

GPT/004

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

GRUPO II

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

PROPOSTA E AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTÁICO PARA BOMBEAMENTO DE ÁGUA

Aymoré de Castro Alvim Filho
Selênio Rocha Silva

Carlos Barreira Martinez(*)

CPDEE / PPGEE - UFMG

CPH - UFMG

RESUMO

Este trabalho visa propor e avaliar, através de um estudo de caso, metodologias para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água utilizando-se um conjunto bomba centrífuga + motor de indução acionados à velocidade variável, a partir do perfil de consumo, da radiação solar e da temperatura. No que diz respeito à potência instalada de bombeamento, é avaliada a utilização de bombas em paralelo, a fim de aumentar a eficiência do bombeamento. Já quanto ao dimensionamento do sistema fotovoltaico, são avaliados vários métodos, entre convencionais e propostos, visando quantificar o impacto destas metodologias no atendimento à demanda.

Palavras chaves: Bombeamento Solar, Sistema Fotovoltaico, Planejamento Energético.

1.0 - INTRODUÇÃO

O bombeamento de água vem se tornando uma das principais utilizações de sistemas fotovoltaicos, o que cada vez mais incentiva não somente o mercado, com lançamento de novos produtos, como também as pesquisas na área.

São muitos os trabalhos que procuram otimizar o sistema fotovoltaico, tanto no que diz respeito à estratégias de controle (1) quanto no que diz respeito à utilização de equipamentos que venham a aumentar a eficiência do sistema (2). Contudo, são poucos os trabalhos que abordam o aspecto energético propriamente dito. Por exemplo, um aspecto bastante significativo nas regiões tropicais é a variação da temperatura ser inversamente proporcional à radiação, sendo o consumo de água diretamente proporcional à temperatura. Ou seja, estes três fatores agem em conjunto, para criar situações extremas quanto ao atendimento da demanda, tornando às vezes inviável a utilização de um valor médio, como o sol pleno.

Assim cabe, mesmo na avaliação de pequenos sistemas, uma análise mais detalhada e criteriosa. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo propiciar ferramentas metodológicas para um planejamento mais apurado, que propicie um dimensionamento face aos perfis de consumo, radiação e temperatura, possibilitando, inclusive, a interação com outras ferramentas, como de predição de séries temporais, possibilitando resultados mais consistentes no dimensionamento de sistemas híbridos. No final é apresentado um estudo de caso para ratificar as idéias expostas no decorrer do trabalho.

2.0 – CUSTO ENERGÉTICO DE BOMBEAMENTO

Este trabalho apresenta uma forma bastante interessante para conhecer a quantidade de energia consumida em cada ponto da faixa de operação: o custo energético de bombeamento CE (Wh/m^3), dado pela equação abaixo:

$$CE = \frac{Pat}{Q} = (2.72 \cdot 10^{-1}) \cdot \frac{\tilde{\alpha} \cdot H_{bb}}{\varphi_{total}} \quad (1)$$

Assim, sendo CE(Q_i) o custo energético em um dado ponto Q_i da faixa de operação, seu valor informa quanto de energia será consumida por unidade de volume bombeado neste exato ponto de operação. Isto é interessante, porque, através da característica do custo energético pode-se facilmente calcular a energia consumida por um sistema de bombeamento acionado em velocidade variável, bastando que se conheça a característica do acoplamento do sistema de bombeamento com a fonte geradora, ou fornecedora, de energia.

No caso de sistemas fotovoltaicos, conhecendo-se a característica $Pat=f(S)$, ou seja, conhecendo-se a relação dos pontos de operação com o nível de radiação, através do perfil de radiação e da característica $CE=f(Q)$, pode-se calcular a energia consumida pelo sistema.

