

# SOLUÇÃO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA EM PROPRIEDADES RURAIS UTILIZANDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

**Julio César Trevisan Dal Bem** – dalbem.ufsc@gmail.com

**Ivo Barbi** – ivobarbi@gmail.com

**Julio Elias Normey-Rico** – jnormeyrico@gmail.com

**Ricardo Ruther** – ricardo.ruther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Universitário Trindade, Caixa Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900

**Resumo.** Apesar do elevado grau de desenvolvimento tecnológico que o Brasil tem experimentado, algumas regiões ainda padecem da falta de soluções simples do ponto de vista tecnológico e baratas que facilitem o dia a dia do produtor rural, responsável pelo setor primário da economia brasileira, transpondo as barreiras naturalmente impostas à categoria. Acentuadas distâncias dos grandes centros urbanos e vias pouco trafegáveis, somado ao fato de se situarem em áreas com baixíssima densidade populacional, são fatores que dificultam o acesso à rede elétrica de distribuição da concessionária de energia. A expoente, porém não recente, tecnologia de geração de energia elétrica a partir do sol, fonte limpa e inesgotável, que se dissemina rapidamente por grandes centros, ainda pelega para chegar ao homem do campo. Este trabalho apresenta uma solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica com acoplamento direto ao módulo, acionando uma bomba vibratória submersa com o emprego de um inversor ressonante paralelo, desenvolvido no escopo deste trabalho, e que apresenta elevado rendimento e robustez.

**Palavras-chave:** Bombeamento de água, Inversor solar, Energia solar

## 1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento da demanda por energia, a preocupação quanto às emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e as restrições ambientais impostas à geração de energia elétrica, são fatores que fomentam a busca por novas fontes de energia. A energia solar fotovoltaica é uma fonte limpa e inesgotável e que tem se expandido rapidamente no espaço urbano. A passos mais lentos, ela também tem crescido em áreas isoladas do sistema elétrico. As concessionárias de distribuição de energia elétrica têm por obrigação atender a todos moradores da sua área de concessão, sejam eles moradores de centros urbanos ou de zonas rurais distantes.

As maiores dificuldades e custos para levar energia elétrica estão justamente nas áreas rurais, onde comunidades de baixa densidade populacional muitas vezes se encontram em locais de difícil acesso e longe das linhas de transmissão. Muitas vezes estas comunidades podem estar também próximas a áreas de proteção ambiental, o que torna o processo de eletrificação ainda mais complexo. No Brasil, há 12 anos o governo tenta universalizar o acesso à energia elétrica por meio do programa Luz para Todos, instituído pelo decreto 4.873/2003. Entretanto, cerca de 190 mil famílias brasileiras ainda vivem sem energia, a maior parte na zona rural (Diniz, 2015).

Ademais, a deficitária distribuição das redes de transmissão de energia pelo território brasileiro compromete o fornecimento de energia elétrica principalmente para a população rural, alvo deste trabalho, fortemente associada às atividades produtivas primárias da economia brasileira. Há, também, questões técnicas e econômicas que inviabilizam a homogeneidade da distribuição das redes de transmissão até mesmo dentro da propriedade rural, ainda que seja atendida pela concessionária de energia, uma vez que as áreas envolvidas em tais propriedades são tipicamente extensas. Também, em face do aumento de mais de 51% nas tarifas de energia elétrica desde janeiro de 2015 e com perspectivas de novos aumentos para 2016 (Martello, 2015), a energia solar fotovoltaica, cujos custos têm experimentado um declínio acentuado nos últimos cinco anos, tem se mostrado cada vez mais atrativa. Assim, este trabalho apresenta uma solução para bombeamento de água em propriedades rurais utilizando energia solar fotovoltaica.

## 2. ENERGIA ELÉTRICA NO CAMPO

Dada a natureza jurídica do consumidor rural, enquadrado no grupo B de consumidores e subgrupo B2, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - que define as regras tarifárias para cada grupo e as exigências técnicas necessárias para cada tipo de instalação - é ônus do responsável legal pela propriedade rural toda a instalação elétrica que se encontra dentro do perímetro de sua propriedade, devendo a concessionária de energia aprovar ou não a instalação e, caso seja aprovada, conectar à rede de distribuição.

