

# SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO COM O USO DO SOFTWARE TRNSYS<sup>®</sup>

**Ivan M. Corgozinho** – ivanmage-la@yahoo.com.br  
**Othon Lucas Procópio** – othon.procopio@gmail.com  
**Marcos Vinícius Eloy Xavier** – mveloy@gmail.com  
IMAX Energia LTDA

**Luís Guilherme Monteiro Oliveira** – luis.monteiro@pucminas.br  
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Energia

**Wilson Negrão Macêdo** – wnmacedo@ufpa.br  
Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Tecnologia

**Resumo.** Os sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água são uma solução para o abastecimento de água para consumo humano, agricultura e pecuária em localidades isoladas ou em locais cujo fornecimento de energia elétrica não é confiável. Este tipo de sistema, historicamente, vem sendo amplamente utilizado no país principalmente através de programas do governo federal e projetos de pesquisas. Nesse trabalho, foram realizadas diversas simulações, através do software TRNSYS<sup>®</sup>, e análises dos resultados gerados para um sistema fotovoltaico de bombeamento de água (SFB), com conversor de frequência, para uma irrigação de uma plantação de banana na cidade de Conselheiro Lafaiete – MG, região sudeste do Brasil, com demanda de 210 m<sup>3</sup> de água por dia. Os resultados alcançados pelas simulações demonstraram a adequação sistema FV proposto para o bombeamento de água com déficits de abastecimento inferiores a 5% para uma potência do gerador fotovoltaico igual a 159% da potência de alimentação da motobomba operando com potência de saída igual à potência nominal.

**Palavras-chave:** Água, Sistema Fotovoltaico para Bombeamento, Simulação Computacional.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar pode ser utilizada de diversas formas, sendo que as duas formas de uso mais comuns são a de sistemas térmicos utilizados para a produção de calor e sistemas fotovoltaicos utilizados para produção de energia elétrica. O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmundo Becquerel em 1839, e as primeiras aplicações desse efeito datam de 1950 (Fedrizzi, 2002). A geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico pode ocorrer pontualmente, sendo denominada geração distribuída ou em grandes centros de geração de onde a energia elétrica gerada é transportada e distribuída até o consumidor final. Devido às características de fácil instalação, manutenção e durabilidade, a energia solar fotovoltaica vem sendo amplamente utilizada em sistemas de geração de grande porte e/ou sistemas menores (mini/micro geradores) distribuídos sobre os telhados de residências, comércios e indústrias e que são conectadas diretamente a rede elétrica de distribuição das concessionárias. Além deste tipo de aplicação, sistemas isolados e dispersos das redes elétricas foram as primeiras aplicações deste tipo de tecnologia no país e até a atualidade, a sua participação é de grande importância não somente para o contexto da eletrificação rural como também, para o abastecimento de água em localidades onde há dificuldades de obtenção deste insumo.

O bombeamento fotovoltaico de água (BFA) iniciou-se no final de 1970, e em 1990 não havia mais do que 10.000 sistemas instalados em todo o mundo. Entre 1979 e 1981 o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) fomentou um projeto de instalação de sistemas de BFA para a demonstração com potências entre 100 Wp e 300 Wp, que foram aplicados em pequenas propriedades rurais de Mali, Filipinas e Sudão. Já entre 1990 e 1994 a agência de cooperação Alemã, Deutsche (Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit – GTZ, em alemão) instalou 90 sistemas de BFA que totalizaram 180 kWp na Argentina, Brasil, Indonésia, Jordânia, Filipinas, Tunísia, Zimbábue. O governo de Andaluzia na Espanha, também forneceu incentivo para a aquisição de sistemas de BFA para irrigação de oliveiras, onde 40% do investimento era a fundo perdido e os outros 60% eram pagos pelos proprietários em 5 anos, foi observado um aumento de 50% na produção do azeite de oliva (Fedrizzi, 2003). De acordo com estudos da União Europeia até 2010, seriam instalados no mundo um total de 150.000 sistemas de BFA (Fedrizzi, 2003).

Em relação ao Brasil, até o ano de 2002, o país havia instalado, aproximadamente, 3.260 sistemas de BFA, com total de 1,7 MWp instalados, sendo que a grande maioria destes sistemas foram implementados por iniciativa do governo Federal através do Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), de projetos oriundos da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) e de programas Estaduais e Municipais como ocorreram nos estados de Minas Gerais, Bahia e Pará. Na iniciativa privada, os poucos dados obtidos remetiam a um total de apenas 298 sistemas (Fedrizzi, 2002).

Galdino e Lima (2002) descreveram o aspecto técnico e gerencial do PRODEEM, expondo os principais gargalos encontrados na implantação do programa que mais contribuiu para instalação de sistemas de BFA, além de sistemas destinados a iluminação rural. Já Barbosa et al. (1999), descreveu sucintamente todo o processo de treinamento e parceira que foi criado durante a implantação do PRODEEM, que inicialmente pretendia instalar 800 sistemas de BFA para reduzir o

impacto da seca na região nordeste do país, destacando o papel deste que foi o maior treinamento de técnicos em energia solar no Brasil em um programa de Energia Renovável até então.