(*) Centro de Pesquisas em Hidráulica e Recursos Hídricos, CPH/UFMG
Av. Antônio Carlos, 6227, Belo Horizonte-MG. CEP: 31270-020. E-mail: martinez@cce.ufmg.br

O CE pode ser obtido a partir das equações da máquina de indução em regime permanente, conhecendo-se o conjugado de carga (da bomba). A figura 1 mostra a característica CexQ para a instalação hidráulica utilizada no estudo de caso, acionada por uma motobomba de ½ cv, 3450 rpm.

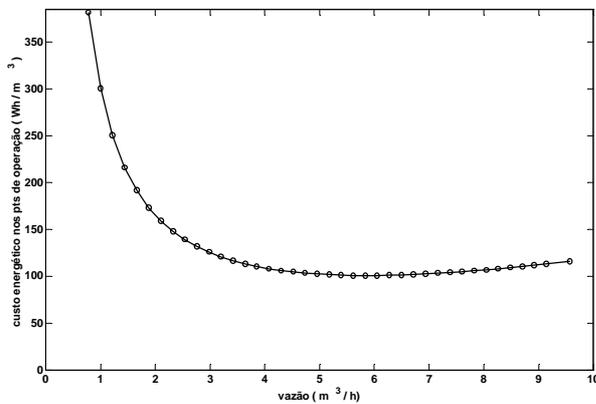


Figura 1 – Custo energético de bombeamento

3.0 – DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FV

Este trabalho visa propor e avaliar o impacto no perfil de consumo e nos custos (em Wpico) envolvidos de uma série de metodologias adequadas para o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água, a partir do perfil de consumo, da radiação solar e da temperatura, levando em consideração a disponibilidade dos dados.

Segue-se os seguintes passos: 1) estimativa da vazão de projeto; 2) escolha da tubulação a partir da elaboração de um ábaco apropriado para obtenção do diâmetro econômico, já que os custos envolvidos são bem maiores que os praticados no bombeamento convencional; 3) estimativa da potência do(s) conjunto(s) motor-bomba; 4) definição da quantidade de conjuntos motor-bomba a partir das características da instalação hidráulica, e dos custos envolvidos, possibilitando uma economia na potência fotovoltaica instalada; 5) dimensionamento do arranjo fotovoltaico.

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico são avaliadas as seguintes metodologias: a) dimensionamento pelo sol pleno, considerando-se apenas o consumo médio anual de água, não levando em consideração o efeito da temperatura ambiente; b) dimensionamento pelo sol pleno, considerando-se apenas o consumo médio, mas levando em consideração o efeito da temperatura ambiente; c) dimensionamento a partir do consumo médio e do perfil de radiação, visando a demanda anual, com temperatura de projeto igual à máxima entre as médias mensais; d) dimensionamento visando a demanda mensal, a partir dos perfis de temperatura, radiação e consumo.

3.1 - Estimativa da vazão de projeto

Para sistemas de bombeamento com bomba centrífuga trabalhando à velocidade variável e sem complementação energética, a escolha de dados de projeto que possam fornecer, com alguma consistência, a potência do conjunto motor-bomba não é tão claro quanto quando se trabalha à velocidade constante. De fato, não se tem uma vazão, nem uma potência, e muito menos intervalo de tempo para operação, já que a quantidade de horas de bombeamento depende da intensidade da radiação captada pelo arranjo. Depois, por se trabalhar à velocidade variável, todo um conjunto de pontos de operação contribuem para o total da energia consumida. Além destes fatos, ainda há o problema da característica da bomba centrífuga, onde tanto a altura manométrica quanto o rendimento dependem da vazão.

Pode-se, sem muitas complicações, a partir dos perfis de radiação e temperatura, e da característica do sistema hidráulico (com a motobomba), calcular a energia que, de fato, está sendo necessária. Mas isto só é possível após estabelecer-se qual a potência do conjunto motor-bomba. Assim sendo, este trabalho propõe que a potência do(s) conjunto(s) motor-bomba seja dimensionada a partir da idéia de que se obtém a vazão máxima, à potência máxima (nominal), sob radiação máxima. Assim, utilizando-se do conceito de sol pleno, pode-se dizer que, caso toda a energia solar diária disponível fosse obtida sob uma radiação constante de 1000 W/m², todo consumo diário V_{cons} teria que ser suprido neste intervalo de tempo (sol pleno), resultando em uma vazão máxima igual a:

$$Q_{\text{max}} = \frac{\bar{V}_{\text{cons}}}{sp} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (2)$$

Sendo \bar{V}_{cons} (m³) a média do consumo diário, e sp (h) o sol pleno (sobre sol pleno, consultar (3)).

