frequência de 60 Hz.

Considerando todos os aspectos tratados acima, optou-se pelo uso de uma bomba vibratória submersa que, além de atender todos os requisitos, possui a vantagem de fazer o bombeamento da água mesmo em grandes desníveis, como pode ser visto na Tab.1, além do fato de que este tipo de bomba possui uma longa vida útil, desde que respeitadas as especificações que são fornecidas pelos fabricantes, assim como apresenta um custo bem baixo.

Tabela 1 - Capacidade de bombeamento de uma bomba vibratória submersa.

ALTURA MANOMÉTRICA (m)	CAPACIDADE (L/h)
0	1400
10	1000
20	700
40	400
50	200

A carga possui uma característica fortemente indutiva, com grande circulação de energia reativa e baixo fator de potência ($\cos\phi = 0,245$), conforme dados obtidos experimentalmente e vistos na Tab.2.

Tabela 2 - Valores obtidos no ensaio da carga.

VAZÃO (L/h)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	POTÊNCIA (W)
1400	219	2,8	150
1200	219	2,8	156
900	219	2,8	164
600	219	2,8	172

Considerando somente a componente fundamental da forma de onda da corrente, conclui-se que a carga pode ser bem representada por um indutor associado a um resistor ligados em paralelo como mostrado na Fig.2.

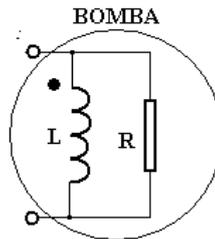


Figura 2 - Modelo elétrico da bomba vibratória submersa.

O valor da resistência da carga R e o valor da reatância indutiva podem ser obtidos pelas Eq.(1) e Eq.(2) respectivamente:

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

$$X_L = \frac{V^2}{Q} \quad (2)$$

na qual P é a potência ativa, Q é a potência reativa e V é a tensão eficaz aplicada na carga. Substituindo os valores obtidos na Tab.2 é encontrado R= 320 Ω e L=214 mH. Logo, |Z|= 320 Ω com fase de 75,8°.

Para um sistema fornecer certa potência ativa específica, um baixo fator de potência significa que a potência aparente envolvida precisa ser maior do que aquela necessária no caso de um fator de potência elevado. Isto significa que com o fator de potência baixo é necessária uma corrente mais elevada e com isto têm-se também transistores com maior capacidade de corrente, cabos mais grossos, maiores cuidados com a proteção, etc. Um método para a melhoria do fator de potência consiste em conectar um capacitor em paralelo com a carga. Isto é a mesma coisa que mover a impedância de carga para um ponto próximo da ressonância, na frequência de alimentação da carga, que no nosso caso é de 60 Hz. Com fator de potência inicial de 0,245 e o fator de potência corrigido de 0,9, foi obtido um capacitor de 30 uF a ser colocado em paralelo com o modelo da carga [Bolton, 1994].

A bomba vibratória escolhida apresenta as seguintes especificações: potência ativa de 150 W e tensão nominal de 220 V. O sistema proposto deve operar por aproximadamente cinco horas por dia durante a presença da radiação solar, já que para este sistema não há previsão de funcionamento com baterias. Será considerado para fins dos cálculos que a tensão média no ponto de máxima potência em cada painel é de 16 V e que o rendimento do inversor é de aproximadamente 0,85% e o ciclo de trabalho da modulação PWM de pulso único é 0,18. O modelo do sistema proposto é mostrado na Fig.3.

Para o projeto assume-se uma tensão eficaz no primário do transformador de $V_{pri} = 36$ V. Desta maneira é utilizado um transformador elevador de 36/220 V para alimentar a carga em 220 Vrms, cujo modelo elétrico simplificado está representado na Fig.3.

