

GPT/005

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – GPT

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE BOMBEAMENTO SOLAR

George Alves Soares*
CEPEL – ACEL

Jorge Henrique G. Lima
CEPEL – ACEL

Marco Antônio E. Galdino
CEPEL – ACEL

Marcus B. de Medeiros
CEPEL – ACEL

RESUMO

O atendimento de comunidades isoladas tem impulsionado o desenvolvimento de fontes renováveis de energia no terceiro mundo. No Brasil, cerca de 15% da população não possui o acesso à energia elétrica. A implementação dos sistemas fotovoltaicos é uma das alternativas viáveis para atender esta demanda em sistemas isolados. O dimensionamento e otimização de um bombeamento solar é complexo devido às diferentes características de seus componentes e envolve um grande número de variáveis. Este trabalho apresenta as características de cada componente e mostra através de simulação como a integração dos mesmos pode ser utilizada para maximizar o volume de água bombeado.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento d'água, Fontes renováveis, Bombeamento solar.

1.0 INTRODUÇÃO

A energia fotovoltaica é uma alternativa energética bastante utilizada em regiões onde o suprimento de energia elétrica às comunidades é crítica, principalmente pela grande distância das redes convencionais de distribuição. O principal alavancador do uso de fontes de energia renováveis é o fato do custo de extensão das linhas é extremamente elevado de forma que se torna economicamente inviável tal investimento. A energia fotovoltaica pode ser utilizada em muitas aplicações como em iluminação pública e

sistemas de bombeamento. Os sistemas de bombeamento d'água destinam-se basicamente a suprir água para o consumo humano, sendo ainda utilizado em consumo animal e pequena irrigação. Os sistemas na maioria dos casos são do tipo de bombeamento direto, sem qualquer armazenamento de energia elétrica, para minimização de custos.

Os sistemas de bombeamento solar são normalmente compostos pelos seguintes componentes básicos:

- Módulos Fotovoltaicos: Estes módulos fazem a conversão da energia luminosa em energia elétrica de corrente contínua. A potência convertida depende da radiação solar que muda durante o dia e ao longo do ano para um mesmo local e são influenciados pela temperatura. Os módulos são os elementos mais onerosos destes sistemas.
- Inversor: O inversor transforma a energia elétrica de corrente contínua proveniente dos módulos em corrente alternada para alimentar o motor de corrente alternada. Este é operado com algum tipo de lógica PWM de maneira a otimizar a operação do conjunto Motor-Bomba. Quando o motor é de corrente contínua, este componente é dispensado, podendo ser substituído por outro tipo de componente.
- Motor ca ou cc + Bomba + Encanamento: Este conjunto transforma a energia elétrica em energia hidráulica a ser armazenada como energia potencial;
- Caixas d'água: As caixas d'água funcionam como armazenador de energia. A energia potencial da água é usada na distribuição da mesma por gravidade;
- Poço: Reservatório natural de água, cuja a disponibilidade de água pode variar durante o processo de bombeamento e sazonalmente;

Este trabalho modela e apresenta as características de cada elemento e simula a integração do sistema de tal forma a mostrar que a integração otimizada destes

*CEPEL /ACEL

Av. Hum s/n – Cidade Universitária
CEP 20080-003 - Rio de Janeiro (RJ) – Brasil
Tel.: (21) 598-6141 - Fax.: (21) 260-6211
soares@cepel.br

componentes, pode trazer benefícios, como o aumento do volume de água bombeado.

2.0 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

Os sistemas de bombeamento solar podem ser subdivididos em três subsistemas, a saber, o subsistema de geração composto pelos módulos fotovoltaicos, o subsistema eletroeletrônico composto pelo inversor e motor e o subsistema hidráulico constituído pela bomba, tubulações, válvulas, registros e outros componentes que estiverem instalados junto à máquina centrífuga. Cada componente tem suas características e o desafio na otimização é o casamento destas características para obtenção da maximização do volume bombeado.

