

## SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO COM IMPLEMENTAÇÃO DE PROCURA DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Tomás Perpetuo Corrêa – tpcorrea@uol.com.br

Selênio Rocha Silva – selenios@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

### 3.5 – Sistemas Fotovoltaicos Autônomos e Híbridos

**Resumo.** Este artigo apresenta a montagem de um sistema de bombeamento utilizando energia fotovoltaica, motor de indução trifásico e bomba centrífuga. Uma variação do método de procura do ponto de máxima potência condutância incremental foi implementada. Um sistema supervisor está sendo montado para monitorar o sistema e primeiros resultados obtidos são apresentados.

**Palavras-chave:** Bombeamento de água, MPPT, Energia fotovoltaica.

## 1. INTRODUÇÃO

O bombeamento de água utilizando energia fotovoltaica é uma aplicação amplamente conhecida e diversos trabalhos já foram realizados nessa área, (Mourão Fo.,1995), (Heng et al., 2005), (Kulun et al., 2001) e (Vongmanee, 2004). De todas as possíveis configurações do sistema de bombeamento, aquelas que dispensam o uso de armazenadores de energia e utilizam motores de indução com rotor em gaiola são as que mais se destacam, por apresentarem um menor custo inicial, baixo custo de manutenção e bom rendimento.

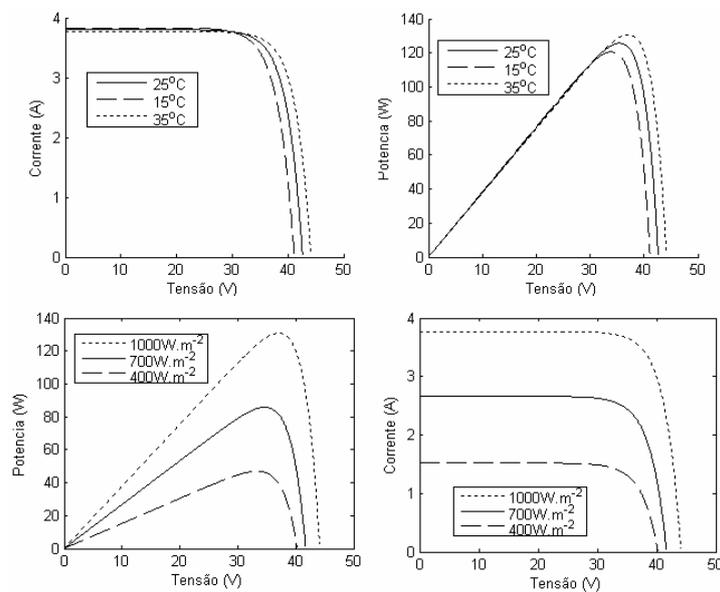


Figura 1 – Características de um painel solar

Um sistema de bombeamento autônomo foi montado em laboratório utilizando 12 painéis fotovoltaicos (PV's), fornecendo a potência de 1440Wp. Um inversor estático desenvolvido explicitamente para este projeto, controlado por DSC (Controlador Digital de Sinais), monitora a tensão e a corrente dos painéis e os mantém trabalhando próximos ao ponto de máxima potência

(PMP). Tal inversor alimenta um motor de indução com rotor em gaiola de 1cv, que por sua vez aciona uma bomba centrífuga, ambos equipamentos disponíveis no mercado nacional.

As características intrínsecas da conversão de energia pelo processo fotovoltaico fazem com que a eficiência de conversão de painéis baseados em silício seja baixa. O valor máximo teórico é próximo a 40% (Pierret, 1995), porém painéis comerciais de silício monocristalino têm eficiência entre 12-15%. Além disso, a mudança de temperatura, cujo efeito principal é a diminuição da tensão dos módulos, e da irradiação, que é proporcional à corrente de curto-circuito, altera o ponto de operação no qual se obtém eficiência máxima (Fig. 1)

Uma das maneiras de melhorar o desempenho do sistema é a utilização de algum algoritmo de procura do ponto de máxima potência (MPPT, na sigla em inglês). Entre os diversos propostos na literatura, o que apresenta melhores resultados é o da condutância incremental (Oliveira et al., 2005). Este foi o método escolhido para implementação neste trabalho, com algumas modificações.