A tensão de entrada CC presente na entrada do inversor é obtida pela Eq.(3),

$$V_p = \frac{V_{pri}}{\sqrt{2D}} \quad (3)$$

na qual D é o ciclo de trabalho da modulação PWM, V_{pri} é a tensão eficaz no primário do transformador e V_p é a tensão da associação de painéis. Aplicando-se os valores assumidos anteriormente é encontrado $V_p=60$ V.

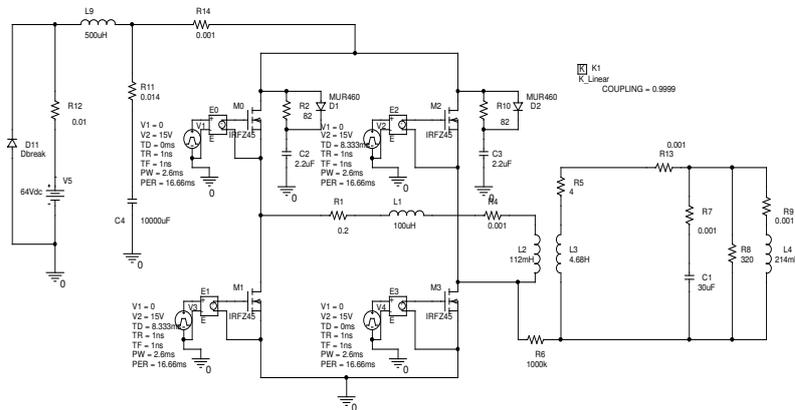


Figura 3 - Modelo do sistema proposto.

O número de painéis N_p que devem ser ligados em série é dado pela Eq.(4),

$$N_{\text{painéis}} = \frac{V_p}{V_{\text{painel}}} \quad (4)$$

na qual V_{painel} é a tensão média em cada painel, logo $N_{\text{painéis}}=60V/16V = 3,75$. Adotando-se então o número de painéis igual a quatro.

A potência média que deve ser fornecida pelos painéis fotovoltaicos durante o funcionamento do sistema é obtida através da Eq.(5), na qual P_{PV} é a potência média a ser fornecida pelos painéis fotovoltaicos, η é o rendimento do sistema estimado em 85% e P_{out} é a potência total drenada pela bomba.

Como P_{out} é igual a 175W, que é um valor sobreestimado devido a não idealidades no sistema, a potência média a ser fornecida pelos painéis fotovoltaicos será de 206W e a capacidade de cada painel pode então agora ser determinada pela Eq.(6),

$$P_{pv} = \frac{P_{out}}{\eta} \quad (5) \quad A_{h_{\text{painel}}} = \frac{P_{total} * t_{op}}{V_p} \quad (6)$$

Substituindo-se os valores obtidos na Eq.(6), é encontrado $A_{h_{\text{painel}}}$ de 17,2 Ah o que representa a capacidade do painel em um dia de operação (5 horas). Em Fortaleza, o nível de radiação solar é cinco vezes maior do que o nível normal de radiação (1000 W/m^2) utilizado conforme mostrado na Fig.4. A capacidade média de geração de cada módulo em um dia é dada pela Eq. (7) [Mezaroba, 1998],

$$A_{h_d} = \frac{I_{rs} * R_{med}}{R_s} \quad (7) \quad N_{\text{painéis}} = \frac{A_{h_{\text{painel}}} * V_p}{A_{h_d} * V_{\text{painel}}} \quad (8)$$

na qual: A_{h_d} é a capacidade fornecida pelo módulo fotovoltaico em um dia; R_{med} é a radiação média diária (em Fortaleza: $5.500 \text{ W/m}^2/\text{dia}$); R_s é a radiação solar padrão: 1.000 W/m^2 e I_{rs} é a cor-

rente fornecida pelo módulo para radiação R_s ; o que nos leva a encontrar a relação $Ah_d = 5,5 \cdot I_{rs}$. Pela Eq.(8) pode-se agora encontrar o valor da corrente eficaz que cada painel deverá fornecer, ou seja, $I_{rs} = 2,93$ A.