No subsistema de geração, o painel fotovoltaico transforma a energia solar irradiada em energia elétrica na forma de fonte de corrente cc, na maior parte da faixa de operação, como pode ser observado nas Figuras 5 e 8. A influência da temperatura na energia elétrica gerada é significativa, além de reduzir a potência disponível, torna a curva de potência disponível versus horas do dia mais assimétrica em relação ao ponto de máxima irradiação. Como mostrado na seção 4.0, este fator não pode ser desprezado.

O subsistema hidráulico deve ser projetado para vencer a diferença de pressão entre a descarga e a sucção e as quedas de pressão nas tubulações decorrentes do atrito do fluido, sendo proporcional ao quadrado da vazão. Além disto deve prover uma vazão que atenda aos requisitos da aplicação. As características do poço podem variar bastante tanto ao longo do ano quanto ao longo do processo de bombeamento, dependendo da capacidade de regeneração do poço e da sazonalidade do lençol freático. A variação do nível d'água durante o processo de bombeamento pode atingir até 30 m em alguns casos. Esta variação é conhecida como altura dinâmica. As bombas, especialmente as centrífugas, têm a sua vazão diretamente proporcional à velocidade em que é acionada, e a potência hidráulica variando com o cubo da rotação, logo vazões menores implicam em velocidades menores e diminuição brusca do consumo de energia. A menor necessidade de potência de saída se traduz em todo sistema em uma menor necessidade de potência de entrada disponível pelo módulo fotovoltaico.

O subsistema eletroeletrônico é o responsável pela interface entre a geração não firme de energia e a aplicação, sendo a peça chave na implementação de um bombeamento solar otimizado. O inversor tem a função de adequar uma fonte de corrente cc em ca com nível de tensão e frequência adequado, quando um motor ca é utilizado. Na realidade, o inversor não altera o nível de tensão, contudo neste trabalho consideraremos como inversor, o inversor mais um amplificador de tensão. O motor ideal é aquele que possa ser alimentado por uma fonte de corrente, motores síncronos com imã permanente são bastante adequados. O CEPEL desenvolve pesquisas neste tipo de motor visando tal aplicação. No presente artigo, os valores de rendimentos de um motor de indução

trifásico de alto rendimento são utilizados na simulação.

O ponto de operação de um bombeamento, em termos de vazão e pressão, é o ponto de interseção entre a curva da bomba e a curva vazão x pressão do subsistema hidráulico. Quando o controle de vazão é realizado através de válvula, que não é o caso do bombeamento solar, o ponto de operação acompanha a curva da bomba, quando o controle de vazão é realizado através da variação de velocidade da bomba, o ponto de operação acompanha a curva do subsistema hidráulico. Assim cabe ao subsistema eletroeletrônico, prover a máxima velocidade possível à bomba, ou seja a maior vazão, dentro da disponibilidade de potência proveniente dos módulos fotovoltaicos.

3.0 MODELAGEM

A abordagem adotada foi desenvolver separadamente o modelo de cada componente e agregá-lo um a um até completar o sistema. Ressalta-se que todos os modelos foram desenvolvidos, considerando o fluxo de potência de entrada e saída de cada componente, ou seja, uma modelagem de potência.

Modelou-se inicialmente o conjunto poço + encanamentos e depois a bomba, completando assim o subsistema hidráulico, ou seja a equação que descreve a curva seja determinada. Como discutido anteriormente, esta curva definirá todos os pontos de operação do subsistema hidráulico. A Figura 1 representa a curva (Vazão x Pressão) que modela o conjunto poço + encanamentos.

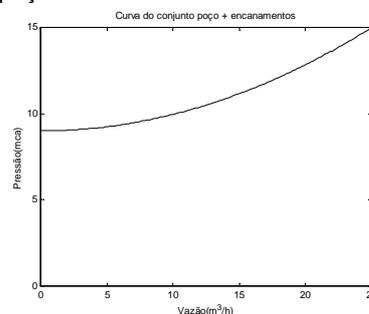


FIGURA 1 – Curva (pressão x vazão) do conjunto poço + encanamentos.