## 2.1 Bombeamento de água

É inegável a fundamental importância da água em uma propriedade rural, indispensável a qualquer atividade econômica que ali se desenvolve. Também, é notório que, assim como a energia, a água precisa ser canalizada e conduzida às variadas áreas de interesse na propriedade e tal atividade depende de energia, seja elétrica ou potencial gravitacional, ou outra menos representativa em número de ocorrências. Diante disso, é evidente que há um grave problema no aproveitamento de área produtiva, afetando o setor primário da economia brasileira, pela dificuldade em se levar água por toda propriedade rural, seja para irrigação e/ou manutenção de animais. Por falta de opções adequadas, o produtor rural é obrigado a investir em soluções excessivamente onerosas para solucionar demandas básicas de bombeamento de água. Tais custos acabam repassados ao setor secundário de produção, que repassa ao consumidor final.

É fato então que o problema de bombeamento de água do produtor rural é, também, um problema do consumidor final, que acaba arcando com os custos decorrentes da ineficiência das soluções disponíveis para tal fim em casos onde não há, seja por inviabilidade técnica ou econômica, uma rede elétrica distribuída que passa por todos os pontos aptos à coleta de água presentes na propriedade rural. É bastante comum o aproveitamento da energia potencial gravitacional decorrente de desnível do local de coleta de água, normalmente um rio ou uma represa, com relação ao relevo que o circunda. O desnível pode ser aproveitado para movimentar uma bomba d'água de roda, que se utiliza da vazão de água que escoar da parte mais alta (local de coleta) para a parte mais baixa (vazante). Todavia, em se tratando de um sistema essencialmente mecânico, composto por muitas partes móveis, está mais sujeito a falhas que um sistema eletromecânico, já que partes móveis sofrem desgastes e se criam folgas que aceleram a degradação do equipamento.

Há, também, o caso do produtor rural para quem a única fonte de captação de água encontra-se em um vale, impossibilitando o uso de um sistema de bombeamento baseado em roda d'água. Neste caso, a única opção é a captação por meio de bomba elétrica, que depende substancialmente da presença de rede elétrica de distribuição, incorrendo nos problemas relativos a custos. Caso o produtor rural não consiga bombear água por toda a propriedade, suas atividades produtivas ficam limitadas às proximidades da fonte de captação de água e o restante da área se torna improdutivo. Essa é uma situação bastante recorrente, principalmente nas mesorregiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste.

## 2.2 Potencial solar no Brasil

Em sintonia com o exponencial crescimento na penetração da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, apresenta-se um sistema de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica, isolado da rede elétrica de distribuição e não afetado por questões intrínsecas ao relevo local. No Brasil, a menor irradiação global inclinada média é de 4,25 kWh/m<sup>2</sup>.dia e a maior é de 6,25 kWh/m<sup>2</sup>.dia, conforme ilustra a Fig. 1. Em virtude disso, a irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro varia de 1.550 a 2.280 kWh/m<sup>2</sup>.ano, superior às verificadas em outros países que hoje são expoentes do uso da energia solar: 900 a 1.250 kWh/m<sup>2</sup>.ano na Alemanha; 900 a 1.650 kWh/m<sup>2</sup>.ano na França; e 1.200 a 1.850 kWh/m<sup>2</sup>.ano na Espanha (Pereira et al, 2006).