De acordo com uma tabela fornecida pelo fabricante Siemens, o modelo SM50 cujas curvas são mostradas na Fig.4, satisfaz as exigências do projeto; entretanto será utilizado o modelo SP70 já disponível no laboratório, cujas características são mostradas a seguir: Potência Nominal 70 W; Tensão em Circuito Aberto (V_{oc}) 21,4 V; Corrente de Curto-circuito (I_{sc}) 4,7 A; Tensão Nominal (Típica com Carga) 16,5 V; Corrente Nominal (Típica com Carga) 4,25 A [Pierson, 1978].

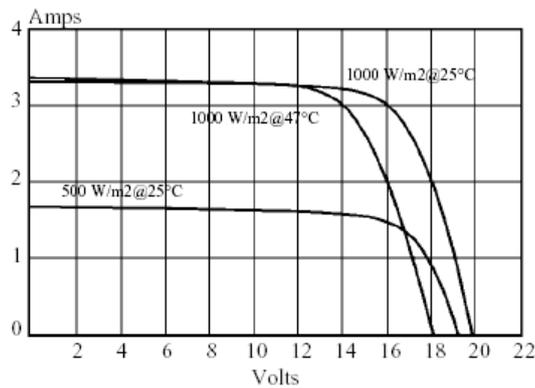


Figura 4 - Características do painel fotovoltaico SM50.

O circuito simplificado do sistema implementado é mostrado na Fig.5. O painel solar é uma composição em série de quatro painéis comerciais da Siemens SP70 e cuja tensão equivalente de saída é de 64 Volts. Esta tensão é aplicada a um conjunto de quatro chaves que controlam a tensão V_{pri} no primário de um transformador, que alimenta a bomba vibratória.

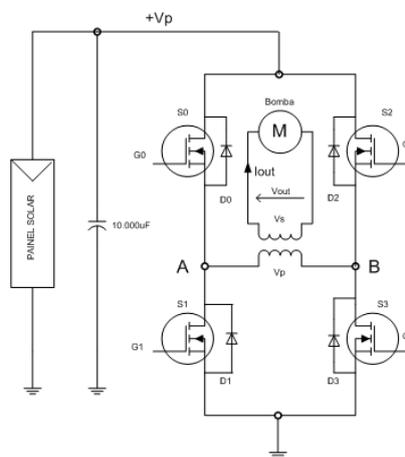


Figura 5 - Circuito simplificado do sistema implementado.

Para o circuito mostrado na Fig.5 e tomando-se como modelo de carga uma bomba vibratória fortemente indutiva e amostrando-se os sinais somente durante um ciclo de operação, conforme mostrado na Fig.6, pode-se determinar, aproximadamente, o valor eficaz da tensão de saída como função do ciclo de trabalho, D , e da tensão de entrada, V_p , dada pela associação de painéis, conforme mostrado na Eq.(9).

$$V_{pri} = \left(\frac{2}{T} \int_0^{DT} V_p^2 dt \right)^{1/2} = V_p \cdot \sqrt{2D} \quad (9)$$

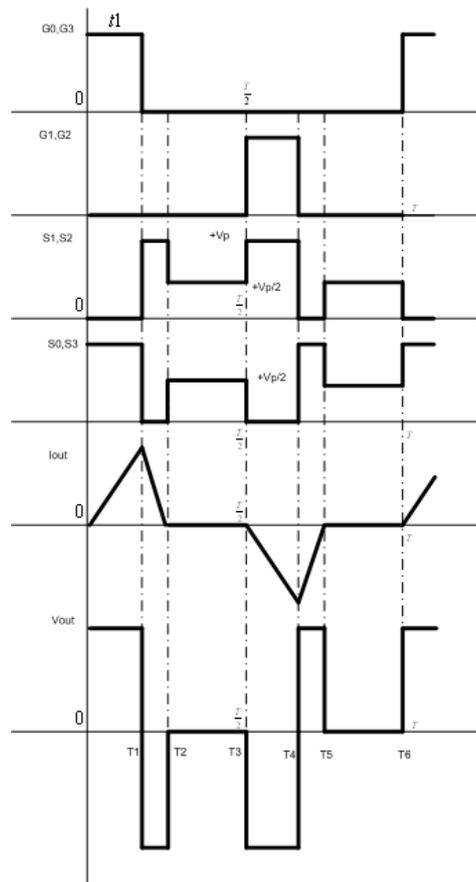


Figura 6 - Formas de ondas idealizadas para o circuito simplificado do sistema implementado