3.2 - Determinação do diâmetro

O objetivo desta seção é propor uma equação para fornecer, para uma determinada vazão Q e rendimento η , o diâmetro da tubulação D com melhor custo benefício. Assim sendo, o diâmetro econômico será aquele que minimize a seguinte equação:

$$P\$_{\text{total}} = P\$_{\text{painéis}} + P\$_{\text{motobomba}} + P\$_{\text{tubos}} + P\$_{\text{inversor}} \quad (\text{US\$}) \quad (3)$$

Sendo P\$ (US\$) o preço.

Através de pesquisa de mercado, considerando-se que as perdas hidráulicas estáticas não dependem do diâmetro da tubulação, e considerando-se a equação de Flamant (4) para perdas hidráulicas em pvc rígido, chega-se à seguinte equação:

$$D_{\text{ótimo}} = \text{minimiz} \left(\begin{array}{l} 5000 \cdot \left(\frac{0,000824 \cdot \gamma}{\eta} \right) \cdot \left(\frac{Q^{2,75}}{D^{4,75}} \right) - \\ - 9742,21 \cdot D^3 + 2170,3 \cdot D^2 + \\ + 30,70 \cdot D - 0,00834, \end{array} \right) \quad (4)$$

Estando $D_{\text{ótimo}}$ relacionado com diâmetro interno do tubo.

3.3 - Determinação da potência motriz

Conhecendo-se a vazão $Q(\text{m}^3/\text{h})$ e a característica $H \times Q$ da instalação, sendo $H(\text{m})$ a altura manométrica, a potência do conjunto motor-bomba pode ser assim determinada:

$$P_{\text{bmot}} = \frac{(2,72E - 3) \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (5)$$

Sendo $\gamma=1000 \text{ kgf} / \text{m}^3$ o peso específico da água, e η o rendimento estimado do conjunto motor-bomba

3.4 - Escolha do número de motobombas

A oportunidade de se instalar bombas em paralelo leva a um aumento de vazão sem, contudo, aumentar a altura manométrica máxima. Outra vantagem é que se tem a opção de trabalhar só com uma bomba sob as radiações de menor intensidade, sendo que as demais iriam entrando em funcionamento com o aumento da potência disponível. Isto é vantajoso porque bombas menores tendem a exigir menores potências para pontos de operação coincidentes com os das bombas maiores. Assim, como a radiação está relacionada linearmente com a potência, isto significa que pode-se recalcar em radiações com menor intensidade quando se utiliza bombas de menor potência, possibilitando, assim, uma economia na potência fotovoltaica instalada.

A questão da quantidade de bombas resume-se, então, a saber qual a quantidade ideal de motobombas em paralelo que diminua a exigência de potência instalada, mas que, contudo, não onere mais ainda o custo final. Assim sendo, escolhida a quantidade de motobombas pode-se estabelecer os pontos de operação do conjunto, sempre levando em consideração as menores potências possíveis para um mesmo valor de vazão.