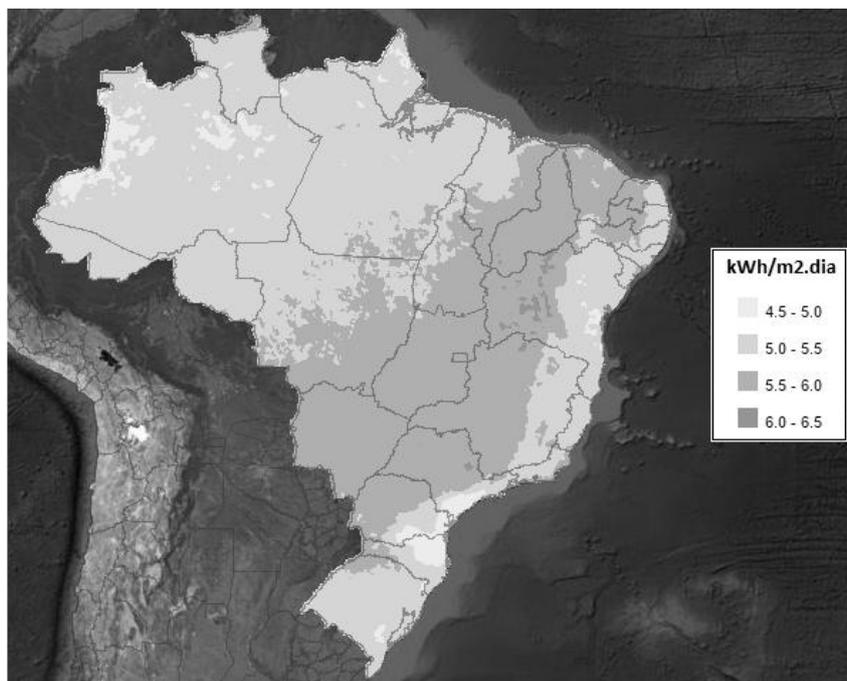


Figura 1 – Mapa de irradiação solar do Brasil.

### 2.3 Bombeamento com acoplamento direto

Em uma aplicação em que se faz necessário o bombeamento de água, é preciso se levantar os requisitos inerentes à aplicação, como o volume médio diário necessário e o somatório das distâncias na horizontal e na vertical entre o local de coleta e o local de armazenamento da água, para se especificar o tipo de bomba utilizada e a potência elétrica necessária para realizar tal trabalho e compatibilizar tais especificações com algum modelo disponível comercialmente. Em aplicações rurais de bombeamento de água, tipicamente as distâncias envolvidas são superiores a 100 metros e, por consequência, a pressão manométrica necessária é elevada. A bomba vibratória submersa, ilustrada na Fig. 2, apresenta algumas vantagens que a classificam como uma boa opção para este projeto. Exemplo disso, apresenta elevada pressão manométrica, elevada robustez por possuir poucas partes móveis, baixo custo de fabricação e não necessita de manutenção. Por esses motivos, é muito comum de se encontrar ao menos uma bomba vibratória submersa para captação de água em poço ou cisterna em propriedades que têm acesso à rede elétrica.



Figura 2 – Bombas submersas vibratórias.

Com a escolha da bomba, levantam-se as características elétricas do equipamento a fim de se compatibilizar tais parâmetros com os parâmetros elétricos do gerador solar. A primeira e mais importante característica a se considerar é a natureza da corrente elétrica gerada e a necessária para a operação da bomba. Na geração, o módulo fotovoltaico entrega energia na forma de corrente contínua, com característica de fonte de corrente, uma vez que a corrente que circula pelo módulo é aproximadamente constante para quase toda sua faixa de tensão, considerando-se uma irradiância constante. Já a bomba, opera com corrente alternada, tipicamente 60 Hz, impossibilitando a conexão direta da bomba ao módulo fotovoltaico.

É indispensável ao funcionamento desta solução a presença de um inversor de corrente ou tensão, acoplado-se o módulo fotovoltaico à bomba vibratória submersa. Contudo, dado o aspecto construtivo da bomba, que é basicamente um grande indutor de núcleo semiaberto, tal componente confere ao equipamento uma característica altamente indutiva, da ordem de centenas de miliHenry. Essa componente indutiva provoca um atraso da senoide de corrente com relação à senoide tensão, conforme pode ser verificado na Fig. 3, reduzindo o fator de potência do equipamento a valores próximos a 0,21. Isso implica que a componente de potência reativa da bomba é 3/4 da potência aparente, enquanto que a componente de potência ativa, que efetivamente realiza trabalho, é de 1/3 da potência aparente. Assim, o inversor precisaria ser dimensionado para uma potência 4 vezes maior que a potência ativa da bomba, elevando substancialmente o custo da solução.