O sistema supervisorio utiliza como plataforma o LabView e monitora as tensões e correntes do sistema, além da vazão de água da bomba. Ele permite uma avaliação contínua do desempenho do sistema e seu aprimoramento. Neste trabalho serão apresentados os aspectos de projeto e os resultados de desempenho alcançado.

## 2. SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

O sistema construído em laboratório, ilustrado na Fig. 2, é composto pelos módulos fotovoltaicos, inversor trifásico, motor de indução e bomba centrífuga.

Serão apresentados nas próximas subseções os detalhes mais relevantes do sistema.

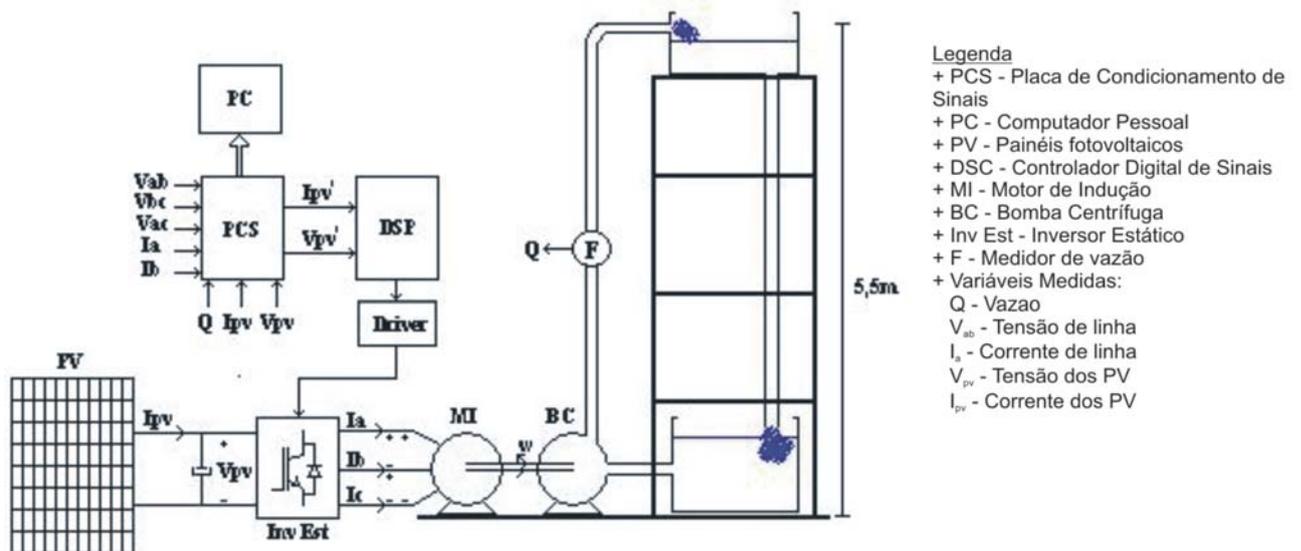


Figura 2 – Desenho esquemático do sistema

### 2.1 Bomba Centrífuga

A bomba centrífuga utilizada na montagem é uma bomba comercial, a mesma que em (Miranda, 1997). As curvas que caracterizam a operação de uma bomba são as de altura manométrica ( $H_{man}$ ) e de rendimento ( $\eta_b$ ), ambas em função da vazão (Q). Porém, como nesta aplicação trabalha-se com a bomba à velocidade variável, estas curvas se transformam em superfícies nas coordenadas altura manométrica ou rendimento, vazão e velocidade de rotação.