O ciclo de trabalho D é expresso como a razão entre $t1$ e T , ou seja D é obtido através da Eq.(10), na qual, o período T é 16,66ms, pois a frequência da onda fundamental é 60Hz. Substituindo a Eq. (10) na Eq. (9) será obtida a Eq. (11).

$$D = \frac{t1}{T} \quad (10)$$

$$\left(\frac{Vpri}{Vp}\right)^2 = \frac{t1}{T} \quad (11)$$

Como $Vpri$ e T são conhecidos, pode-se agora através da Eq. (11) calcular um valor para $t1$ para um determinado valor de Vp . Caso a tensão Vp varie, um novo valor para $t1$ é determinado de forma a manter a tensão $Vpri$ constante. Para o caso de Vp ser 64Vcc, o valor de $t1$ é de 2,635ms. Observe que este tempo é calculado pela Eq. (11).

O par de transistores $S0/S3$ ou o par $S1/S2$ é acionado simultaneamente. Quando ocorre acionamento do par $S0/S3$ no intervalo de tempo $0 - T1$, a tensão nestas chaves é igual a zero e a corrente começa a crescer positivamente, Fig.7(a). Quando o par $S0/S3$ é desligado em $t = T1$, a continuidade da corrente se dá pela presença da indutância de dispersão do transformador e da bomba, e circula pelos diodos em antiparalelo com o outro par, fazendo com que a tensão terminal da ponte se inverta, como mostrada na Fig.7(b). Note que nesse momento ocorre inversão no sentido da corrente, o que no gráfico corresponde ao intervalo de tempo $T1-T2$, como mostrado na Fig. 6. No intervalo de tempo $T2-T3$ as quatro chaves estão desligadas e a tensão resultante em cima de cada chave é igual à $Vp/2$ e nenhuma corrente circula pela carga, como mostrado na Fig.8. No instante $T3+$, o par $S1/S2$ é acionado simultaneamente e a corrente volta a crescer, só que agora no sentido inverso, simétrico ao primeiro meio ciclo, como mostrado na Fig.9(a) e Fig.9(b). O retorno de energia para a fonte se dá pela absorção da energia acumulada na indutância equivalente da carga.

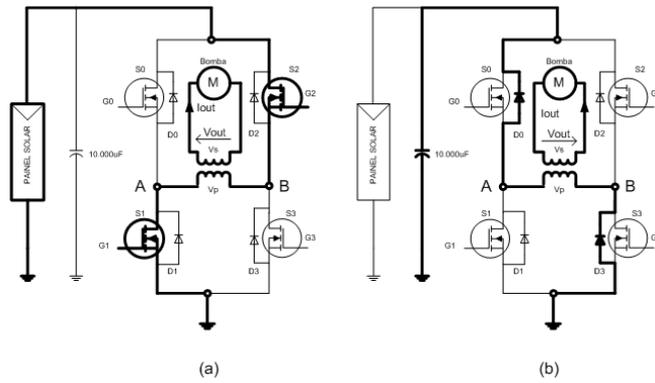


Figura 7 - Etapas de operação dos intervalos: (a) 0-T1 e (b) T1-T2.