3.5 - Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

A) Método convencional (sol pleno)

O método convencional calcula, a partir dos dados de projeto e da média do consumo, a energia necessária para recalcar a água na instalação dada. Assim sendo, a potência instalada é dada por:

$$P_{\text{inst}} = \frac{2,72 \cdot \bar{V}_{\text{cons}} \cdot H_{\text{bb}}}{\eta \cdot \text{sp}} \quad (6)$$

B) Convencional + efeito da temperatura (perfil mensal)

A partir dos perfis de temperatura e radiação, e das características do painel, pode-se obter o perfil de potência produzida pelo módulo. Dividindo-o, então, pela potência nominal do módulo, obtém-se o que aqui se denomina potência por unidade de W_{pico} , P_{fvpu} . Assim sendo, a potência instalada será:

$$P_{\text{inst}} = 365 \cdot \frac{\left(\frac{2,72 \cdot \bar{V}_{\text{cons}} \cdot H_{\text{bb}}}{\eta \cdot \text{sp}} \right)}{\sum_{i=1}^n P_{\text{fvpu}}(S_i) \cdot \Delta t_i} \quad (7)$$

Onde $P_{\text{fvpu}}(S_i)$ é a potência por unidade correspondente à radiação S_i , com determinada frequência horária Δt_i no ano, operando sob a temperatura oriunda do perfil mensal(3).

C) Dimensionamento visando a demanda anual a partir do perfil de radiação, utilizando a temperatura máxima

Dependendo do intervalo de operação $[Q_{\text{min}}, Q_{\text{max}}]$ e do correspondente intervalo de radiação $[S_{\text{min}}, S_{\text{max}}]$ haverá diferentes valores de potência instalada e diferentes quantidades de volume recalçados, havendo, portanto, uma gama de opções. A escolha da melhor opção segue dois princípios: a única grandeza que, por definição, é linearmente proporcional à radiação é a potência; e a radiação máxima para todos os intervalos de faixa de operação estudados é $S=1000 \text{ W/m}^2$, já que não vale a pena desperdiçar, por menor que seja, a energia disponível para valores vizinhos de $S=1000 \text{ W/m}^2$. Outro fato é que todo o processo é feito levando-se em consideração o perfil anual de energia, para uma determinada temperatura de projeto.

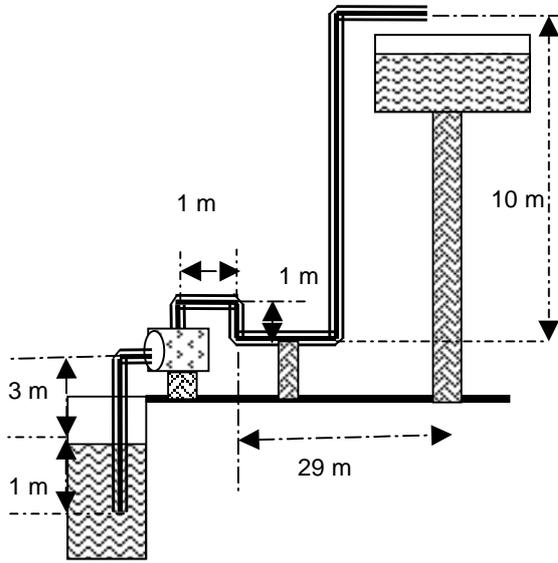
Assim sendo, com base na faixa operacional possível dada as restrições da instalação hidráulica, testa-se para uma certa quantidade de pontos qual a melhor relação $P_{\text{bmot}} = f(S)$ que atenda à demanda e necessite da menor quantidade possível de potência instalada (em Watt-pico). Assim, a opção será pelo intervalo que oferecer o menor custo em relação ao volume demandado, e, caso haja vários intervalos que atendam a este critério, escolhe-se pelo intervalo que oferecer o menor custo por volume recalçado.

D) Dimensionamento visando a demanda mensal a partir dos perfis mensais de radiação e temperatura

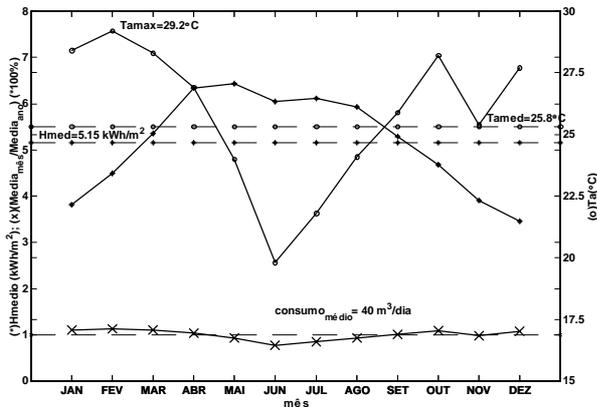
O procedimento é praticamente o mesmo anterior, só que leva em consideração o perfil mensal de radiação, temperatura e consumo. Neste caso visa-se o atendimento da demanda em todos os meses, induzindo a um reservatório para regularização mensal. Maiores detalhes serão vistos no estudo de caso.