O modelo matemático da bomba é explicitado nas eqs. 1-5, onde  $N_r$  é a rotação da bomba em rpm,  $H_{est}$  é a altura manométrica estática,  $\Delta H$  são as perdas de carga,  $P_{mec}$  a potência mecânica no

eixo,  $\gamma$  é uma constante de proporcionalidade e  $a_{1-4}$  e  $k_{b1-6}$  são constantes determinadas experimentalmente.

$$H_{man} = a_1 \cdot Q^2 + a_2 \cdot Nr \cdot Q + a_3 \cdot Nr^2 \quad (1)$$

$$H_{man} = H_{est} + \Delta H \quad (2)$$

$$\Delta H = a_4 \cdot Q^2 \quad (3)$$

$$\eta_b = y_1 \cdot Q^2 + y_2 \cdot Q \quad (4)$$

$$y_1 = k_{b1} \cdot Nr^2 + k_{b2} \cdot Nr + k_{b3} \quad (5)$$

$$y_2 = k_{b4} \cdot Nr^2 + k_{b5} \cdot Nr + k_{b6}$$

$$P_{mec} = \frac{\gamma \cdot H_{man} \cdot Q}{\eta_b} = f(Nr) \quad (6)$$

As constantes obtidas por (Mourão Fo., 1996) para a mesma bomba são apresentadas na Tab 1.

Tabela 1 – Parâmetros da bomba centrífuga

$a_1$	$a_2$	$A_3$	$A_4$	$k_{b1}$
$-4,7 \cdot 10^{-2}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$4,02267 \cdot 10^{-2}$	$-7,1975 \cdot 10^{-7}$
$k_{b2}$	$k_{b3}$	$k_{b4}$	$k_{b5}$	$k_{b6}$
$2,87114 \cdot 10^{-3}$	$-3,10529$	$5,6776 \cdot 10^{-6}$	$-2,10573 \cdot 10^{-2}$	$25,421456$

A Fig. 3, obtida através das eq. 1-5 com os parâmetros da tab. 1, mostra o gráfico de vazão em função da velocidade da bomba, considerando  $H_{est}$  igual a 5,5m. As perdas de carga utilizadas correspondem aproximadamente as do circuito hidráulico atual, porém foram procedidas algumas alterações ainda não contabilizadas no modelo, que exigirá futuras estimativas.

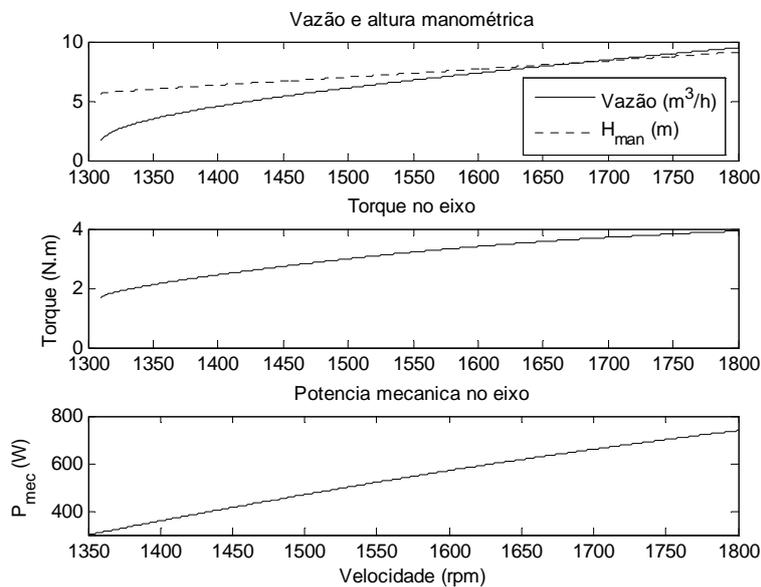


Figura 3– Vazão, altura manométrica, torque e potência mecânica em função da velocidade de rotação

Como é possível ver pela Fig. 3, começa-se a bombear água somente quando  $Nr$  ultrapassa 1310 rpm. Por esse motivo, foi implementada uma estratégia de partida que acelera o motor em rampa até 1300 rpm, aproximadamente. Se a irradiação é suficiente para que o motor atinja esta velocidade, o algoritmo de MPPT assume e a velocidade do motor flutua procurando sempre o

ponto de máxima potência. Caso contrário, o sistema entra em repouso e uma nova tentativa é realizada após um período de tempo determinado (atualmente ajustado para 1 minuto).

## 2.2 Motor de Indução

Foi usado um motor de indução com rotor em gaiola de 1cv, 4 polos, 220V, da linha Alto Rendimento Plus, fabricado pela WEG. O ensaio padronizado por IEEE Std 112-2004 foi realizado para se determinar os parâmetros do circuito equivalente (Fig. 4).