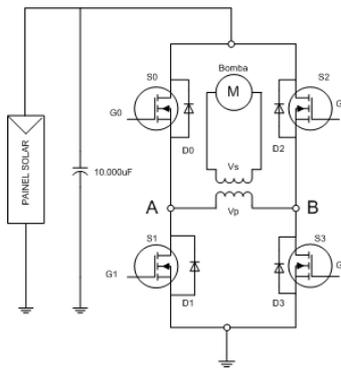


Figura 8 - Etapa de operação do intervalo T2 – T3.

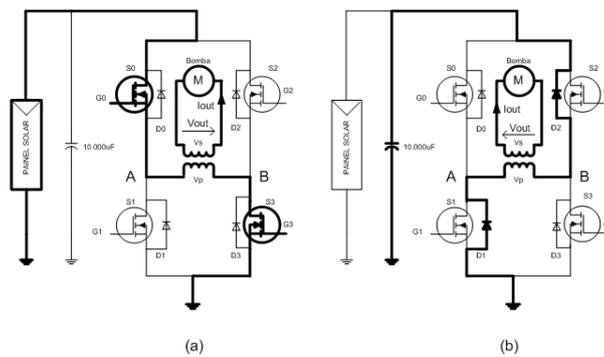


Figura 9 - Etapas de operação dos intervalos: (a) T3 – T4 e (b) T4 – T5.

As formas de ondas completas e idealizadas já foram mostradas na Fig.6 e na prática, os diodos em antiparalelo são intrínsecos dos próprios MOSFETs.

3. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E EXPERIMENTAIS

As formas de ondas simuladas obtidas com o modelo do sistema proposto, na Fig.3 sem os filtros reativos, são mostradas na Fig.10 e com os filtros reativos em conjunto com o capacitor de correção do fator de potência, na Fig.11. Os ensaios foram realizados com uma tensão de entrada dos painéis de 64 V e com t1 igual a 3 ms.

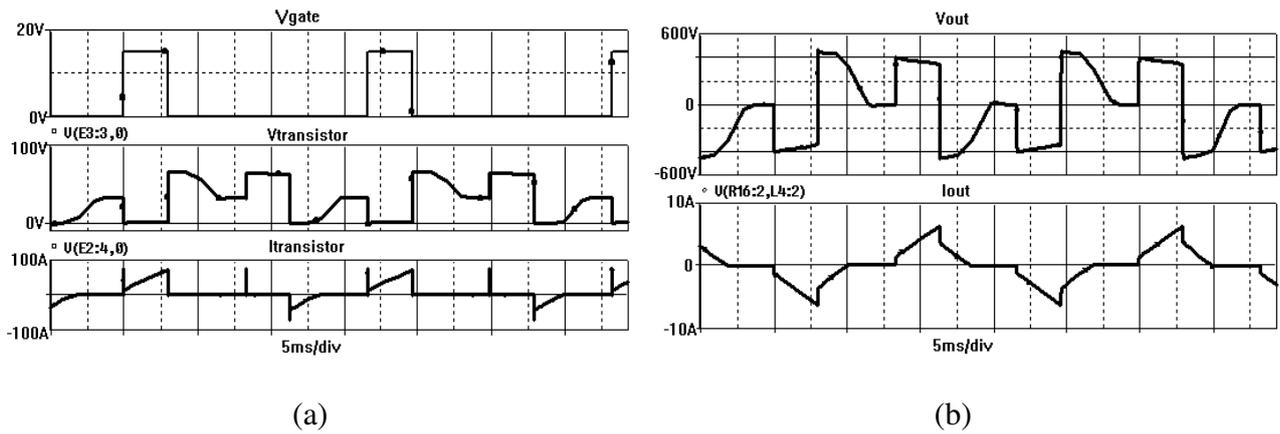


Figura 10 - Formas de ondas por simulação - sem filtros: (a) tensões no *gate*, no transistor, e corrente no transistor; (b) tensão e corrente no secundário do transformador.

As formas de ondas obtidas com o protótipo são mostradas na Fig.12. Observando a Fig.11 e Fig.12, os resultados das simulações e experimentais são semelhantes; pequenas diferenças são observadas nas formas de onda da corrente de saída devida as não idealidades do transformador.