O bombeamento de água através de sistema fotovoltaico, não se limita apenas ao deslocamento de água de um poço até um reservatório ou ponto de consumo. Dubey e Tiwari (2008) elaboraram estudos de uma hibridização entre células fotovoltaicas e um coletor solar plano, onde o calor residual das células era removido pela água que circulava através do coletor solar plano, movida por uma motobomba alimentada por essas células. Essa é uma aplicação interessante e que pode acrescentar muito aos convencionais sistemas de BFA no Brasil, pois, em sua grande maioria são instalados em localidades remotas e de clima quente, como o nordeste do país, e a possibilidade de usar a água do poço para resfriar os módulos pode se configurar como uma solução interessante, evitando o superaquecimento dos módulos e aumentando a eficiência dos mesmos. O que resultaria em um maior volume de água bombeado e maior durabilidade das células fotovoltaicas.

Nas primeiras aplicações de BFA com pequenas e médias alturas manométricas, utilizava-se motobombas com motores de corrente contínua com magneto permanente. Mais tarde essa configuração deu lugar a motores de corrente alternada assíncronos, mais simples e robustos e de menor custo acoplados diretamente ao gerador fotovoltaico através de um conversor c.c. / c.a. Em aplicações de baixa potência (< 200 Wp) são utilizadas bombas de deslocamento positivo do tipo diafragma, já em aplicações de maior porte, usa-se as bombas centrífugas multiestágio. Nessas instalações os módulos fotovoltaicos são fixos, sem rastreamento apesar de ser possível bombear até 41% a mais de água com sistemas com rastreamento (Fedrizzi,2002).

Desde as primeiras aplicações, a pesquisa na relacionada ao tema do bombeamento fotovoltaico tem alcançado importantes avanços no que se refere tanto a novas configurações de plantas experimentais e clima de diferentes localidades como também novas ferramentas de projeto, modelagem e simulação de sistemas. Belgacem (2012) realizou um trabalho experimental avaliando o desempenho de quatro sistemas fotovoltaicos de 2,1 e 2,8 kWp, para bombeamento de água utilizando conversores de frequência, instalados em diferentes localidades ao sul da cidade de Tunes, capital da Tunísia obtendo eficiências globais do sistema da ordem de 3%.

Rahrah et al. (2015), desenvolveram um modelo de simulação de BFA para a cidade de Bejaia, na Argélia, utilizando o pacote MatLab/Simulink. O modelo proposto considera a utilização de baterias para garantir a contínua operação do sistema. Os autores aplicaram algoritmos de otimização baseados em lógica *Fuzzy* e redes neurais para extrair o máximo rendimento do sistema fotovoltaico. Campana et al. (2013) elaboraram um modelo dinâmico de simulação de um sistema de bombeamento fotovoltaico com considerações especiais a respeito da demanda de água, avaliando alternativas de aplicação de motores de corrente contínua e corrente alternada para conversão eletromecânica de energia e módulos fotovoltaicos com posição fixa e com seguimento do sol. As análises econômicas realizadas apontam para o sistema com motor de corrente alternada e posição fixa dos módulos como tendo o melhor custo benefício entre as diversas configurações analisadas. Posteriormente, Capanema et al. (2014) propuseram um novo sistema de controle para otimização do desempenho do sistema para minimizar o desperdício de água devido ao sobredimensionamento de sistemas de BFA para atendimento de situações críticas de elevado consumo e baixa disponibilidade de radiação solar.

O presente trabalho tem como objetivo analisar os aspectos técnicos relativos à concepção de um sistema de fotovoltaico para bombeamento de água para irrigação de uma cultura de banana na região de Conselheiro Lafaiete – MG, avaliando a capacidade de suprimento hídrico e probabilidade de déficits para diferentes configurações do sistema.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema consiste na irrigação de uma plantação de banana localizada em uma fazenda na área rural de Santana dos Montes, no município de Conselheiro Lafaiete. A plantação ocupa uma área de 10 hectares, sendo que 3 ha já são irrigados com o uso de uma motobomba de 2 cv que retira a água de um lago, com distância de bombeamento de 550 m e a uma altura de 60 m. Os 7 ha restantes, decorrentes de um novo plantio, necessitam de um sistema de irrigação.

De acordo com a Embrapa (2010), a bananeira é uma planta que demanda uma significativa quantidade de água para o seu desenvolvimento e sua produtividade depende diretamente do adequado fornecimento de água, o qual pode ser controlado pela irrigação.

A estimativa do volume de água necessário é de 210 m<sup>3</sup> por dia, sendo que a existência de águas subterrâneas na área viabiliza a perfuração de poços para o aproveitamento do recurso hídrico, cujo desnível total e distância até o reservatório de armazenamento de água foram estimados em 35 m e 150 m respectivamente. No entanto, algumas exigências são requeridas pelo governo para a perfuração de um poço artesiano ou semi-artesiano. Após a comprovação da viabilidade técnica e econômica da utilização de águas subterrâneas no local, uma outorga, que pode valer por 35 anos, deve ser solicitada junto ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam).

O perfil horário de irrigação proposto foi distribuído ao longo do período noturno, o que proporciona melhor condicionamento da planta. Assim foram definidas 12 horas diárias de irrigação com vazão média de 17,5m<sup>3</sup>/h, localizadas nas janelas de 00:00-06:00h e 18:00-00:00h.