Utilizando o circuito equivalente obtido, foi feito um estudo de forma a obter um melhor rendimento do motor para todas as velocidades de interesse (de 1300rpm a 1800rpm). Optou-se por realizar o controle da velocidade do motor em malha aberta, por questão de simplicidade e baixo custo financeiro.

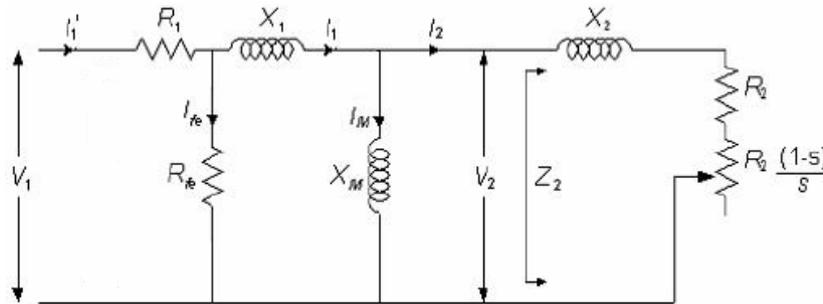


Figura 4– Circuito por fase equivalente do motor de indução (MI) ligado em delta

Tabela 2 – Parâmetros do circuito equivalente do MI

	$X_1$ e $X_2$	$X_m$	$R_{fe}$	$R_1$	$R_2$
SI ( $\Omega$ )	8,866	181,488	2642,072	8,975	5,569
p.u.	0,1857	3,8007	55,3298	0,1880	0,1166

Fazendo a análise do regime permanente do motor (utilizando o circuito equivalente mostrado na fig. 4 e os dados apresentados na tab. 2) descobriu-se que é possível aumentar consideravelmente o seu rendimento se, ao invés de operá-lo a tensão/frequência ( $V_s/\omega$ ) constante, a variação da tensão na frequência seguir a função de  $V_1$  na Fig. 5. Esta tensão faz com que, para a carga modelada, o motor trabalhe com rendimento aproximadamente constante e em valor mais elevado.

## 2.3 Método de MPPT

Como foi mencionado na introdução, os painéis possuem um ponto de operação, para cada condição de irradiação solar e temperatura, no qual fornecem a máxima potência. Dentre todos os métodos de MPPT, o que apresentou melhor resultado foi o da Condutância Incremental (CI) (Oliveira et al., 2005). Este utiliza medições de tensão e corrente para determinar a inclinação da curva  $V \times P$  (Eq.(6)), através de perturbações no ponto de operação do sistema, e determina em qual sentido o sistema deve ser deslocado.

$$\frac{\partial P}{\partial V} = I + V \cdot \frac{\partial I}{\partial V} \approx I + V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (6)$$