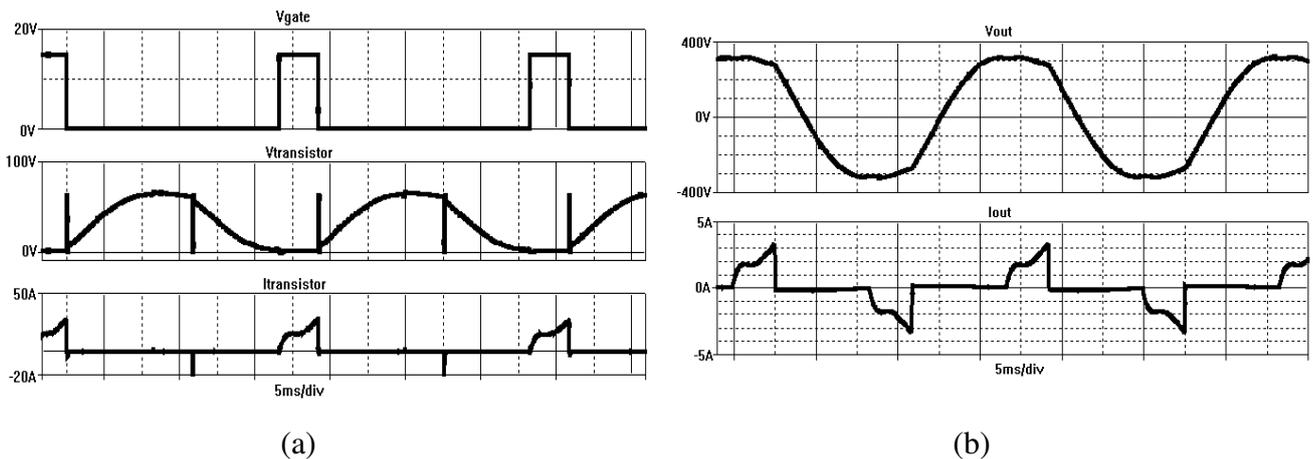


Figura 11 - Formas de ondas por simulação - com filtros: (a) tensões no *gate*, no transistor, e corrente no transistor; (b) tensão e corrente no secundário do transformador.