Devido ao fato de o horário estabelecido para o consumo de água não coincidir com o período de disponibilidade do recurso solar, a estratégia definida como solução do problema foi o aproveitamento do desnível do terreno para construção de um reservatório de armazenamento na parte alta do terreno de forma que o escoamento de água para a plantação no período noturno ocorra por efeito da aceleração da gravidade, sendo, portanto, o armazenamento de energia sob a forma de energia potencial.

### 3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO PARA O VOLUME DE ÁGUA DESLOCADO

Em um sistema fotovoltaico para o abastecimento de água com conversor de frequência (CF) uma das dificuldades consiste em se conhecer o comportamento eletromecânico e fluidodinâmico do conjunto CF-motobomba. Portanto, para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a metodologia apresentada por Alonso-Abella et al. (2003) pela qual são obtidas equações de similaridade que relacionam a vazão e altura manométrica de operação da motobomba nas condições reais e nas condições nominais informadas pelo fabricante. Tais correlações são derivadas da aplicação da equação de conservação de energia para curvas de isoeffiência da bomba, assim, é possível demonstrar a validade das seguintes equações aplicadas na simulação do sistema fotovoltaico para bombeamento de água.

$$\frac{\eta_{P,N}}{\eta_{P,T}} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{Q_N}{Q_T} = \frac{n_N}{n_T} \quad (2)$$

$$\frac{H_N}{H_T} = \frac{n_N^2}{n_T^2} \quad (3)$$

$$\frac{P_{P,N}}{P_{P,T}} = \frac{n_N^3}{n_T^3} \quad (4)$$

$$Q_T = Q_N \sqrt{\frac{H_T}{H_N}} \quad (5)$$

$$P_{c.c.} = \frac{P_{P,T}}{\eta(m, n_T)\eta_{CF}} \quad (6)$$

Onde,

$\eta_P$	eficiência da bomba;
$Q$	vazão volumétrica, [m <sup>3</sup> /s];
$n$	velocidade angular do rotor da motobomba, [Hz];
$H$	altura manométrica, [m];
$P_P$	potência da motobomba, [W];
$P_{c.c.}$	potência do gerador fotovoltaico, [W];
$\eta(m, n_T)$	rendimento do motor elétrico da motobomba, [-];
$\eta_{CF}$	rendimento do conversor de frequência, [-];
$N$	índice que denota condições de operação normais especificadas pelo fabricante;
$T$	índice que denota condições reais de operação com frequência de alimentação variável;

A aplicação das equações de similaridades apresentadas, depende do conhecimento das condições de operação nominais, neste ponto são incluídas as informações do fabricante obtidas no catálogo do modelo de motobomba escolhida. Neste trabalho foi selecionada a motobomba Schneider modelo SUB140-100F6E5, com potência nominal de 10 cv. Este modelo é próprio para poços com diâmetro de até 6" com altura manométrica máxima de 86 m e vazão máxima operativa de 56 m<sup>3</sup>/h. A Fig. 1 apresenta os dados tabelados pelo fabricante para altura manométrica e eficiência mecânica função da vazão volumétrica. As mesmas variáveis calculadas a partir de regressão dos dados originais estão plotadas juntamente na Fig. 1.

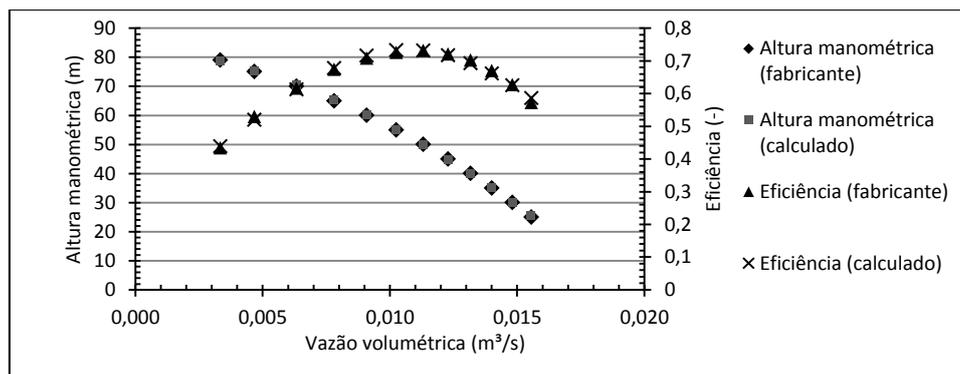


Figura 1 – Curvas de eficiência e altura manométrica em função da vazão da bomba selecionada.