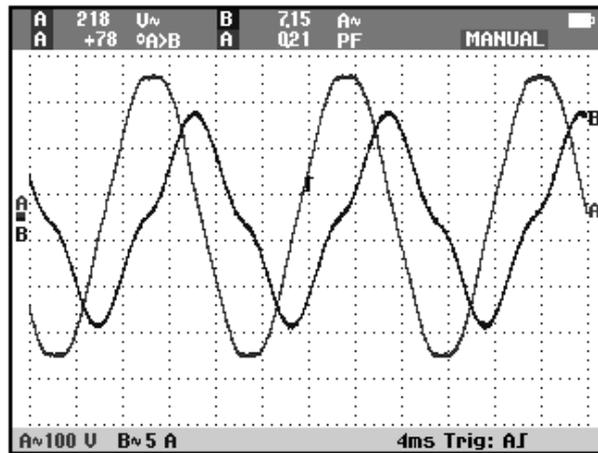


Figura 3 – Senoide de corrente atrasada em 78° com relação à senoide de tensão.

## 2.4 Inversor ressonante paralelo

Uma forma de se solucionar o problema do baixo fator de potência da bomba escolhida para a aplicação, é acoplado-se um capacitor em paralelo aos terminais da bomba, uma vez que o capacitor, quando submetido à corrente alternada, apresenta a característica de atrasar a senoide de tensão com relação à corrente. Tal capacitor deve ser dimensionado para atrasar a senoide de tensão na mesma medida que a bomba atrasa a senoide de corrente, com isso, colocando as componentes de corrente e tensão em fase e, portanto, elevando o fator de potência idealmente para 1 e conferindo à carga característica plenamente resistiva. Assim, a potência do inversor deve ser igual à potência ativa da bomba, viabilizando a solução proposta.

Contudo, a maior parte dos inversores de corrente ou tensão comercialmente disponíveis, geram a corrente alternada na saída partindo de uma técnica de modulação por largura de pulso (PWM) variável, também conhecida como *Sine PWM* ou SPWM, variando-se a largura do pulso de acordo com uma função geradora de senos, conforme ilustra a Fig. 4. Essa modulação é chamada de portadora e é gerada em alta frequência (superior à frequência audível). Após passar por um filtro passa-baixas, a portadora é removida e tem-se apenas o contorno da frequência fundamental, que é de 60 Hz. Sabendo disso, caso seja associado um capacitor extra (para correção do fator de potência da bomba) aos terminais de saída do inversor, a constante de tempo do filtro passa-baixas da saída do inversor é alterada e a frequência de corte passa a ser muito mais baixa que a necessária para remover apenas a portadora. Assim, componentes de elevada energia são filtradas (e dissipadas) por esse capacitor, reduzindo a eficiência do conjunto.

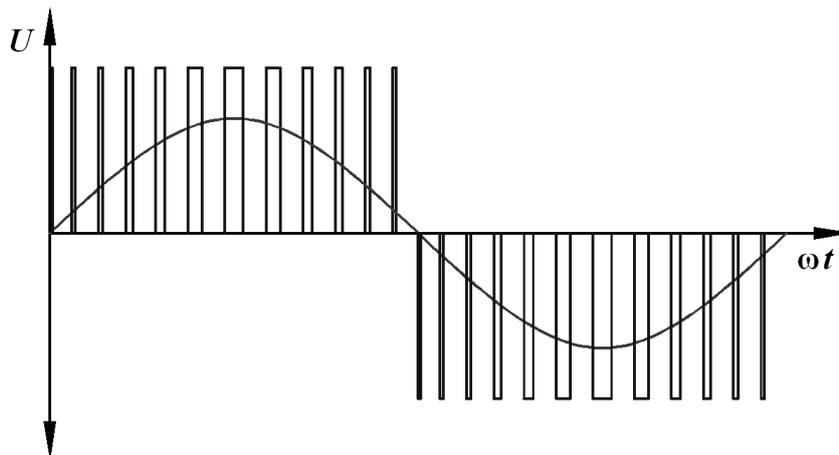


Figura 4 – Exemplo de uma portadora SPWM e a frequência fundamental.

