



**XXIII SNPTTE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/27
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – II

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

SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-EÓLICO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA: CONFIGURAÇÃO, OPERAÇÃO E PARTICULARIDADES

**Alaan Ubaiara Brito (*)
UNIFAP**

**Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão
UNIFAP**

**Felipe Monteiro
UNIFAP**

**Franklin Pereira Santana
SEINF/GEA**

**Gilvan Portela Oliveira
IEPA**

**José Henrique Dias de Souza
UNIFAP**

**Mozer Ramont Areias Pereira
UNIFAP**

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar a configuração, operação e particularidades de um sistema híbrido solar-eólico de bombeamento de água do tipo conexão direta. O sistema foi instalado em um assentamento agrícola no município de Itaúbal, estado do Amapá, sendo composto por um aerogerador de 1 kW, um gerador fotovoltaico de 1 kWp, um inversor de frequência de 3 CV e uma motobomba centrífuga submersível trifásica de 2 CV e oito estágios. Atualmente o sistema opera com as fontes de energia de forma independente sendo a seleção realizada pelo morador do local, de acordo com a disponibilidade das fontes de energia.

PALAVRAS-CHAVE

Bombeamento de Água, Sistema Híbrido, Inversor de Frequência

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas híbridos de geração de energia elétrica são formados por duas ou mais fontes de produção de energia operando em conjunto para atender a demanda de um consumidor, podendo ser fontes renováveis. No Brasil, esse tipo de aplicação vem sendo empregado com a utilização de fontes de energia solar e eólica.

Sistemas de bombeamento de água que funcionam com fontes renováveis de energia (solar ou eólica) vêm sendo cada vez mais difundidos. Este tipo de aplicação torna-se, ainda mais indicado, para localidades onde as fontes são complementares podendo o sistema operar com a fonte de energia convencional em paralelo, proporcionando assim, redução significativa do custo do volume de água bombeada.

Este tipo de aplicação torna-se, ainda mais indicado, para localidades onde as fontes de energia renováveis são complementares (Figura 1), pois, nestes casos, o sistema pode operar com as fontes de energia solar e eólica em paralelo, proporcionando assim, redução significativa do custo do volume de água bombeada, tendo em vista à maior disponibilidade de energia ao longo do dia, para uma mesma carga instalada (motobomba). O problema é que os sistemas de bombeamento de água existentes no mercado¹ são fabricados para operarem somente com uma das fontes renováveis de energia.

Este trabalho tem por objetivo apresentar a configuração, operação e particularidades de um sistema híbrido solar-

¹ Neste caso está se referindo a sistemas do tipo conexão direta, sem utilização de bancos de baterias.

eólico de bombeamento de água, do tipo *conexão direta*², localizado em um assentamento agrícola no município de Itaúbal, estado do Amapá. Foi concebido no âmbito do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de um Sistema Híbrido Solar-Eólico de Bombeamento de Água – Edital Universal 14/2011, CNPq”.

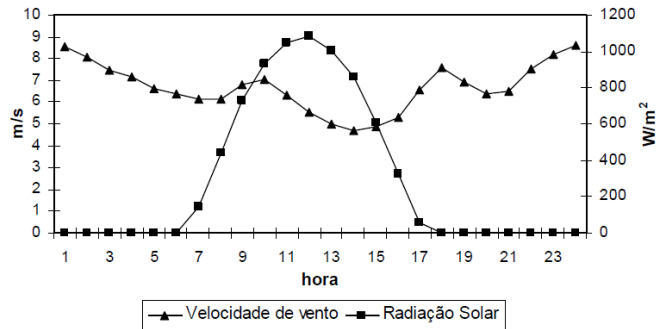


FIGURA 1 – Exemplo da complementaridade entre as fontes solar e eólica [1]

2.0 - CONFIGURAÇÃO

O sistema implementado no interior do estado do Amapá possui como fontes de energia, um aerogerador de 1 kW que emprega um gerador síncrono a ímã permanente e um gerador fotovoltaico de 1 kWp. Ambos interligados a um inversor de frequência de 3 CV que permite o funcionamento de um motobomba centrífuga submersível trifásica de 2 CV e oito estágios. Ainda que as fontes de energia solar e eólica apresentem-se conectadas ao mesmo inversor de frequência, apenas um dos recursos energéticos será habilitado por vez, cabendo ao morador local definir.

As fontes geradoras empregadas no sistema híbrido possuem as seguintes características:

- O aerogerador é um ENERSUD GERAR 246 de 1 kW, que possui um gerador síncrono a ímã permanente e 3 pás com diâmetro de 2,46 metros. Sua velocidade de partida é de 2 m/s com início de geração a 3 m/s.
- O gerador fotovoltaico possui painéis de 55 Wp com células de silício policristalino, totalizando uma potência instalada de 1 kWp.