As equações de eficiência e altura manométrica, Eq. (7) e (8) respectivamente, obtidas a partir de regressão dos valores originais foram utilizadas para cálculo de interpolação para diferentes condições operativas da motobomba, sendo que o tipo de equação com melhor ajuste testado foi polinomial de segundo grau para a altura manométrica e gaussiana para a eficiência.

$$\eta_N = 0,734 \exp(-((Q_N - 0,01069)/0,01026)^2) \quad (7)$$

$$H_N = -1,76E + 05Q_N^2 - 1019 Q_N + 83,9 \quad (8)$$

Para completar o conjunto de equações necessárias para a determinação da vazão de bombeamento para operação em frequência de alimentação variável e, portanto, diferentes níveis de potência de alimentação da motobomba, é necessário considerar a variação da eficiência do motor elétrico e do conversor de frequência em função do carregamento. A eficiência do conversor é praticamente constante a partir de um determinado valor de mínimo de carregamento e desta forma pode ser considerada como um valor fixo da ordem de 95% (Alonso-Abella et al., 2003), o qual foi admitido para o conjunto formado pelo conversor de frequência e o seguidor do ponto de máxima potência do gerador fotovoltaico, MPPT (sigla em inglês). Já a eficiência do motor elétrico é importante ser considerada como função da potência de trabalho. Em geral, os fabricantes de motobombas não oferecem dados de eficiência do motor elétrico, no entanto, curvas típicas disponíveis na literatura podem ser consideradas. Na Fig. 2 são apresentadas curvas típicas de eficiência para motores de alto rendimento para vários níveis de carregamento.

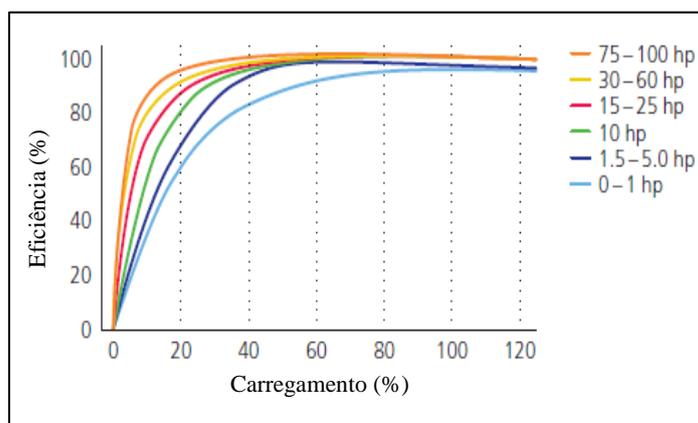


Figura 2 – Curvas de rendimento típicas de motores de alto rendimento.  
Fonte: Adaptado de Natural Resources Canada (2003)

Neste trabalho foi considerada a curva de rendimento do motor de 10 hp apresentada na Fig. 2, pelo nível de potência ser o mesmo da motobomba selecionada, no entanto, foi utilizando um fator de correção constante de 75% pelo fato de o motor elétrico acoplado na motobomba não ser de alto rendimento. A partir desta consideração da aplicação de manipulações algébricas simples foi possível determinar a curva de eficiência em função da potência de alimentação, o que torna o processo de cálculo mais direto do que a utilização curva de eficiência em função da potência de saída. Na Fig. 3 apresenta-se a curva de eficiência obtida, obedecendo à Eq. (9).

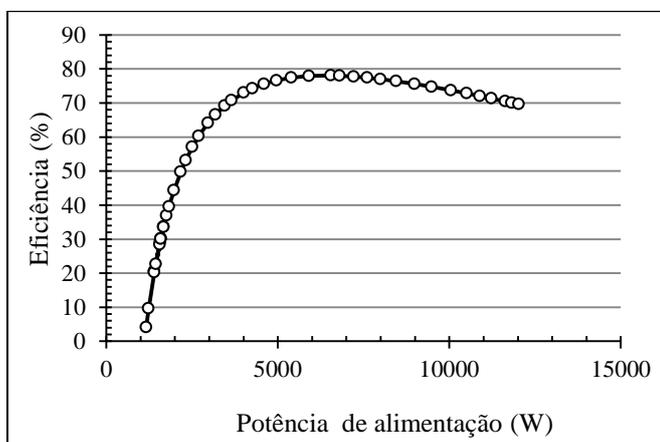


Figura 3 – Curva de rendimento obtida para a motobomba utilizada em função da potência de alimentação.

$$\eta_{m, N} = \frac{1062 \ln(P_{m, N})}{P_{m, N}^{0,1141}} - 3346 \quad (9)$$

Para o cálculo da altura manométrica efetiva foram implementadas as equações clássicas da fluidodinâmica em função do número de Reynolds como se segue:

$$H_N = H + H_c \quad (10)$$

$$H_c = f \frac{L}{D} \left( \frac{Q_T}{\pi D^2 / 4} \right)^2 \quad (11)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Se } Re \leq 2000 \quad (12)$$

$$f = \left[ -2 \log \left( \frac{2,51}{Re f^{0,5}} \right) \right]^{-2} \quad \text{Se } Re > 2000 \quad (13)$$

Onde,

$H$	desnível total do poço até reservatório de armazenamento, igual a 35 m, [m];
$H_c$	perda de carga na tubulação, [m];
$f$	fator de atrito, [-];
$L$	comprimento da tubulação de alimentação, igual a 150 m, [m];
$Re$	número de Reynolds, [-];