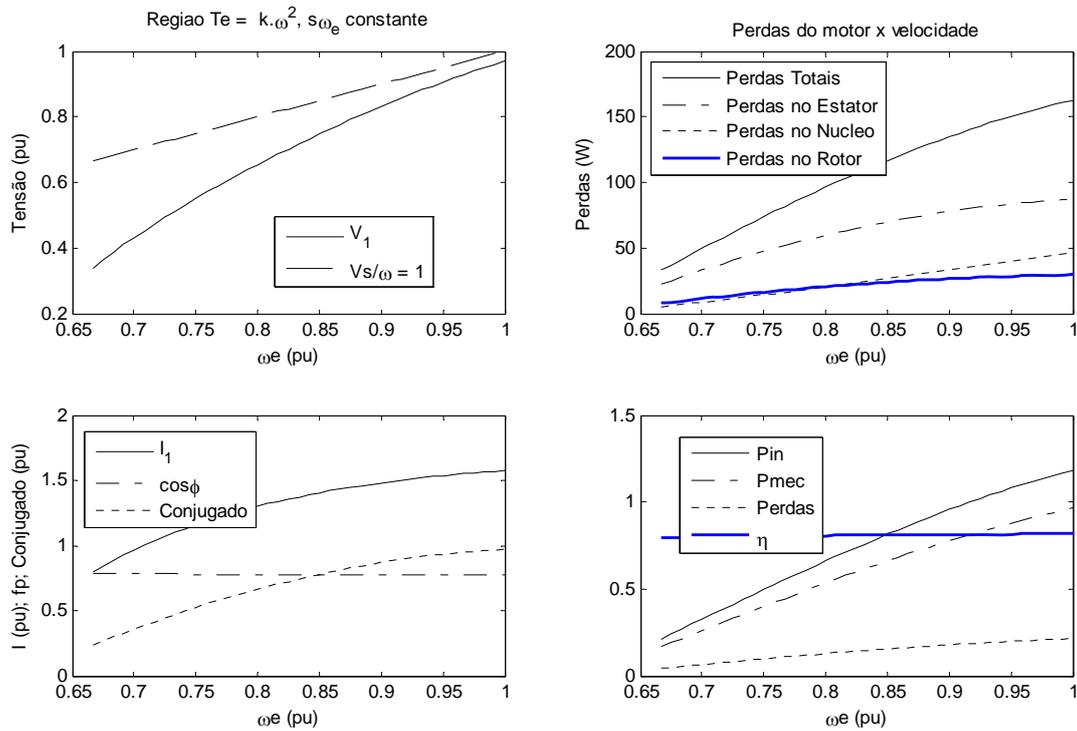


Figura 5– Grandezas do MI na condição de  $\eta$  constante<sup>1</sup>

Devido à implementação do sistema de controle em DSC de ponto fixo, a Eq. (6) trás alguns problemas numéricos devidos à divisão. Para contornar este problema, (Heng et al., 2005) propôs a adoção de uma lógica chamada por ele de algoritmo de critérios múltiplos. A Tab. 3 reproduz o que foi proposto.

Tabela 3 – Lógica do algoritmo de critério múltiplo

Critério			Frequência	Estado do Sistema
$\Delta P$	$\Delta V$	$\Delta I$		
<0	<0	<0	diminui	irradiação diminuiu
<0	<0	$\geq 0$	diminui	fonte de corrente
<0	$\geq 0$	<0	aumenta	fonte de tensão
>0	<0	$\geq 0$	aumenta	fonte de tensão
>0	$\geq 0$	<0	diminui	fonte de corrente
>0	>0	>0	aumenta	irradiação aumentou
=0	--	--	--	PMP

Como foi mostrado, é possível variar a potência consumida pela bomba variando a velocidade do motor. Dessa forma, consegue-se alterar o ponto de operação dos painéis e levá-los para o PMP. Porém, é importante lembrar que a potência da bomba varia com o cubo da velocidade. Com isso, ao se usar uma variação na frequência de alimentação ( $\Delta\omega$ ) constante, tem-se variações de potência diferentes de acordo com o ponto de operação.

Através de Eq.(7), onde  $\omega_0$  representa a frequência do ponto de operação, pode-se facilmente determinar o  $\Delta\omega$  em cada velocidade  $\omega_0$  de modo que se tenha uma variação linear na potência de saída ( $\Delta P$ ). Obviamente, as constantes apresentadas dependem muito do motor e bomba utilizados, da altura manométrica estática e das perdas de carga. Apesar disso, mesmo errando os parâmetros  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ , tem-se uma variação mais linear de  $\Delta P$  que as com  $\Delta\omega$  constante.

<sup>1</sup> Todas as grandezas estão em por unidade (pu), exceto quando explicitado.  $P_b = 756W$ ,  $V_b = 220V$ .

$$P \approx a_1 \cdot \omega^3 + a_2 \cdot \omega^2 + a_3 \omega$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta \omega} \approx 2a_1 \cdot \omega^2 + a_2 \cdot \omega + a_3 \tag{7}$$

$$\Delta \omega(\omega_0) \approx \frac{\Delta P}{2a_1 \cdot \omega_0^2 + a_2 \cdot \omega_0 + a_3}$$

### 3. SISTEMA SUPERVISÓRIO

Um sistema de aquisição de dados está em fase de montagem. Atualmente, já são realizadas medições de tensão e corrente nos painéis, tensões e correntes no motor e vazão na bomba. Além disso, a referência de frequência utilizada no DSC é, através de um conversor digital-analógico (D/A), monitorada.