Para que o capacitor na saída do inversor não seja um problema, filtrando componentes de elevada energia, uma forma de viabilizar a solução de bombeamento proposta é implementando um inversor em que a frequência de operação seja exatamente igual à frequência de ressonância do acoplamento LC (bomba-capacitor), que é o ponto onde a impedância é máxima e, portanto, a corrente consumida é mínima, conforme ilustra a Fig. 5. A topologia de projeto adotada a esse inversor é tipicamente conhecida como inversor ressonante paralelo e o diagrama elétrico básico é ilustrado na Fig. 6.

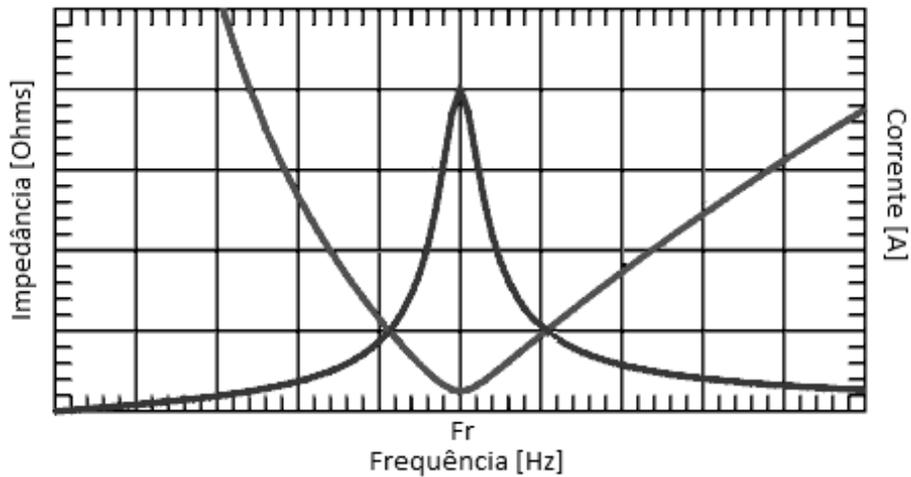


Figura 5 – Curva típica da impedância (máxima) e corrente (mínima) em função da frequência.

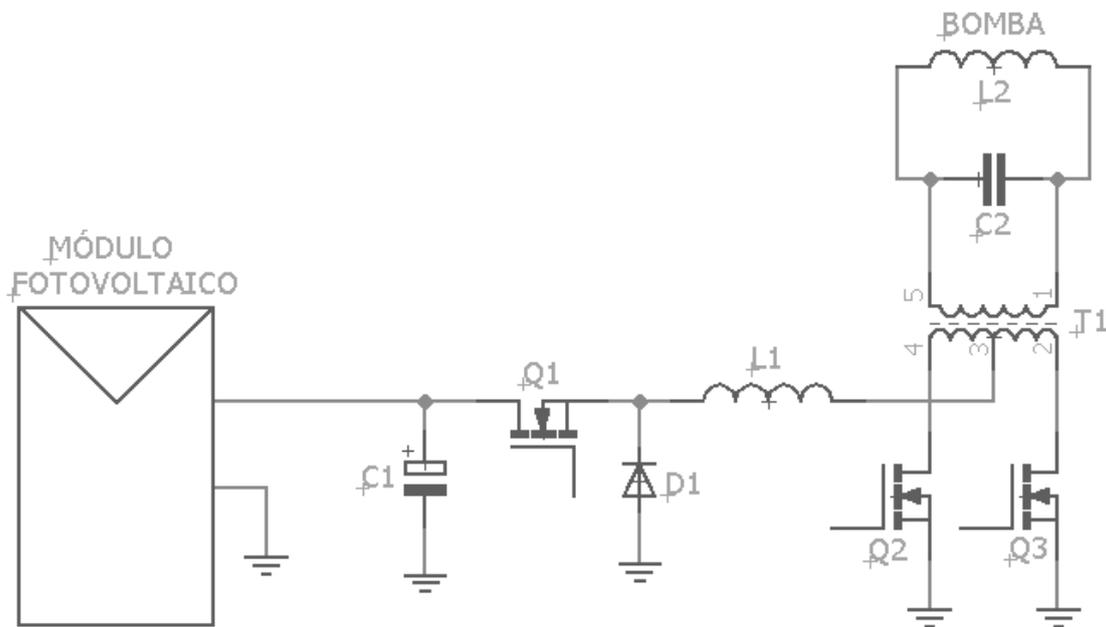


Figura 6 – Circuito básico do inversor proposto.