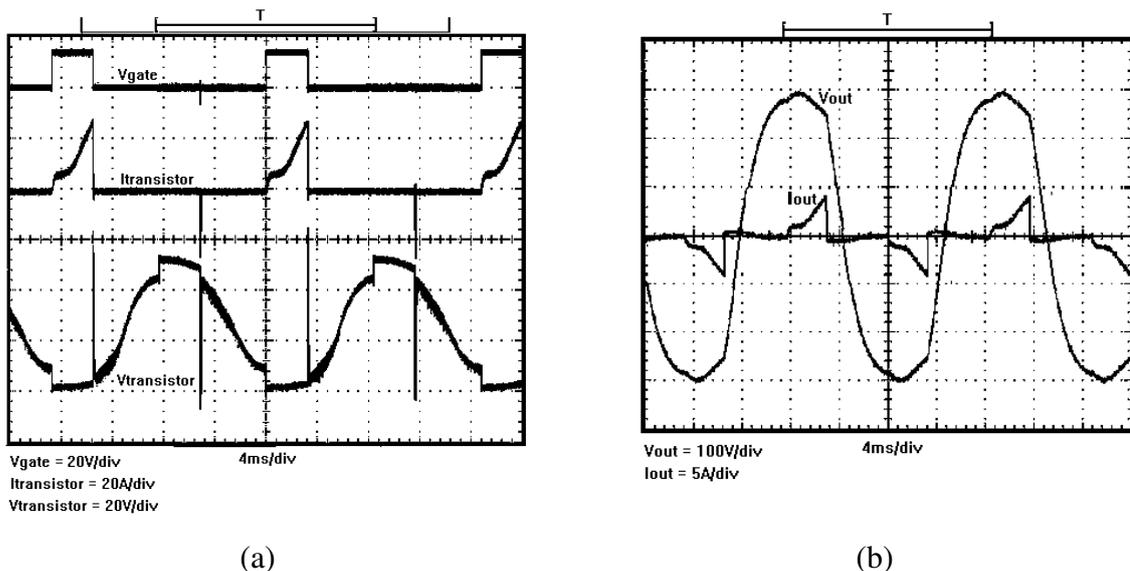


Figura 12 - Formas de ondas experimentais: (a) sinal de *gate*, corrente e tensão no transistor; (b) tensão e corrente no secundário do transformador.

Com relação ao protótipo, o firmware foi escrito na linguagem C e o circuito de controle foi implementado com um microcontrolador PIC16F877 que responde as variações da tensão do painel solar e corrige automaticamente a largura dos pulsos para manter a tensão nos terminais da bomba em aproximadamente 220 Vrms, bem como executa outras funções de controle do sistema.

Os transistores escolhidos para a montagem do protótipo foram os MOSFETs IRF-3710, cujas características satisfazem plenamente as exigências do sistema. Para o acionamento dos MOSFETs foi utilizado o driver IR2110, desta maneira, acoplando diretamente o microcontrolador com os transistores.

O protótipo foi ensaiado em laboratório sob condições simuladas para se levantar dados de rendimento do sistema. Aplicou-se uma tensão CC na entrada e mediu-se a tensão de saída, a corrente de entrada, as potências de entrada e de saída, conforme resultados mostrados no gráfico da Fig.13.

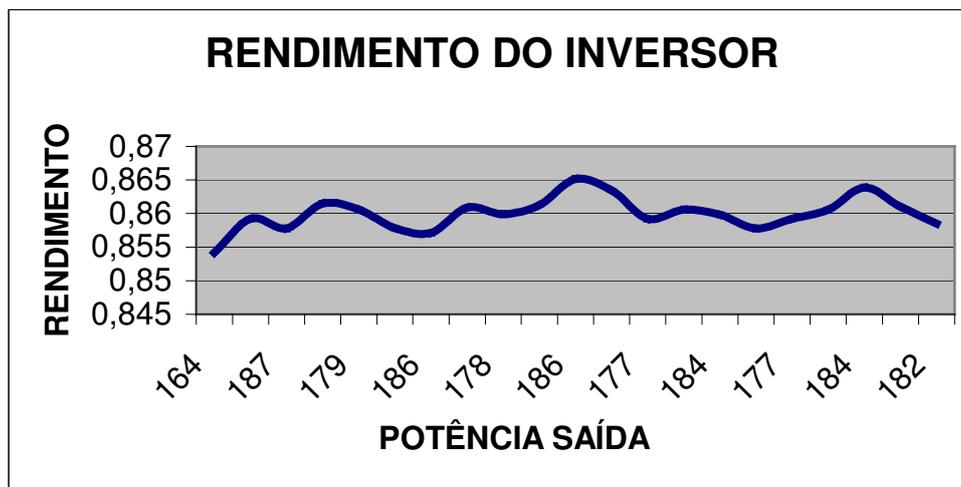


Figura 13 - Rendimento do sistema vs. potência de saída.

4. CONCLUSÕES

Foi apresentada neste trabalho uma proposta para o bombeamento de água a partir de uma fonte de energia fotovoltaica. Como o projeto foi direcionado para utilização em propriedades rurais ou desprovida da rede convencional, uma bomba vibratória submersa foi escolhida devido a sua simplicidade, fácil aquisição, baixo custo, robustez e principalmente e pouca manutenção.

Outro fator positivo em utilizar a bomba vibratória foi o seu modelo elétrico equivalente; o modelo se mostrou muito simples, facilitando desta forma o projeto do conversor. Devido ao baixo fator de potência da bomba, foi ligado um capacitor em paralelo com a bomba de forma a corrigir o fator de potência (FP corrigido $\approx 0,9$), valor observado no secundário do transformador.