A carga a ser suprida é uma motobomba que está instalada em um poço semi-artesiano de 40 metros de profundidade. Considerando a profundidade do nível estático do poço, a altura do reservatório e as perdas na tubulação, a altura manométrica total de projeto é de 30 metros, conforme Figura 2-a.

O inversor de frequência empregado é de uso comum à rede elétrica convencional, muito utilizado na indústria para controle de velocidade de motores de indução trifásico. Apesar de cada fabricante ter sua própria tecnologia, o diagrama de blocos (Figura 2-b) descreve a configuração interna de grande parte dos inversores comercializados atualmente.

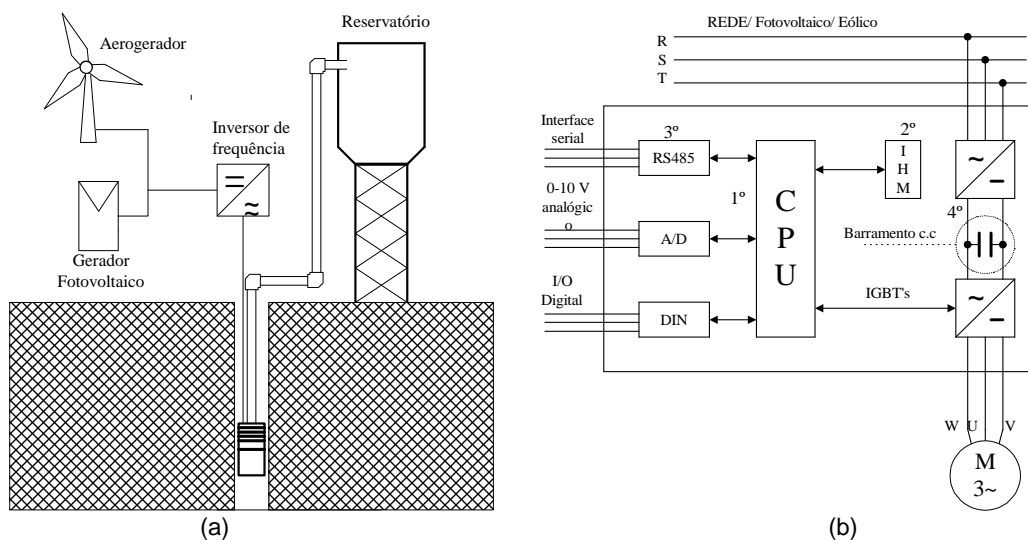


FIGURA 2 – (a) Configuração do sistema híbrido solar-eólico de bombeamento de água. (b) Descrição de um

² Refere-se a um sistema que não utiliza banco de baterias.

inverso de frequência.

Os inversores podem ser classificados em quatro blocos [2]: 1. Unidade central de processamento (CPU) formada por um microprocessador; 2. Interface homem-máquina (IHM) que permite visualizar de que forma o inverso está parametrizado e altera-lo; 3. Interfaces de comandos que podem ser analógicas ou digitais; e 4. Etapa de potência constituída por um circuito retificador, que alimenta o módulo IGBT por meio de um link de corrente contínua (CC).

Conhecendo a arquitetura do inverso de frequência, se faz necessário configura-lo de modo que se obtenha o melhor rendimento possível, otimizando a geração de energia (aerogerador e painel solar) a carga (motobomba). Isto é realizado fazendo os seguintes ajustes no inverso [3]:

- Ajustar o tempo de aceleração e desaceleração para o menor valor possível: isto irá possibilitar que o inversor de frequência responda rapidamente a variações bruscas na potência do aerogerador.
- Ajustar a tensão do circuito intermediário para o máximo valor permitido, isso evita que o inversor sofra danos por sobretenção.
- Selecionar o tipo de controle de acordo com o tipo de motobomba (Ex. V/F linear para motobombas de deslocamento positivo, e V/F quadrático para motobombas centrifugas).
- Ajustar Tempo de *auto-reset* para um valor pequeno (30 segundos). O inversor de frequência dispõe de inúmeros parâmetros de proteção, quando um desses parâmetros é ativado, o inversor desarma e só volta a funcionar quando é efetuado o *reset*.
- Configurar o inversor de frequência para a função remoto. Permite que o inversor acione a motobomba sem a intervenção do usuário (liga/desliga e *reset*). Na situação remoto os comandos devem ser habilitados pelos bornes do inversor (entradas digitais).
- Habilitar o controlador PID em modo automático.
- Ajustar no inversor de frequência um valor de referencia (*set-point*) para o controlador PID: é em função deste valor que o controlador regula a velocidade da motobomba. Para o sistema de bombeamento solar-eólico o valor de *set-point* deve ser um valor de tensão acima do valor mínimo do *link CC* que desliga o inversor por subtensão.
- Ajustar o ganho proporcional e integral para valores que dêem estabilidade ao sistema. Utilizar os valores obtidos por [4] ($K_p = 1,666$ e $T_i = 0,66$, $T_d = 0,00$) e refinar em campo durante instalação do sistema.
- Ajustar a ação do controlador PID: existem dois modos de ação do controlador PID, direto e reverso, a escolha de um ou outro modo de ação vai depender da necessidade da variável de processo (Tabela 1). Para o caso do sistema de bombeamento de água deve-se configurar o controlador PID para operar no modo reverso, pois sempre que a velocidade da motobomba é aumentada a variável de processo (tensão do *link CC* do inversor de frequência) diminui.

TABELA 1 - Modo de ação do controlador PID [5]

Necessidade da variável do processo	Para isso a velocidade do motor deve	Ação do regulador
Aumentar	Aumentar	Modo reverso
Diminuir	Aumentar	Modo direto

Após realização dos ajustes mencionados, devem-se realizar as conexões elétricas para o sistema operar em malha fechada conforme diagrama de bloco apresentado na Figura 3.

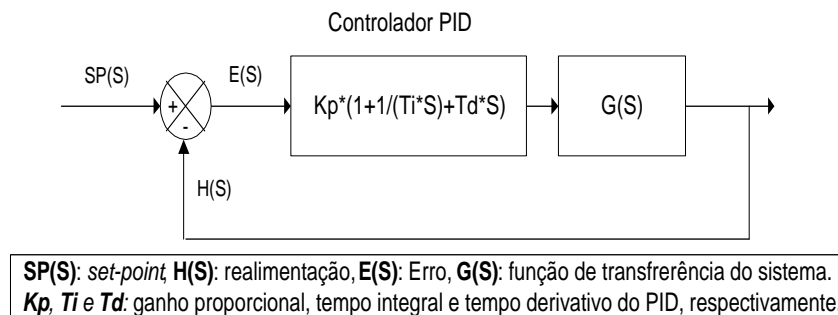


FIGURA 3 – Diagrama de blocos em malha fechada.

A realimentação corresponde a um sinal de tensão (0 – 10 Vcc) proporcional a variável de processo (*link CC*). Para alguns inversores de frequência este sinal é obtido de uma de suas saídas analógicas. Todavia, para o modelo de inversor de frequência utilizado, nenhuma de suas saídas analógicas dispõe dessa função sendo assim, foi necessário a fabricação de um divisor de tensão com as características apresentadas na Figura 4 para obtenção do sinal.

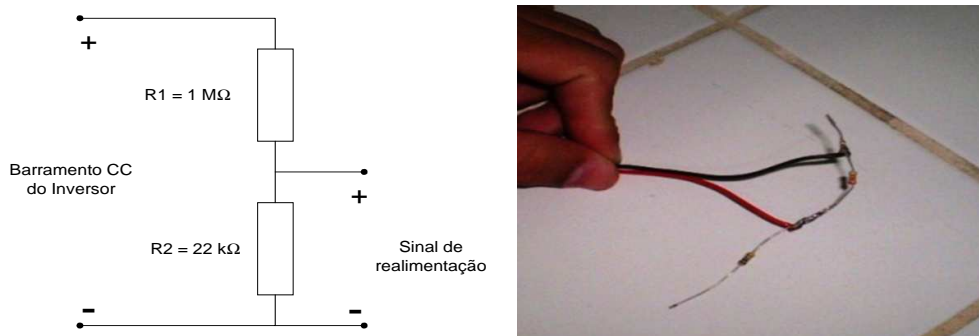


FIGURA 4 – Divisor de tensão fabricado para obter sinal de realimentação do inversor de frequência.

O divisor de tensão foi conectado no inversor de frequência, tal como ilustrado na Figura 5, onde $-U_d$ e $+U_d$ correspondem aos pontos de conexão do *link CC*, mesmos pontos no qual o gerador fotovoltaico é inserido. Por meio da Figura 5, também é possível notar a conexão do aerogerador, que é inserido nos terminais *L/L1*, *N/L2* e *L3*. Ainda que ambas as fontes estejam conectadas num mesmo inversor de frequência, apenas uma será habilitada por vez.