## 2.5 Rastreamento do ponto de máxima potência

O módulo fotovoltaico é modelado como uma fonte de corrente, com impedância de saída que depende diretamente da irradiância, sendo, portanto, variável. Como a bomba possui uma impedância de entrada aproximadamente constante, o inversor proposto necessita de um circuito intermediário com a finalidade de regular a tensão aplicada à bomba de acordo com a geração solar, mantendo o módulo fotovoltaico sempre na região de máxima potência. Este circuito é denominado de rastreador do ponto de máxima potência, ou MPPT, e é implementado por meio de um conversor *Buck*. O rastreador do ponto de máxima potência é regido pelo fluxograma da Fig. 7, com um algoritmo perturba e observa.

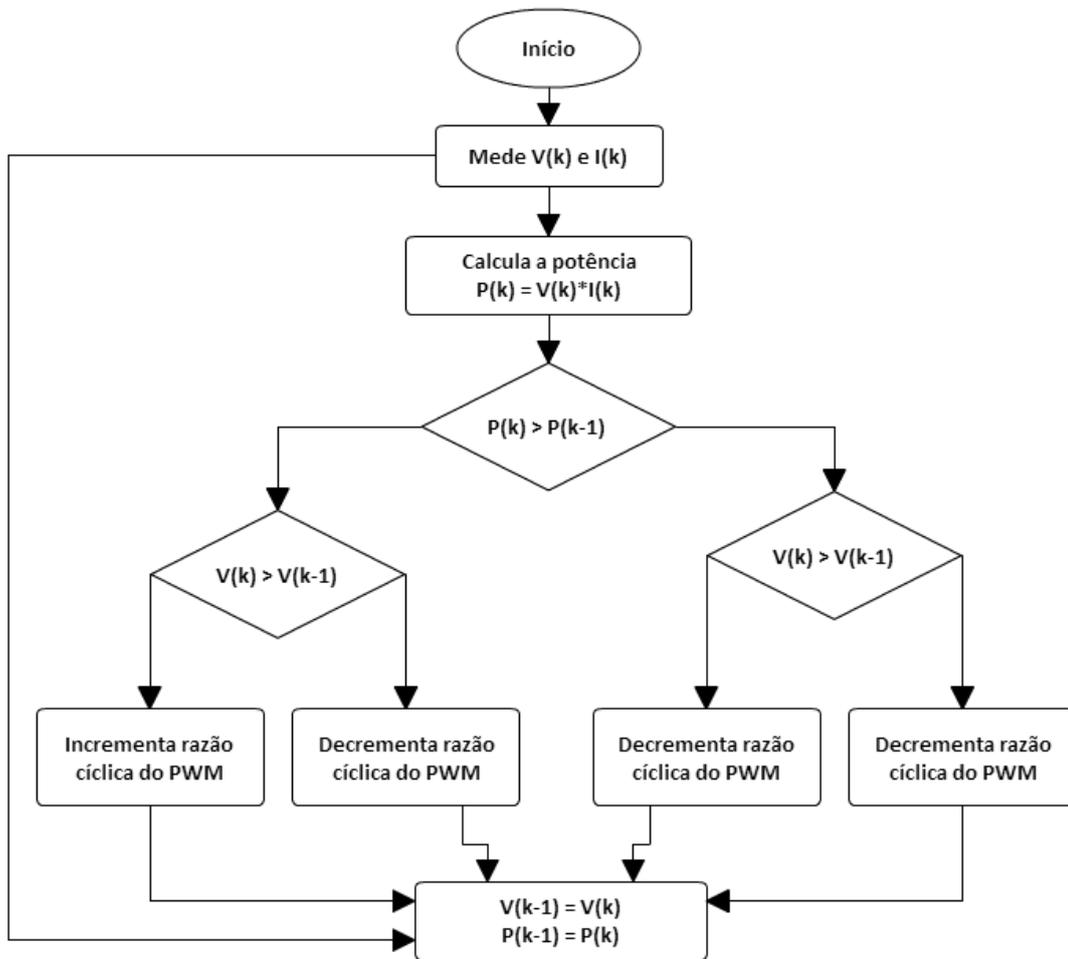


Figura 7 – Algoritmo do rastreador do ponto de máxima potência implementado.

## 2.6 Implementação prática e resultados

Foram construídos quatro protótipos e todos colocados para operar em uma propriedade rural localizada em Alta Floresta – MT, onde se desenvolve atividade de pecuária de corte e o bombeamento de água se faz necessário para atender ao consumo dos animais. Cada protótipo é capaz de atender ao consumo diário de água de cerca de 150 animais. Em um dos protótipos, foram instalados dispositivos