O segundo elemento a ser modelado é a bomba. Para que a potência de entrada seja calculada, deve-se ter o rendimento da bomba para diversas velocidades. Os dados de catálogo de rendimento para bombas centrífugas fornecidos são somente para velocidades constantes. Para solucionar esta questão, usou-se cinco curvas de rendimento parametrizadas experimentais, onde cada curva representa a localização geométrica dos pontos de pressão e vazão onde o rendimento terá um valor determinado. Sempre que o ponto de operação caísse sobre os pontos destas curvas, tinha-se automaticamente o rendimento da bomba. Quando o ponto de rendimento não cai exatamente sobre as curvas de rendimento, usou-se uma interpolação linear, considerando-se que o rendimento varia linearmente com a vazão para pontos de mesma pressão entre as curvas obtidas

experimentalmente. Assim, a partir do ponto de vazão de operação, identifica-se entre quais curvas experimentais de rendimento, o ponto de operação se localiza e determina-se o rendimento pela interpolação das curvas para a vazão de operação.

A Figura 2 mostra como a interpolação adotada foi feita.

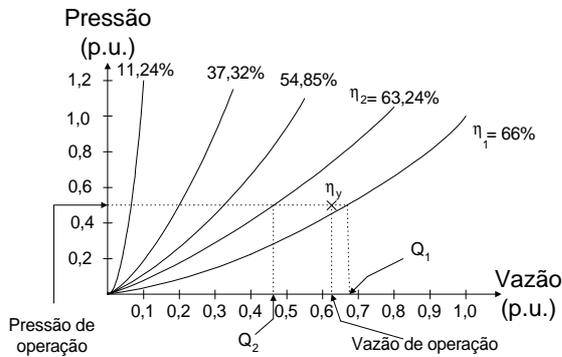


FIGURA 2 – Curvas de rendimento da bomba.

A equação que fornecerá qual é o rendimento instantâneo da bomba é mostrada pela Equação (1):

$$\varphi_y = \frac{Q - Q_2}{Q_1 - Q_2} \left(\varphi_1 - \varphi_2 \right) + \varphi_2 \quad (1)$$

Onde:

- η_y – Rendimento do ponto de operação;
- η_2 – Rendimento da curva anterior à vazão de operação;
- η_1 – Rendimento da curva posterior à vazão de operação;
- Q_2 – Dado a pressão de operação, Q_2 é a vazão da curva anterior à vazão de operação;
- Q_1 – Dado a pressão de operação, Q_1 é a vazão da curva posterior à vazão de operação;
- Q_y – Vazão de operação.

Tendo-se o rendimento da bomba, para que a potência de entrada da bomba seja determinada, basta dividir a potência hidráulica pelo rendimento da bomba.

O segundo subsistema a ser modelado foi o eletroeletrônico. A modelagem do motor foi feita para um motor alimentado a frequência constante, dividindo a faixa de operação do mesmo em duas partes. A primeira parte corresponde à variações de carga de 0 a 30% da carga nominal e a segunda para cargas maiores que 30% da carga nominal. A Figura 3 mostra a curva de rendimento do motor

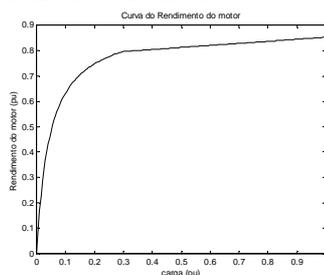


FIGURA 3 – Curva de rendimento do motor

A primeira parte da curva (carga menor que 30%) foi modelada como sugere a Equação (2).

$$\varphi = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + kP_{saída} + 0,3 \left(\frac{1 - \varphi_{nominal}}{\varphi_{nominal}} \right) P_{nominal}} \quad (2)$$

Onde:

$P_{saída}$ – É a carga instantânea do motor;

$kP_{saída}$ – Perdas em carga do motor;

$0,3 \frac{1 - \varphi_{nominal}}{\varphi_{nominal}} P_{nominal}$ – Perdas em vazio motor.

Vale a pena ressaltar que a parcela relativa às perdas em vazio do motor equivale a 30% das perdas em carga nominal. Esta característica foi comprovada pela experiência laboratorial do CEPEL em ensaios de rendimento e fator de potência. O fator "k" contido nas perdas em carga do motor deve ser calculado de tal forma que na transição dos dois modelos da curva de rendimento, não haja descontinuidade na forma de onda.