As equações de perda de carga envolvem vazão e altura manométrica e estão relacionadas com o escoamento de água na tubulação, portanto as correlações para este caso são independentes daquelas utilizadas para definição das condições operativas da motobomba, Eq. (1) a (8). Desta forma o processo de cálculo se torna iterativo, pois é preciso determinar a altura manométrica e vazão operativas por duas vias completamente distintas mas que precisam convergir para os mesmos resultados. Por este motivo, a partir do modelo regido pelo conjunto de equações apresentadas foram implementadas rotinas de cálculos iterativas utilizando o software TRNSYS<sup>®</sup> e Excel para realização de diversas simulações computacionais com o objetivo de avaliar do regime anual de consumo e abastecimento hídrico da plantação. A vantagem do TRNSYS é a flexibilidade em se lidar com diversos tipos de sistemas transientes através de processos de cálculos iterativos, além de apresentar uma interface gráfica amigável que possibilita a criação de modelos utilizando diagramas de blocos, permitindo uma total interação entre os componentes para cada passo da simulação. Além disso, o software oferece uma ampla biblioteca de modelos matemáticos para diversos tipos de sistemas bem como dados climatológicos / solarimétricos do banco de dados Meteororm<sup>®</sup>, em base horária. A Fig.5, apresenta o diagrama de blocos implementado no TRNSYS<sup>®</sup> sendo que o fluxo de dados climatológicos / solarimétricos é representado pelas linhas cheias na cor laranja enquanto as linhas da cor vermelha se referem a transferência de potência e as azuis representam o deslocamento do fluido e, finalmente, as linhas pontilhadas representam fluxo de dados de saída para o usuário.

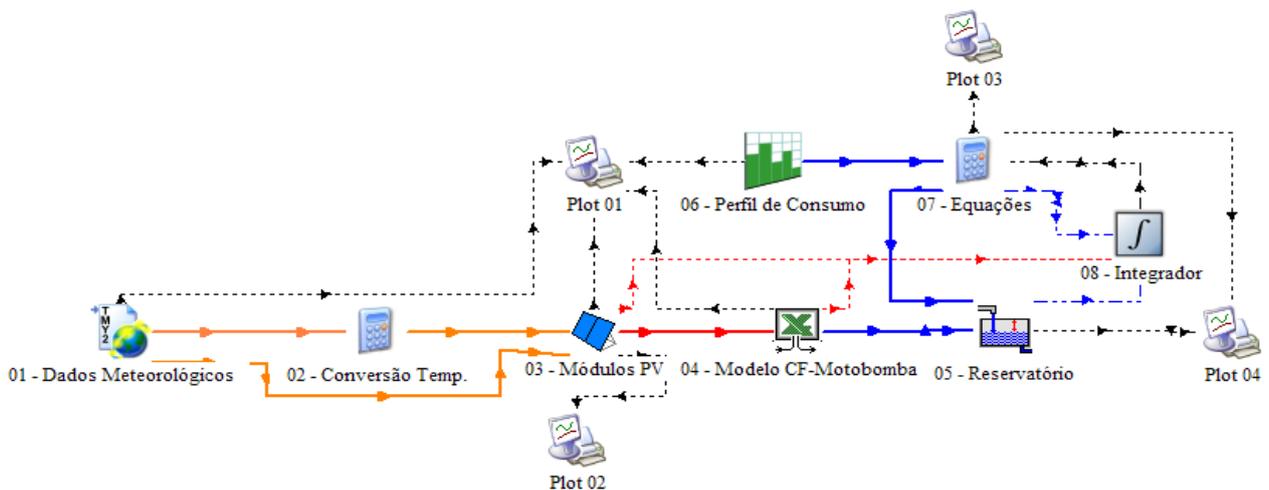


Figura 4 – Diagrama de blocos implementado no software TRNSYS<sup>®</sup> para a realização de simulações.

De acordo com a Fig. 4, o bloco 01 contém as referências para o arquivo de dados climatológicos / solarimétricos, em base horária, para o ano típico (Typical Meteorological Year – TMY, em inglês) com informações de radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Além disso, este bloco calcula as componentes de radiação solar direta e difusa (através de modelo de decomposição) e também utiliza de modelo de transposição (Perez et al., 1988) para a realização da conversão do plano horizontal para o plano inclinado dos módulos FV (Plane of Array – POA, em inglês), o qual foi definido como 15°. Devido à falta de disponibilidade de dados meteorológicos (no formato TMY) especificamente para a cidade de Conselheiro Lafaiete – MG, a simulação foi baseada para dados da cidade de Belo Horizonte – MG. Essa decisão foi embasada nos dados de irradiação global média diária anual, plano horizontal, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment, em inglês*) onde os valores de irradiação global encontrados para a cidade de Conselheiro Lafaiete (5,06 kWh / m<sup>2</sup>.dia) são próximos aos valores de Belo Horizonte (5,23 kWh / m<sup>2</sup>.dia).

O bloco 02 é utilizado para a realização da conversão de unidades, como por exemplo, da temperatura em Kelvin para graus Celsius, para a adequação ao formato do parâmetro de entrada para o arranjo de módulos fotovoltaicos (bloco 03), o qual foi parametrizado com dados do módulo FV modelo CS6P-260, com potência máxima de 260Wp, de tecnologia silício policristalino, do fabricante Canadian Solar, cujos valores de corrente de curto-circuito e tensão de circuito aberto são 9,12 A e 37,5 V, respectivamente. O sistema foi proposto, variando-se o número de strings de 4 a 12 nas simulações, cada string com 10 módulos conectados em série, totalizando 375 V de tensão de circuito aberto.