de medição de tensão, corrente e potência de entrada, potência de saída, irradiância e volume de água. A Fig. 8 ilustra o protótipo em pleno funcionamento e a Fig. 9 apresenta o local de instalação.



Figura 8 – Sistema de bombeamento em pleno funcionamento.



Figura 9 – Local de instalação de um dos sistemas de bombeamento em avaliação.

O sistema de bombeamento de água utilizando energia solar fotovoltaica avaliado no escopo deste trabalho é composto por uma bomba de 380 W que opera em 220 V, dois módulos policristalinos de 255 Wp cada conectados em paralelo e o inversor desenvolvido no âmbito deste trabalho. A água é bombeada a um reservatório localizado a 400 metros de distância do local de captação, somando-se a uma altura manométrica de 10 metros, totalizando uma pressão manométrica total de 42 metros de coluna d'água, ou cerca de 411 kPa. O sistema foi monitorado durante um dia inteiro de operação, adquirindo-se dados de irradiância a cada um minuto, conforme ilustra a Fig. 10, dados de energia em corrente contínua e energia em corrente alternada integrados ao longo do dia e informação de volume de água bombeado ao longo do dia analisado.

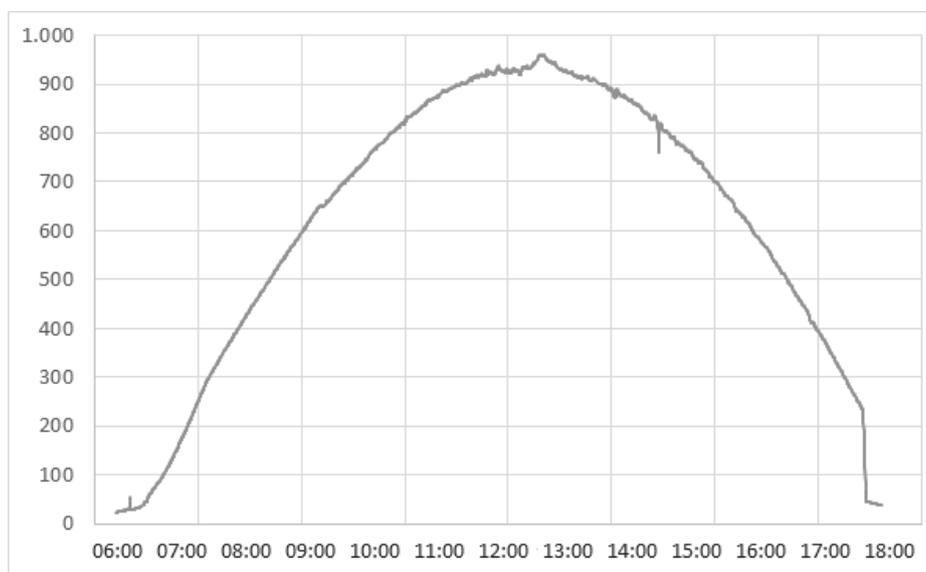


Figura 10 – Curva de irradiância obtida ao longo do dia analisado.