A segunda parte da curva, para cargas maiores de 30% da carga nominal, foi obtida adotando-se uma reta, que passa por dois pontos principais. O primeiro ponto é o do rendimento calculado para carga de 30% da nominal e o segundo é para condição de carga nominal do motor. Na falta de dados melhores, o efeito da alimentação pelo inversor com frequência variável foi a diminuição de 2 pontos percentuais no rendimento do motor para toda faixa de operação.

Tendo-se a curva de rendimento do motor, para obter-se a potência de entrada deste, basta dividir a sua potência de saída pelo rendimento.

Para o inversor foi adotada uma curva de rendimento fornecida por um fabricante de inversores, incluindo o amplificador de tensão. Não houve preocupação em qual lógica PWM que este estaria utilizando, e sim no quanto de potência que ele efetivamente transmite ao motor. Na construção da curva de rendimento utilizada, foram utilizados segmentos de reta entre alguns intervalos previamente definidos. Esta curva é mostrada na Figura 4.

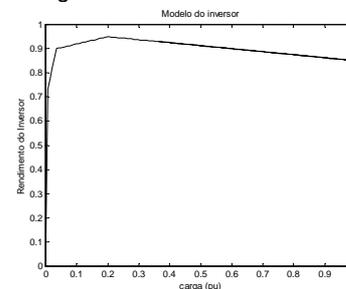


FIGURA 4 – Curva de rendimento do inversor

Para a modelagem do subsistema de geração, fez-se o uso das seguintes equações que descrevem o

comportamento da temperatura e da corrente em cada módulo fotovoltaico:

$$I_{ph}(G) = \frac{G}{1000} I_{sc} \quad (3)$$

$$T_{cel} = T_{amb} + 0,03 \cdot G \quad (4)$$

$$I_0(T) = C T_{cel}^3 e^{-\frac{E_g}{KT_{cel}}} \quad (5)$$

$$I(T, G) = I_{ph}(G) - I_0(T) \left(e^{\left(\frac{qV}{36nKT_{cel}} \right)} - 1 \right) \quad (6)$$

Onde:

G – Irradiação solar, em W/m².

I_{sc} – Corrente de curto circuito do módulo;

C – Constante;

E_g – 1,12 eV = 1.79424 · 10⁻⁰¹⁹, em V (Band Gap do Si);

q – Carga elementar = 1,6 · 10⁻¹⁹, em C (carga do elétron);

K – 1.381 · 10⁻²³, em J/K (constante de Boltzman);

V – Tensão, em V;

n – 2;

T_{amb} – Temperatura ambiente, em K;

T_{cel} – Temperatura do módulo, em K;

I – Corrente, em A;

I₀ – corrente reversa de uma célula, em A.

As curvas de potência de saída dos módulos e corrente são apresentadas a seguir, considerando os efeitos da temperatura:



FIGURA 5 – Curva da corrente dos módulos

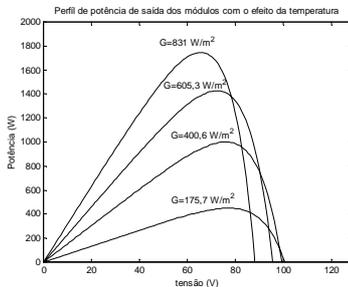


FIGURA 6 – Curva de potência dos módulos

A curva de potência é obtida a partir do produto da corrente com o vetor tensão. Um detalhe interessante nesta modelagem foi a grande influência da temperatura dos módulos (descrita pela Equação 4)

nos perfis de corrente e potência dos mesmos. A temperatura ambiente foi fornecida junto com os dados de irradiação provenientes de medição real. O comportamento da temperatura ambiente tem características peculiares, como o fato de ter seu mínimo de temperatura sempre no instante anterior ao surgimento dos primeiros raios solares e o máximo de temperatura ocorrer sempre após 2 a 3 horas da máxima irradiação. Esta característica pode ser vista na Figura 7 para um dia quente de verão.