O modelo matemático do conjunto CF-motobomba foi implementado utilizando o bloco 04, o qual utiliza de dados de uma planilha do Excel que possui as equações do modelo passo a passo da simulação. O bloco 05 representa o reservatório de armazenamento de água no qual são aplicadas equações de balanço de massa para avaliação do volume armazenado, enquanto o bloco 06, é utilizado para definição do perfil horário de consumo, cuja integral fornece o volume diário demandado.

Por fim, o bloco 07 é basicamente utilizado para calcular os parâmetros de avaliação geral do sistema fotovoltaico para o bombeamento de água a partir das integrais de volume e potência elétrica (bloco 08) e os demais componentes, são utilizados para a demonstração dos resultados ao usuário na forma de gráficos horários.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas diversas simulações para diferentes configurações de suprimento hídrico para a localidade com base no modelo desenvolvido para o período de um ano com intervalo de tempo de uma hora. Na Fig.5, são apresentados os gráficos de radiação solar global incidente no plano dos painéis, com 15° de inclinação e 180° de ângulo azimutal (orientados para o norte geográfico), e o perfil resultante de vazão de bombeamento para o reservatório, bem como o perfil proposto de vazão horária de consumo, cuja soma no período de 24 horas totaliza 210 m<sup>3</sup>.

De acordo com a Fig. 5 (a) os gráficos plotados se referem a um dia de céu claro e a Fig. 5 (b) para um dia nublado. Em ambas as situações, o sistema foi simulado para 6 fileiras (“strings”, em inglês), com 10 módulos FV em série cada uma, totalizando 15,6 kWp de potência instalada, o que representa 152% da potência elétrica da motobomba, equivalente ao valor de 10 cv de potência mecânica nominal dividido pelo rendimento nominal de 96% de um motor de alto rendimento e pelo fator de correção admitido de 75%. É possível notar na Fig. 5, que a motobomba permanece inoperante em algumas horas do dia, quando a irradiância se encontra abaixo do nível crítico de aproximadamente 100 W/m<sup>2</sup>, sendo este sendo o limite mínimo necessário para o acionamento da mesma.

É importante salientar, que se houver um aumento da potência instalada dos painéis fotovoltaicos, possibilitará a diminuição do nível crítico de radiação solar para acionamento da motobomba, por outro lado, este aumento pode levar a maiores perdas energéticas devido à limitação de potência elétrica entregue pelo sistema, conforme pode ser observado principalmente na Fig. 6 (a).

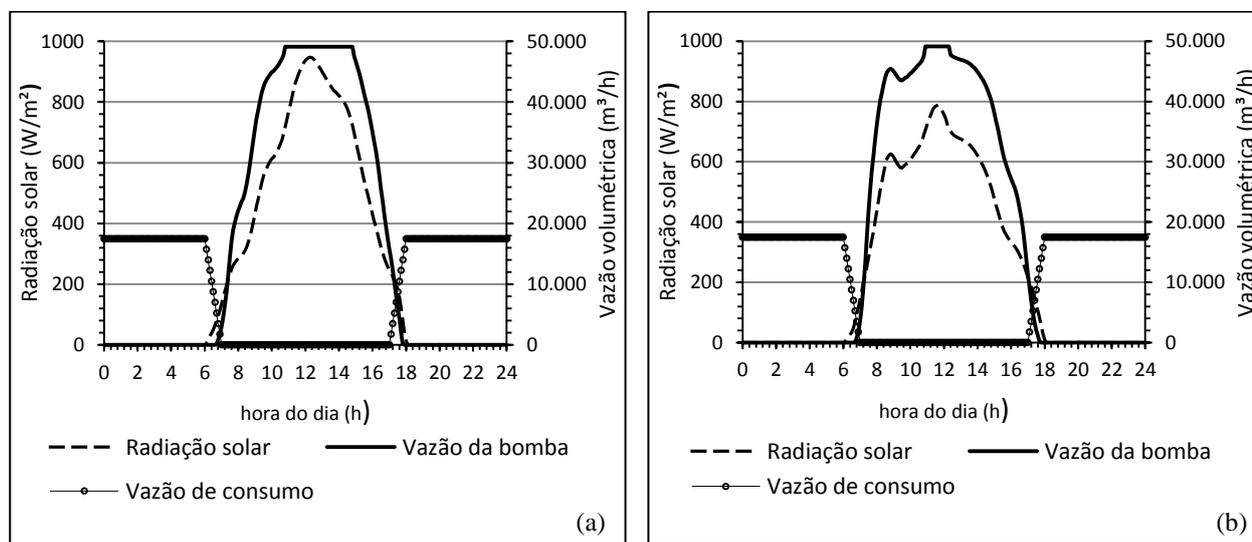


Figura 5 - Relação entre vazão de consumo e vazão da motobomba para: (a) Dia de céu claro; (b) dia de céu nublado.