A irradiância ao longo do dia analisado foi de 5,34 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto que a energia em corrente contínua entregue ao inversor foi de 2,32 kWh e a energia efetivamente entregue à bomba foi de 2 kWh, resultando em um rendimento de 86%. O volume de água bombeado foi de 3.500 litros, suficiente para a manutenção de 150 bovinos. Foram analisados dados de energia em corrente contínua e de energia em corrente alternada, assim como o volume de água bombeado ao longo dos meses de junho a novembro de 2015 e houve um aumento de 8% na geração de energia, em função da aproximação do solstício de verão. Já o volume médio diário bombeado aumentou para 3770 litros. As maiores perdas de energia do inversor estão concentradas no circuito grameador passivo, que tem por finalidade a proteção dos interruptores (MOSFETs) contra picos de tensão reversa, conforme ilustra a Fig. 11, onde se podem notar os resistores do grameador dissipando calor, enquanto que o restante do circuito permanece frio.



Figura 11 – Termografia do circuito do inversor em pleno funcionamento.

Em trabalhos futuros, pode-se implementar um circuito grameador ativo regenerativo, que devolva à entrada do inversor a energia ceifada dos picos de tensão reversa que ocorrem nos interruptores em função do chaveamento de uma carga indutiva. Outra melhoria proposta para futuros trabalhos trata de um algoritmo otimizado para encontrar a frequência de ressonância ideal, ponto de mínimo do gráfico ilustrado na Fig. 5, já que a indutância da bomba sofre alteração em função de diferentes carregamentos.

### 3. CONCLUSÃO

Com base nos dados apresentados ao longo do projeto, podemos concluir que o trabalho realizado tem grande utilidade para comunidades ainda não assistidas pela rede elétrica de distribuição, apesar de tentativas do Governo Federal de levar energia elétrica para todas as famílias que residem em território brasileiro, com o programa Luz para Todos. O rendimento médio do inversor é de 86% e o volume de água bombeado é de 3.500 litros por dia, suficiente para a manutenção de 150 bovinos. Para a realização deste projeto, foram investidos R\$ 27.950,00 e o custo para fabricação de cada unidade de bombeamento é de R\$ 900,00 reais, incluindo a bomba.

### REFERÊNCIAS

- Diniz, M., 2015. No Ano Internacional da Luz, 1,5 bilhão de pessoas vivem no escuro pelo mundo. Agência Brasil, Brasília, 28 de junho de 2015. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2015-06/no-ano-internacional-da-luz-15-bilhao-de-pessoas-vivem-no-escuro>>. Acesso em: 11 de novembro de 2015.
- Martello, A., 2015. BC vê alta de 51,7% na energia em 2015 e de 15% na gasolina. G1, Brasília, 29 de outubro de 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2015/10/bc-ve-alta-de-517-na-energia-em-2015-e-de-15-na-gasolina.html>>. Acesso em: 11 de novembro de 2015.
- Pereira, E., Martins, F., Abreu, S., Ruther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos (SP): SWERA/INPE [Solar and Wind Energy Resources Assessment/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais], 2006. Disponível em: <[http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas\\_solar-reduced.pdf](http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf)>. Acesso em: 11 de novembro de 2015.

### PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY SOLUTION FOR WATER PUMPING

**Abstract.** Despite the high degree of technological development that has been experienced in Brazil, some regions still suffer from lack of simple solutions from a technological point of view and low price, to facilitate the daily lives of farmers, responsible for the primary industry of the Brazilian economy, crossing the barriers imposed on the category, such as the distances from the large urban centers and some passable roads, added to the fact that they are located in areas with very low population density. The same applies to the exponent, but not new, photovoltaic technology, an inexhaustible source, which is spreading up rapidly in big cities, but still struggles to reach rural areas. This work presents a solution for pumping water on farms using solar PV directly coupled to the module, driving a vibratory pump with the use of a parallel resonant converter developed within the scope of this work and which presents high yield and robustness.

**Key words:** Water pumping, Solar Inverter, Solar energy