4.0 – ESTUDO DE CASO

A figura 2 caracteriza o estudo de caso, mostrando um esboço da instalação hidráulica (Figura 2a), em pvc, e os perfis mensais de radiação (5), temperatura (cedido pela CEMIG) e consumo (Figura 2b).



(a)



(b)

Figura 2 – Caracterização do estudo de caso

O perfil de consumo está apresentado como razão do consumo médio

Vazão de projeto

A vazão de projeto é obtida segundo a Equação 2:

$$Q_{max} = \frac{40 \text{ m}^3}{5,181} \cong 8 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Escolha da tubulação

Considerando-se a vazão de projeto e estimando-se um rendimento de 0,4, obtém-se, a partir da Equação 4 o diâmetro econômico:

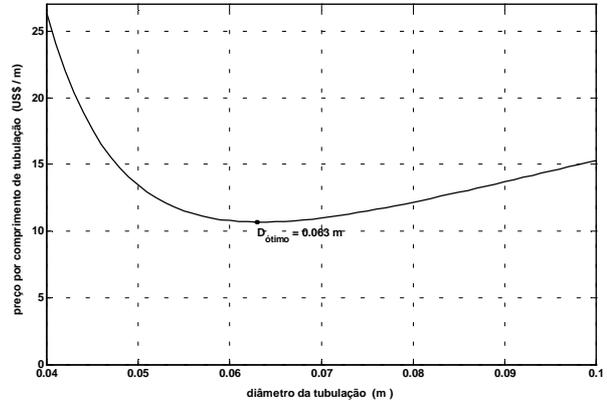


Figura 3 – Diâmetro econômico

Potência motriz

De posse do diâmetro da tubulação, a altura manométrica para a vazão dada pode ser obtida pela equação de Flamant para tubos de pvc:

$$H(Q) = 4,9249 \cdot L_{total} \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} + H_0 = 13,8 \text{ m}$$

Assim a potência total é dada por:

$$P_{bmot} = \frac{(2,72) \cdot 8 \cdot 13,8}{0,4} \cong 750 \text{ W} \cong 1 \text{ cv}$$

Escolha do número de motobombas

Por se tratar de um sistema pequeno, de 1 cv, serão consideradas somente 2 configurações: 1x 1cv e 2x 1/2 cv (BC91s, 3450 rpm, Schneider (6)). As figuras 4 e 5 mostram, respectivamente, as curvas de rendimento e custo energético para as opções consideradas, além da curva para 1x 1/2 cv. Em destaque, a curva referente à opção operacional mista (1x 1/2 cv + 2x 1/2 cv).