O sistema terá ainda sete medições de temperatura, sendo uma medição para cada conjunto de painéis (6) e uma medição próxima ao sensor de irradiação solar. O piranômetro que será utilizado é do modelo Li-200, fabricado pela Li-Cor. Este instrumento foi recentemente calibrado e está aguardando apenas o circuito de condicionamento de sinais.

Os sinais medidos são convertidos por uma placa de aquisição de dados da *National Instrument*, modelo NI DAQPad 6016, e um programa em LabView está sendo desenvolvido para funcionar como instrumento virtual. Ele também será o responsável por fazer a gravação contínua dos dados, permitindo uma melhor análise dos resultados obtidos.

### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Apesar do sistema supervisorio não se encontrar plenamente construído, várias medições podem auxiliar na avaliação prévia do desempenho do sistema. Contudo, uma análise mais precisa poderá ser procedida em trabalhos futuros.

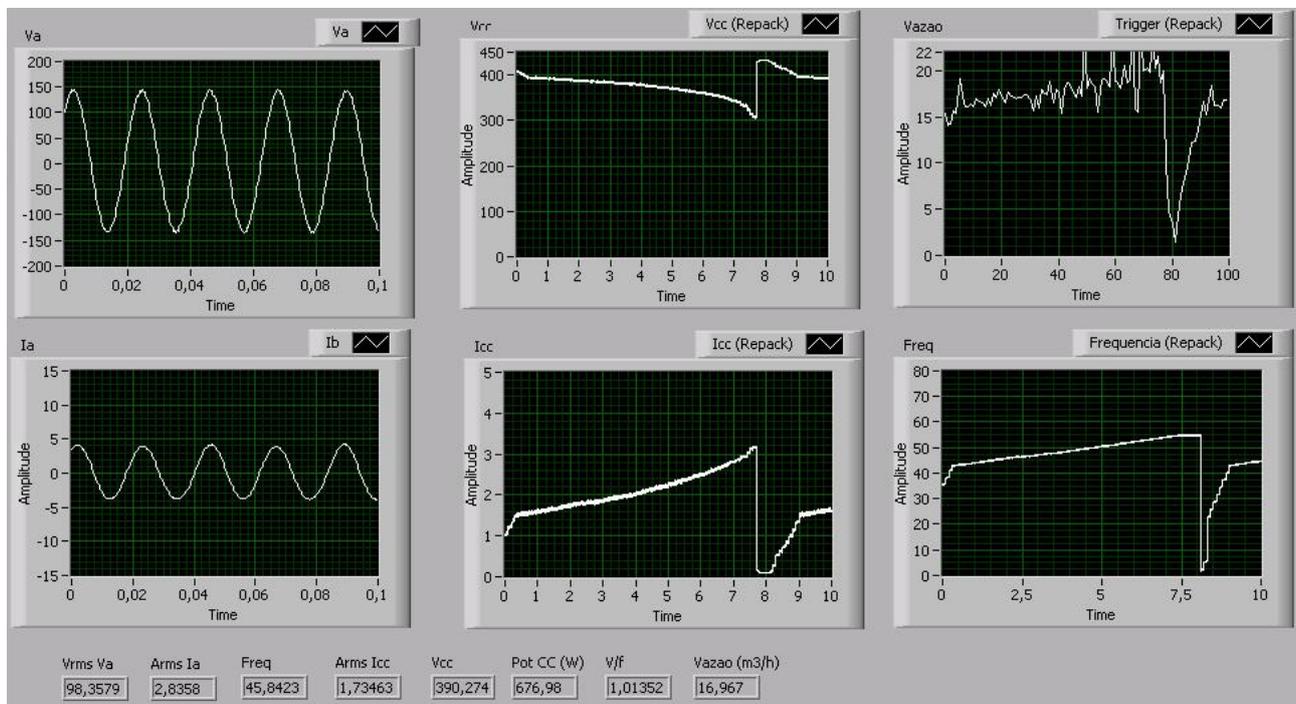


Figura 6 – Programa Supervisorio

A Fig. 6 mostra a interface do programa desenvolvido em LabView. São mostrados na tela uma tensão de fase do motor (Va), uma corrente de linha (Ia), a tensão e corrente nos painéis (Vcc e Icc),

a frequência de comando do inversor (Freq) e a vazão de água (Vazao). As escalas de tempo estão todas em segundos, exceto no gráfico de vazão de água que está em amostras.