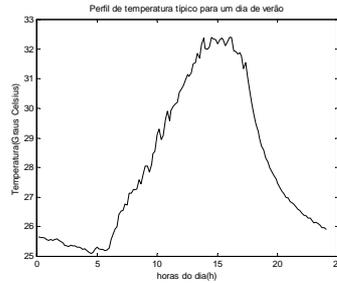


FIGURA 7 – Perfil de temperatura para um dia de verão

O fato da temperatura não ter o seu ponto de máximo junto com o ponto de máximo de irradiação, acarreta em uma assimetria nos perfis de corrente. Isto pode ser notado na comparação das Figura 5 e 8. Na Figura 5 para irradiações mais elevadas, o V_{oc} se torna inferior, comparado ao V_{oc} de irradiações inferiores, contudo isto não é observado na Figura 8.

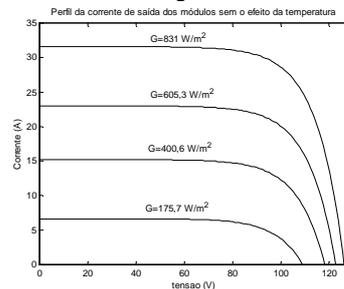


FIGURA 8 – Perfil de corrente dos módulos sem o efeito da temperatura (T_{amb}=25°C).

A seguir será apresentado o perfil de potência sem o efeito da temperatura dos módulos.

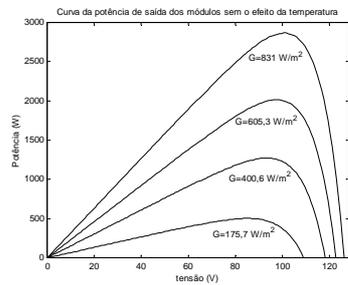


FIGURA 9 – Perfil de potência dos módulos sem o efeito da temperatura (T_{amb}=25°C).

Note que o perfil de potência sem o efeito de temperatura (Figura 9) possui o máximo de potência em torno de 2600W e quando considerado o efeito de temperatura (Figura 5), seu máximo fica em torno de 1750W. Conclui-se que em qualquer modelagem de

módulos fotovoltaicos, a não inclusão do efeito da temperatura acarretará em erros significativos, tornando-se assim incorreto este tipo de modelagem. A Figura 10 mostra como é feita junção de todos os modelos adotados, formando o sistema completo.

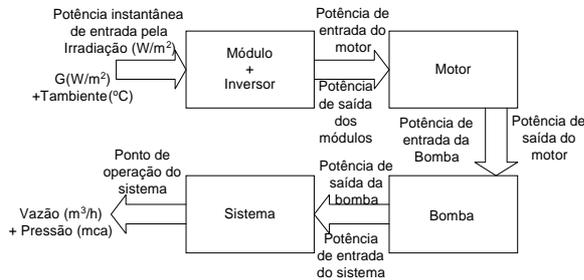


FIGURA 10 – Diagrama de blocos do sistema

Na abordagem utilizada neste trabalho, a potência irradiada pelo sol a cada instante produzirá e disponibilizará uma corrente e uma tensão de saída nos módulos fotovoltaicos, cujo produto é a potência de saída disponível dos módulos. Para cada valor de irradiação e temperatura ambiente, é produzida uma curva de corrente e outra de potência. Para cada curva, buscou-se o ponto de máxima potência pois visa-se a maximização do volume bombeado, definindo-se assim o ponto de operação da potência disponível pelo módulo. O ponto de operação do subsistema hidráulico (pressão, vazão) deve ser obtido percorrendo a curva do conjunto poço + encanamentos (Figura 1), determinando-se a potência hidráulica e refletindo-a para os terminais dos módulos através da divisão dos rendimentos de cada componente. Logo para cada novo valor de irradiação, percorre-se toda a curva do conjunto poço + encanamentos, dividindo-se a potência de saída do subsistema hidráulico pelo rendimento de cada componente até que o pontos de potência elétrica disponível dos módulos e a potência hidráulica transferida aos terminais do módulo estejam o mais próximo possível. Em termos de implementação, isto significa que para cada tensão gerada, a bomba é acionada à máxima velocidade permitida pela potência disponível.