Neste trabalho, foi admitida uma sobrecarga máxima aceitável de 10% do valor da potência de alimentação da motobomba operando com potência nominal na saída, a fim de proporcionar melhor aproveitamento do recurso solar. Esta sobrecarga ocorreria através de ajustes na frequência elétrica pelo CF, acima da frequência nominal de 60Hz. No entanto, acima do valor de 10% em potência disponível do campo fotovoltaico, representa uma perda de energia, denominada de perda por limite de potência.

Diversas simulações foram realizadas para avaliar as perdas do sistema devido a limitação de potência e, especialmente, na capacidade de abastecimento hídrico realizado pelo sistema fotovoltaico de bombeamento de água para a plantação, cujo principal parâmetro de análise foi o déficit de abastecimento, em porcentagem do volume anual demandado.

Os resultados das simulações, apresentados na Fig. 6, demonstraram que a motobomba proposta seria capaz de atender 100% da demanda de água, com déficit anual inferior a 5%. Cabe salientar que, nas simulações foi admitido como primeira hipótese que o volume máximo do reservatório é igual volume diário demandado. No entanto, outras possibilidades foram investigadas com diferentes volumes do reservatório, com capacidade de armazenamento igual a 2 e 3 vezes o volume diário demandado.

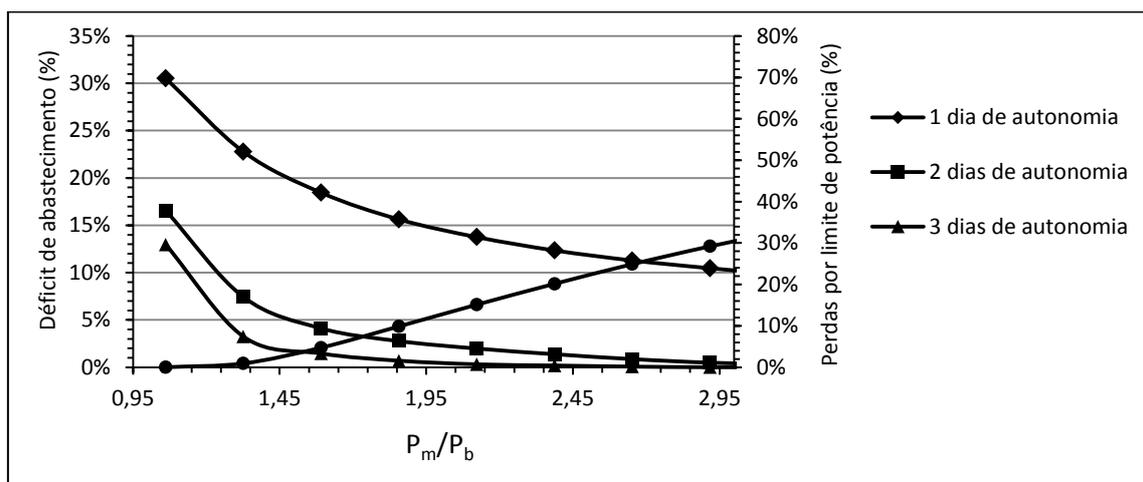


Figura 6 – Déficit de abastecimento e perdas por limite de potência em função da relação entre a potência e instalada do gerador fotovoltaico e potência da motobomba

De acordo com a Fig. 7, é possível notar que a magnitude do déficit de abastecimento diminui rapidamente com o aumento da potência instalada com reservatório para 2 e 3 dias de autonomia, porém o atendimento com reservatório para 1 dia de autonomia apresenta déficit anual próximo a 10% mesmo com potência instalada do gerador fotovoltaico da ordem de 3 vezes superior à potência da motobomba. Desta forma, a potência do gerador fotovoltaico pode ser reduzida mediante o aumento do volume do reservatório de água para capacidade de 2 ou 3 dias de autonomia, esta possibilidade deve ser considerada no projeto do sistema a fim de reduzir o custo global de implantação do mesmo.

A operação do sistema com frequência elétrica de alimentação variável, sendo o gerador fotovoltaico com 159% da potência da motobomba, foi equivalente à operação em plena capacidade por 4,16 h, uma vez que o volume diário fornecido foi de 210 m<sup>3</sup> e a vazão de tabelada pelo fabricante, para altura manométrica de 35 m é de 50,4 m<sup>3</sup>/h, o que, corresponde a 84,3% do número de horas de sol pleno do local, de 4,93 h por dia, obtido a partir dos dados meteorológicos utilizados.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi implementado, no software TRYNSYS<sup>®</sup> um modelo iterativo de simulação de um conjunto CF-motobomba para sistema fotovoltaico para o bombeamento de água baseado na metodologia proposta por Alonso-Abella et al. (2003). Utilizando as correlações de vazão, potência e altura manométrica do modelo juntamente com as curvas traçadas a partir dos dados do fabricante, foram realizadas diversas simulações, com período anual, para abastecimento do sistema de irrigação de uma plantação de banana na cidade de Conselheiro Lafaiete – MG.