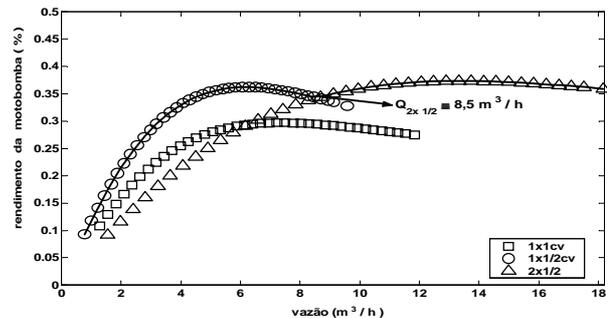


Figura 4 – Rendimento total do sistema

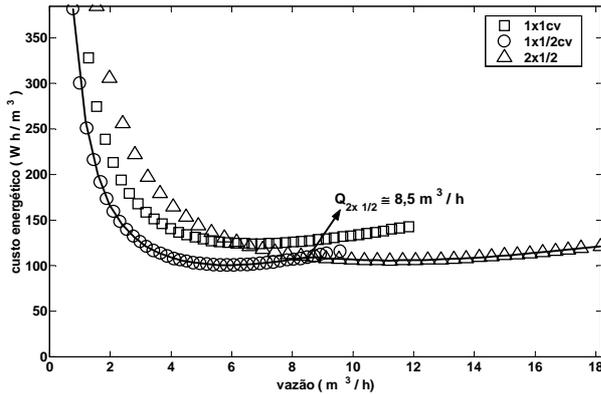


Figura 5 – Custo energético do sistema

Como se pode perceber, a operação conjunta das duas bombas de $\frac{1}{2}$ cv apresenta um custo energético menor que o sistema 1x 1cv somente para uma parte da faixa operacional. Contudo, a operação com um única bomba de $\frac{1}{2}$ cv apresenta um custo menor justamente na faixa onde a operação conjunta das duas bombas é menos vantajosa que o sistema 1x 1cv. Assim sendo, a operação mista (1x $\frac{1}{2}$ cv + 2x $\frac{1}{2}$ cv), além de possibilitar maiores vazões, apresenta o menor custo energético em toda a faixa operacional, ou seja, exige menor potência, economizando na quantidade de módulos fv. Isto acontece porque este sistema sempre apresenta o maior rendimento, entre as opções consideradas, qualquer que seja o ponto de operação (ver Figura 4). Nas figuras 4 e 5 também está indicado a vazão correspondente ao ponto operacional a partir do qual o sistema deve passar a utilizar as duas bombas de $\frac{1}{2}$ cv.

Dimensionamento do arranjo fotovoltaico

Para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico, baseado nas características dos módulos (SM55 (7)), foram avaliadas as 4 opções metodológicas (A, B, C e D) apresentadas na Seção 3.5. Os resultados estão em termo da potência instalada do arranjo fv (Wp) (Figura 6), do balanço anual de água (Figura 7) e do balanço mensal de água (Figura 8), sendo os dois últimos apresentados em percentagem da demanda.