4.0 RESULTADOS OBTIDOS

Para esta simulação, considerou-se que a capacidade de regeneração do poço permite que rapidamente o nível estático de bombeamento seja estabelecido a uma profundidade de 5 m e que a água deve ser bombeada a uma altura de 4 m, resultando em uma altura estática inicial total de 9 metros. O ponto de operação se localiza sempre na curva do conjunto poço + encanamentos (controle por velocidade) com o ponto nominal do subsistema hidráulico, dado pelo ponto nominal da bomba, de 25m³/h de vazão e 15m de coluna d'água (retirados do catalogo do fabricante da bomba). Foram utilizados dados de irradiação e temperatura reais para um mês (31 dias) de verão e outro de inverno do Rio de Janeiro. As características usadas nestas simulações são as seguintes:

- Curva de irradiação para o dia 25 do mês de verão, dia representativo;

- Rendimento a plena carga da bomba de 66%;
- Rendimento a plena carga do motor de 84,0%;
- Altura total estática de 9,0 m
- Encanamento de 2"

Características da bomba:

- Pressão e Vazão Nominais de 15,0 m e 25,0 m³/s;

Características do motor:

- Indução, 2 pólos, trifásico, 60Hz, 220V, 2,0 cv

Características do módulo fotovoltaico:

- Potência máxima nominal de 75W; V_{mp} de 17,0 V, I_{mp} de 4,45 A, V_{oc} de 21,4 V e I_{sc} de 4,75 A;
- 8 conjuntos de seis módulos em série totalizando 48 módulos com 36 células por módulo.

Apresenta-se a seguir alguns resultados obtidos em ambiente MATLAB, a partir do dia representativo:

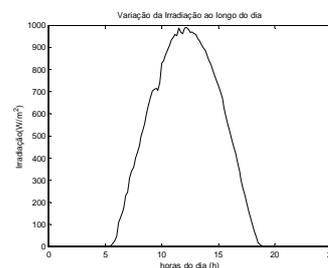


FIGURA 11 - (a) Curva de irradiação solar

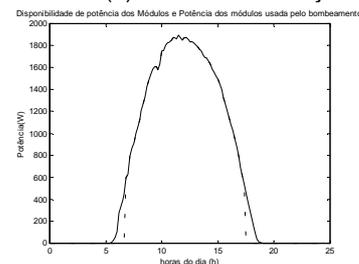


FIGURA 11 - (b) Disponibilidade de potência nos painéis (pontilhado) e Potência usada no acionamento (contínuo).

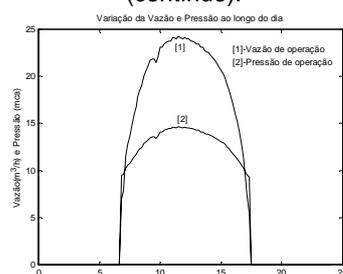


FIGURA 11 - (c) Vazão e Pressão ao longo do dia.

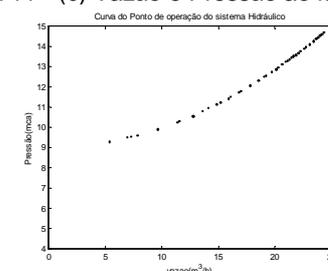


FIGURA 11 - (d) Pontos de operação ao longo do dia

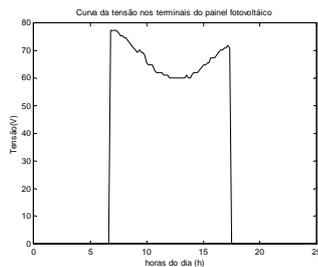


FIGURA 11 - (e) Perfil de tensão nos terminais dos módulos ao longo do dia.

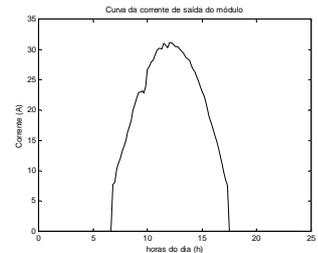


FIGURA 11 - (f) Perfil de corrente nos módulos ao longo do dia.