Foi proposta a utilização de um inversor Full-Bridge para efetuar o acionamento da bomba. Este conversor mostrou-se extremamente bem adaptado a esta carga, fornecendo tensão quase senoidal simplesmente adicionando pequenos reativos e aproveitando as não idealidades do transformador (indutância de dispersão), numa frequência de 60 Hz e com baixa distorção harmônica. A operação do conversor é em baixa frequência, além de não produzir EMI, permite a utilização de tecnologia simples e barata, principalmente nos circuitos de controle e *drivers*.

Na análise prática do conversor observaram-se pequenas diferenças nas formas de ondas simuladas e reais obtidas do protótipo causadas principalmente pela indutância de dispersão do transformador. A partida e o desligamento do sistema são simples e eficientes, necessitando-se apenas que o nível de radiação solar esteja sob condições normais, o que torna o sistema ainda mais robusto e confiável.

O rendimento do sistema conforme mostrado na Fig.13 pode ser considerado satisfatório já que o inversor opera em baixa frequência e os elementos magnéticos possuem núcleo de ferro-silício laminado de boa qualidade.

Por ser o sistema alimentado simplesmente pelos painéis fotovoltaicos, caracterizou um outro ponto positivo, principalmente quando se desejou eliminar as baterias devido a sua vida útil muito curta e a constante necessidade de manutenção.

Como desvantagens do sistema podem-se citar o elevado custo dos painéis fotovoltaicos e o baixo rendimento da bomba para potências muito inferiores à nominal, onde grande parte da energia acaba se dissipando sem que ocorra bombeamento de água.

Como utiliza tecnologia simples, robusta e barata, este conversor mostra-se muito atraente para esta aplicação, principalmente em localidades afastadas e com pouca mão de obra especializada.

Um protótipo de laboratório foi implementado e testado com todos os circuitos complementares obtendo-se resultados muito satisfatórios que comprovam os estudos teóricos desenvolvidos.

5. AGRADECIMENTOS

Um especial agradecimento ao diretor da empresa FAZAGUA, Paduri de Borba, que muito gentilmente nos cedeu as bombas submersas para realização deste projeto.

Ao Eng. Samuel Vasconcelos Araújo pela ajuda na montagem dos painéis solares e pelas inúmeras colaborações nos ensaios realizados com o protótipo.

Ao meu filho Luis Rodolfo Rebouças Coutinho, aluno da graduação em Engenharia Elétrica da UFC, pela grande ajuda na implementação do software de controle.

Ao Prof. Cláudio Sá do CEFET-CE pela sua colaboração nos ensaios realizados com a bomba vibratória.

6. REFERÊNCIAS

- Bolton, W - Análise de Circuitos Elétricos. MAKRON Books, p. 89-93, 1994.
- Chiguru, T, Naum, F, Barbosa, E – Instalação de Sistemas Fotovoltaicos para Residências Rurais e Bombeamento de Água. Ed. Universitária da UFPE, 1999.
- Mezaroba, Marcelo. Sistema de bombeamento de água com energia obtida de painéis fotovoltaicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – INEP, UFSC, Florianópolis, 1998.
- Pierson, Richard E.; “Thecnician’s and Experimenters Guide to Using Sun, Wind and Water Power”, Parker Publishing Company, 1978, p. 86-96.

A PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR WATER PUMPING

Abstract – This paper has the goal to show the development of a photovoltaic system to pump water in rural areas. The system is of easy construction, low cost and built with materials found in the Brazilian market. It is composed basically, of photovoltaic panels, a cc/ca converter in bridge configuration, a low frequency transformer functioning as voltage elevator and a submerged vibratory pump. The control is implemented with a simple microcontroller. To justify the prototype operation, experimental results are shown.

Keywords: *Microcontroller, Photovoltaic System, Voltage Inverter.*