Pode-se verificar pelos gráficos apresentados na Fig. 6 que o algoritmo de MPPT acelera o motor, tentando levá-lo para o ponto de máxima potência, porém os módulos começam a entrar na região fonte de corrente e o sistema perde estabilidade. Quando a tensão cai abaixo de 300V, o controle corta os pulsos dos IGBT's e o sistema parte novamente.

Esta instabilidade é uma característica implícita do sistema em estudo e diversas soluções estão sendo estudadas. Uma delas está relacionado ao correto dimensionamento do período de execução do algoritmo e do  $\Delta\omega$ . Uma solução para a escolha destes parâmetros, porém para o método perturba e observa, é apresentado em (Femia, 2005) e alternativas a ela estão sendo desenvolvidas.

## **5. CONCLUSÕES**

Foi apresentado neste trabalho o sistema fotovoltaico de bombeamento de água de 1,44kWp que está fase de conclusão no Laboratório de Conversão e Controle de Energia da UFMG (LCCE/UFMG). Os aspectos gerais de projeto foram apresentados e algumas formas de melhorar a eficiência do sistema.

O grande desafio consiste em otimizar ao máximo as estratégias de controle e seus parâmetros, tendo em vista o preço inicial elevado dos módulos fotovoltaicos. Além da otimização, torna-se importante uma generalização das soluções encontradas.

Alguns resultados iniciais foram apresentados. Embora não sejam conclusivos, eles mostram um problema importante e particular à aplicação apresentada, a perda de estabilidade do sistema.

A modelagem completa do sistema e sua análise são alvos dos trabalhos atuais e tem como objetivo metodológico a solução dos problemas apresentados.

### ***Agradecimentos***

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo fornecimento da bolsa de iniciação científica e ao prof. Lauro Vilhena Machado Neto e toda a equipe do GREEN/PUC Minas que gentilmente calibraram o piranômetro.

## **REFERÊNCIAS**

- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., 2005. Optimization of Perturb and Observ Maximum Power Point Tracking Method, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 20, No. 4, pp – 963-973.
- Heng, G., Zheng, X., You-Chun, L., Hui, W., 2005. A Novel Maximum Power Point Tracking Strategy for Stand-alone Solar Pumping Systems, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China.
- IEEE Std 112-2004, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, Nova Iorque.
- Kulun, C., Chengming, Z., Liqiang, Y., 2001. Implementation of a Stand-alone Photovoltaic Pumping System With Maximum Power Point Tracking. Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference, Vol.1, pp 612 – 615.
- Miranda, M. S., 1997. Análise de um Sistema Eólico-Elétrico Para Bombeamento de Água Utilizando Gerador de Indução Isolado, Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFMG, Belo Horizonte.
- Pierret, R. F., 1995. Semiconductor Device Fundamentals. Prentice Hall, 2a. edição.
- Mourão F., A. P., 1995. Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema de Bombeamento de Água Utilizando Motores de CA Alimentados por Painéis Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFMG, Belo Horizonte.

- Vongmanee, V., 2004. The Photovoltaic Pumping System Using a Variable Speed Single Phase induction motor drive controlled by field oriented principle. The 2004 IEEE Asia-Pacific Conference on Vol. 2, pp. 1185 – 1188.
- Oliveira, K. C., Cavalcanti, M. C., Azevedo, G. M. S. e Neves, F. A. S., 2006. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Systems. Anais da VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais / INDUNSCON, Recife/PE.

## **PHOTOVOLTAIC PUMP SYSTEM WITH IMPLEMENTATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKER**

***Abstract.*** *This papers presents an implementation of a photovoltaic pump system that uses an induction squirrel-cage motor to drive a centrifugal pump. A variation of the maximum power point tracker method Incremental Conductance was implemented and the first results are shown.*

***Key words:*** Water pump system, MPPT, Photovoltaic Energy.