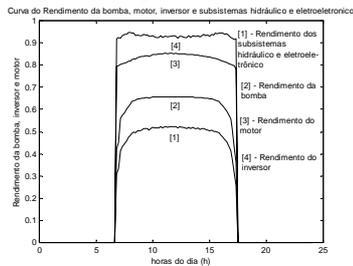


FIGURA 11- (g) Rendimentos: inversor, bomba e motor

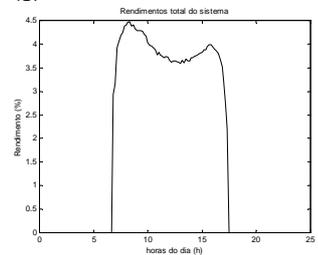


FIGURA 11 – (h) Rendimento global do sistema.

Mostra-se na Figura 12 o gráfico de Energia/dia X Vazão/dia que determina o volume bombeado no final do dia para uma dada energia solar disponível. Foram utilizados dados reais de 31 dias de um mês de inverno e 31 dias de um mês de verão. Este comportamento é aproximado por uma reta, dada pela Equação (7).

$$\text{Volume} = 0.02637 \cdot \text{Energia} + 25.3595 \quad (7)$$

A Equação (7) nos permite saber o quanto de volume pode ser conseguido no final do dia a partir da integral da curva de irradiação (Energia solar incidente nos módulos), e estimar a quantidade de água disponível no dia em questão. Na realidade trata-se de valores médios, na medida em que a forma da distribuição da radiação ao longo do dia também influencia este resultado.

Para comparar o volume bombeado, obteve-se, de uma curva Volume X Energia de um fabricante, um

volume diário de 145 m^3 para uma Energia de $7500 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$. Para simulação do dia representativo, no qual a energia disponível é similar, obteve-se um volume de 208 m^3 . Isto indica o benefício de se trabalhar com um sistema otimizado de bombeamento. Contudo isto deve ser encarado como um resultado preliminar, até que a validação experimental da modelagem seja concluída.

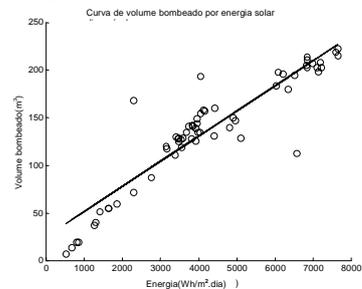


FIGURA 12 – Energia/dia x Volume em um mês nos dias de inverno e verão.

A partir da Figura 11 – (h), onde é apresentado o rendimento global do sistema, observa-se que o rendimento de 3,6% é encontrado em torno de meio dia. Este valor reduzido de rendimento, comparado ao valor máximo, que é de 4,5%, é decorrente do efeito da temperatura dos módulos, ou seja, o aumento da temperatura nestes, provoca uma queda de rendimento de 20% do rendimento global do sistema. Da Figura 11 – (g), curva [1], pode-se observar que o controle adequado do subsistema eletroeletrônico, permitiu o perfeito casamento entre os subsistemas hidráulicos e de geração fotovoltaica, com um rendimento em torno de 52%, em quase toda faixa de operação.

5.0 CONCLUSÕES

O trabalho apresenta a complexidade da integração das características dos diversos componentes de um sistema fotovoltaico de bombeamento d'água e mostra através de simulação como estas características podem ser integradas para um melhor desempenho.

O próximo passo será a validação experimental da modelagem desenvolvida em diversos sistemas reais de bombeamento. É importante ressaltar que conhecimento adquirido pode ser utilizado tanto no desenvolvimento de produtos como na especificação e monitoração de sistemas de bombeamento a serem instalados no Brasil. Ressalta-se que esforços para a redução de custos destes sistemas são importantes e podem facilitar o crescimento econômico de pequenas comunidades que vivem a margem do processo de desenvolvimento do país.

6.0 BIBLIOGRAFIA:

- (1) CEPEL – CRESESB, "Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos".
- (2) BP Solar, "Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento de Água".
- (3) Pottebaun, J.R, "Optimal Characteristics of a Variable-Frequency Centrifugal Pump Motor Drive", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-20, N° 1, 1984.