Cabe salientar que a potência instalada do gerador fotovoltaico deve ser significativamente superior à potência nominal da motobomba, a fim de reduzir o nível de radiação crítica de bombeamento, no entanto, devem ser observadas as perdas por limitação de potência. Há também possibilidade de refrigeração dos módulos fotovoltaicos através da utilização da tecnologia PV-T, que pode permitir as células dos módulos operarem em temperaturas mais baixas e, portanto, com maior eficiência elétrica, o que poderia reduzir a necessidade de aumento da potência instalada do sistema fotovoltaico. A aplicação de um método de otimização para redução de perdas energéticas e custo financeiro de implantação do sistema seria recomendável como tema para trabalhos futuros.

A utilização de um reservatório com volume para dois ou três dias de autonomia possibilita uma redução considerável do déficit anual de abastecimento, o que permite maior confiabilidade com menor potência instalada do gerador fotovoltaico, implicando em um compromisso técnico e econômico, cuja abordagem recomendada seria através da aplicação de um método de otimização para redução do custo global com a implantação do sistema, avaliando as melhores alternativas para o volume do reservatório e potencia do campo fotovoltaico.

O volume total bombeado com potência do gerador fotovoltaico de 159% da potência da motobomba foi equivalente ao funcionamento da motobomba durante 4,16 horas por dia, correspondente a 84,3% do número de horas de sol pleno do local.

## REFERÊNCIAS

- Alons-Abella, M., Lorenzo, E., Chenlo, F. 2003. PV water pumping systems based on standard frequency converters, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 11, pp 179-191.
- Armstrong, S; Hurley, W.G ., 2010. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. Applied Thermal Engineering, vol .30, pp. 1488-1495.
- Barbosa, E. M de S., Tiba, C., Salviano, C.J.C., Carvalho, A. M., Lyra, M.F., 1999. Photovoltaic water pumping system installer training: a partnership experience between the university and são francisco hydroelectric power plant. ISES 1999 Solar World Congress, Jerusalem, Israel, Jul.1999.
- Belgacem, B. G., 2012. Performance of Submersible PV Water Pumping Systems in Tunisia. Energy for Sustainable Development, vol. 16, pp. 415–420.
- Brito, Alaán Ubaíara.,2006. Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada através de Conversores de Frequência Comerciais para acionar Bombas Centrifugas. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Campana, E. E.,Li, H., Yan, J., 2013. Dynamic Modelling of a PV Pumping System With Special Consideration on Water Demand. Applied Energy, vol. 112, pp. 635–645.
- Campana, E. E.,Li, H., Yan, J., 2014. PV Water Pumping for Irrigation Equipped with a Novel Control System for Water Savings. The 6th International Conference on Applied Energy – ICAE2014. Energy Procedia vol. 61, pp. 949–952.
- Dubey, Swapnil ; Tiwari, G.N., 2008. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. Solar Energy, vol. 82, pp. 602–612.
- Fedrizzi, Maria Cristina; Sauer, Ildo Luis., 2002. Bombeamento Solar Fotovoltaico, Histórico, Características e Projetos. 4º Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER), Campinas – SP.
- Fedrizzi, Maria Cristina; 2003. Sistema Fotovoltaico para Abastecimento de Água para o Uso Comunitário: Lições aprendidas e procedimentos para potencializar a sua difusão. Tese Doutorado, PIPGE – USP.
- Galdino, Marco Antônio; Lima, Jorge H. G., 2002. PRODEEM – Programa nacional de eletrificação rural baseado em energia solar fotovoltaica. IX Congresso Brasileiro de Energia e IV Seminário Latino-Americano de Energia, Volume IV, Rio de Janeiro, p. 1906-1814.
- Jones, A.DA; Underwood, C.P., 2001. Thermal model for photovoltaic systems. Solar Energy, v. 70, n. 4, p. 349-359.
- Koech, R. K; Ondieki, H.O; Tonui, J.K; Rotich, S.K., 2012. A Steady State Thermal Model For Photovoltaic/Thermal (PV/T) System Under Various Conditions International Journal of Scientific & Technology Research, vol. 1, n.11, pp. 2277-8616.
- Natural Resources Canada. 2003. Technical Fact Sheet - Premium-Efficiency Motors. Cat. No. M144-21/2003E; ISBN 0-662-35668-3. Office of Energy Efficiency. Energy Innovators Initiative. Ottawa, ON. Canada.
- Rahrah, K., Rekioua, D., Rekioua, T., Bacha, S., 2015. Photovoltaic Pumping System in Bejaia Climate with Battery Storage. International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, pp. 13665–13675.
- Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA). 2015. Disponível em <http://en.openei.org/apps/SWERA/>.

**Abstract.** *Photovoltaic systems for water pumping are a solution to the water supply for human consumption, agriculture and livestock in remote areas or in places which electricity supply is unreliable. This type of system, historically, has been widely used in the country mainly through federal government programs and research projects. In this work, several simulations were performed through TRNSYS© software, and analyzes of results generated for photovoltaic water pumping (SFB) using frequency converter, for an irrigation in a banana plantation in the town of Conselheiro Lafaiete - MG, southeastern Brazil, with demand of 210 m<sup>3</sup> of water per day. The results achieved by the simulations demonstrated the suitability of the proposed PV system pumping water pumping with supply deficits lower than 5% for a power of the PV generator equal to 159% the pump power demand operating with nominal output power.*

**Key words:** *Water, Photovoltaic Pumping, Computacional Simulation Tool.*