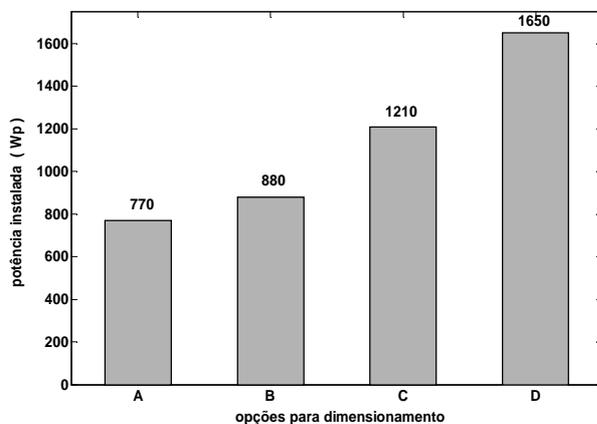


Figura 6 – Potência instalada

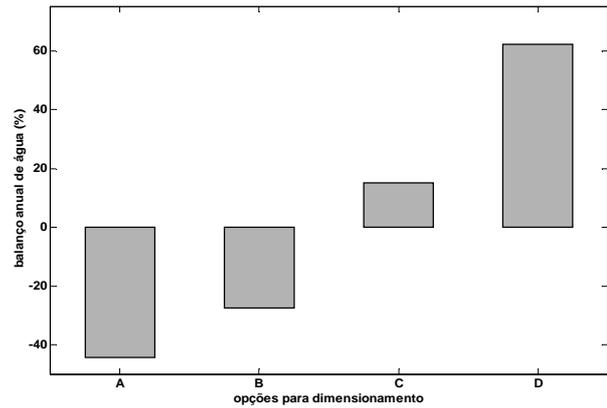


Figura 7 – Balanço anual de água

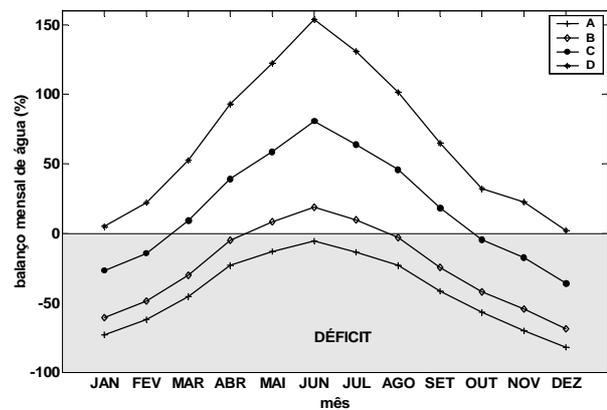


Figura 8 – Balanço mensal de água

Analisando os resultados apresentados nas figuras de 6 a 8, percebe-se que o fato de se trabalhar com valores médios de radiação (sol pleno) incorre em subdimensionamento do sistema, apresentando déficit anual da ordem de 40% se negligenciada a temperatura; ou, na melhor das hipóteses, de 20%, dimensionando-se através do perfil mensal de temperatura. Já ao se projetar levando-se em consideração o perfil de radiação (no caso, mensal), nota-se que, de fato, o balanço anual é positivo. Contudo o balanço mensal apresenta déficit nos meses de outubro a fevereiro, sendo da ordem de 30% no pior caso (dezembro). Pode-se corrigir este fato projetando-se a partir dos perfis de radiação e temperatura visando a demanda mensal. De fato, o balanço mensal é sempre positivo, apresentando, ainda, uma quantidade de água recalçada muito acima da demanda exigida para consumo direto.

A fim de fechar o balanço mensal (caso D), o investimento em módulos fv é aproximadamente 36% superior ao caso C. Contudo, o excesso de água apresentado pode ser utilizado para, por exemplo, gerar energia elétrica através de bft (bomba funcionando como turbina) (8). Ou, então, dependendo da região e dos interesses envolvidos, ser aproveitado para irrigação, já que os meses de excesso de água recalçada coincidem com o período seco.

Contudo, caso não haja interesse em se fechar o balanço mensal, pode-se, por exemplo, utilizar fontes complementares. Pode-se, ainda, fazer um planejamento de utilização da água, preocupando-se, pelo menos, com o fechamento do balanço anual. Para tanto, são úteis as informações retornadas pelo projeto através do método C, que, dentre as opções visando a demanda anual, fornece o maior valor de potência instalada, pois utiliza para o projeto a máxima entre as médias mensais de temperaturas.

As Figuras 9 e 10 mostram o comportamento do sistema de recalque ($1x \frac{1}{2} cv + 2x \frac{1}{2} cv$) frente aos perfis de temperatura e de radiação disponível (método C). A fim de comparação, mostra-se o de um sistema $1x 1cv$.

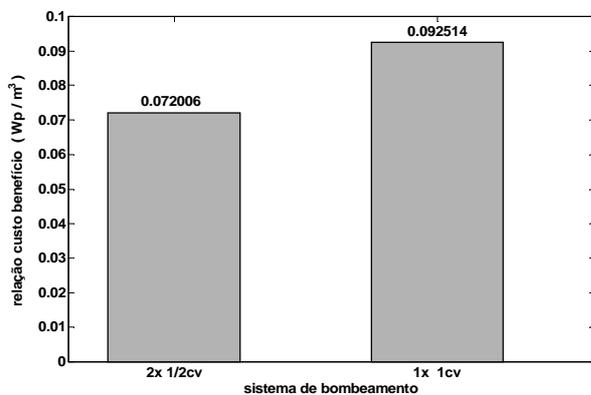


Figura 9 – Relação custo-benefício

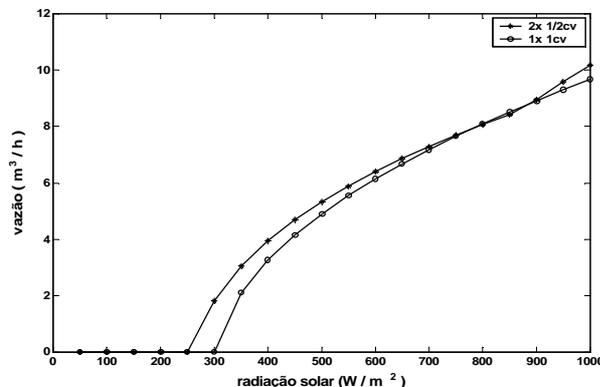


Figura 10 – Característica operacional

Observa-se que o sistema $2x \frac{1}{2} cv$ proporciona uma relação custo-benefício menor que o sistema $1x 1cv$. Isto é, necessita de menos potência instalada para recalcar o mesmo volume de água. Isto porque o primeiro inicia o bombeamento em um nível de radiação solar menor, além de proporcionar vazões maiores para um mesmo nível de radiação.

5.0 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma seqüência de passos visando o projeto de um sistema de bombeamento fotovoltaico, utilizando motor de indução e bomba centrífuga, baseado nas peculiaridades da operação à

velocidade variável e nas características da utilização da energia solar.

Quanto ao dimensionamento do sistema de recalque, verificou-se que a instalação de bombas em paralelo pode proporcionar um custo significativamente inferior à instalação de uma só bomba, mesmo para sistemas de pequeno, ou médio porte, como o apresentado pelo estudo de caso. Já quanto ao dimensionamento do arranjo fotovoltaico, foram avaliadas quatro metodologias, que se distinguem pela negligência, ou não, da influência da temperatura; pela utilização de valores médios ou do perfil de radiação e de temperatura; e pelo objetivo do atendimento à demanda, visando o balanço anual ou mensal. Observou-se que negligenciar a temperatura, ou utilizar valores médios conduzem a déficit no balanço anual, o que não ocorre se for levado em consideração os perfis locais. Contudo, somente visando o balanço mensal, pode-se evitar déficit nos períodos de menor disponibilidade energética, o que implica em um investimento maior (36%, no caso estudado) que o obtido quando se visa o balanço anual. Assim sendo, dependendo dos interesses envolvidos, pode-se optar por uma destas duas opções de projeto, já que ambas fornecem dados suficientes para realização de um planejamento para utilização da água.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MOURÃO FILHO, A.P., GARCIA, P.F.D., SILVA, S.R., An efficient ac water pumping fotovoltaic system, Proceedings of World Renewable Energy Congress. IV, Vol. 3, 1996.
- (2) LANGRIDGE, D., LAWRENCE, W., WICHERT B. Development of a photo-voltaic pumping system using a brushless d.c. motor and helical rotor pump. Solar Energy, Vol. 56, pp 151-160, 1996.
- (3) GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. CRESESB/CEPEL. 1995.
- (4) VIANNA, M R. Instalações elétricas prediais, 2^a ed. Imprimatur Artes LTDA Belo Horizonte – MG, 1998.
- (5) ALVIM FILHO, A de C. Avaliação econômica do fornecimento de energia elétrica a partir de fontes de energia solar e eólica para sistemas isolados. Dissertação de Mestrado. PPGEE/UFMG. Belo Horizonte - MG, 1999.
- (6) SCHNEIDER. Catálogo geral de bombas e motobombas. Joinville-SC, 1997
- (7) SIEMENS S.A., Módulos Solares. Catálogo Técnico, 2000.
- (8) OLIVEIRA, D.M.N., MARTINEZ, C.B., SILVA, S.R.; ALVIM FILHO, A.C. Sistemas de fornecimento de energia elétrica híbrido solar hidráulico. 3^o Encontro de energia no meio rural, 2000. UNICAMP, Campinas- SP, 2000.