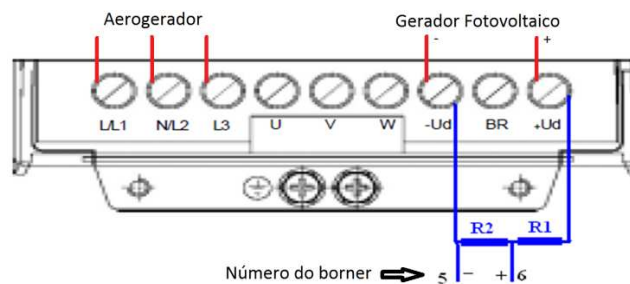


FIGURA 5 – Pontos de conexão do aerogerador, gerador fotovoltaico e divisor de tensão no inversor de frequência

Com a parametrização correspondente no inversor de frequência, tem-se início a etapa de montagem e instalação dos equipamentos no assentamento agrícola. O aerogerador foi montado em uma torre tubular de 20 metros de altura fixa por cabos de aço, conforme Figura 6, estando a poucos metros do sistema de bombeamento de água. O gerador fotovoltaico também teve sua construção nos arredores do poço semi-artesiano, em um ambiente descampado e desprovido de sombreamento, conforme Figura 7-a. Desta maneira, é possível se obter um bom rendimento ao longo do ano.



FIGURA 6 – Montagem e instalação do aerogerador

O inversor de frequência com os controles complementares são abrigados na estrutura do reservatório, protegidos de intempéries, conforme figura 7-b. Na mesma estrutura se localiza o poço semi-artesiano, com alocação da motobomba.



FIGURA 7 – Montagem e instalação do (a) gerador fotovoltaico e (b) inversor de frequência.

Após a instalação de todos os equipamentos, é possível ver a disposição das fontes geradoras de energia em relação à estrutura do reservatório (Figura 8).



FIGURA 8 – Sistema híbrido solar-eólico instalado em Itauba-AP

3.0 - OPERAÇÃO

O funcionamento adequado de qualquer sistema híbrido de geração de energia requer um plano de manutenção e operação adequados, obedecendo aos limites estipulados pelo fabricante.

No gerador fotovoltaico, a princípio, não há qualquer procedimento de operação. Após a instalação, necessitam apenas de alguns cuidados básicos de manutenção, como: verificação periódica de todos os cabos de ligação dos arranjos; estrutura de suporte dos módulos; aperto dos parafusos de fixação; infiltrações ou entradas de insetos; limpeza periódica das superfícies dos módulos; impedir o crescimento da vegetação ao redor provocando sobreamento; e outros.

Similar ao gerador fotovoltaico, a manutenção do aerogerador é simples, necessitando verificar: os cabos de atracação da torre; funcionamento do inversor; sistema de freio e leme; e outros.

O inversor de frequência funciona como o “cérebro” do sistema e foi configurado de modo a permitir sua utilização com fontes de energia intermitente (que não podem ser armazenadas em sua forma natural) adequando a potência disponível pelas fontes de energia solar e eólica a potência da motobomba. Desta forma, propicia o bombeamento de água e armazenamento em um reservatório com capacidade para 3 mil litros, localizado no alto de uma torre de 5 metros de altura.

O inversor de frequência utiliza como variável de controle o limite mínimo de sua tensão de operação. Todo o controle é realizado por meio de um controlador PID embarcado no próprio inversor de frequência.

O sistema opera com as fontes de energia de forma independente sendo a seleção realizada pelo agricultor local,

de acordo com a disponibilidade das fontes de energia (solar e eólica) e horário do dia. A água bombeada é utilizada para consumo da família e, principalmente, nas atividades de agricultura familiar.

4.0 - PARTICULARIDADES

A escolha do inversor de frequência como dispositivo de condicionamento de potência deve-se ao fator desse equipamento poder ser conectado tanto a uma fonte de corrente contínua (gerador fotovoltaico) quanto a uma fonte de corrente alternada de frequência variável (aerogerador).

O aerogerador é conectado na entrada do inversor de frequência, com o fluxo de potência passando pela ponte de diodo retificadora, enquanto que o gerador fotovoltaico no barramento de corrente contínua (link CC) desse equipamento.

O sistema tem como vantagem favorecer a utilização de equipamentos de fabricação nacional (a exceção dos módulos fotovoltaicos) e facilmente encontrado no mercado local, proporcionando maior agilidade no processo de manutenção do sistema.

No caso de localidades onde as fontes solar e eólica são complementares, o sistema proporciona redução significativa do custo do volume de água bombeada, tendo em vista a maior disponibilidade de energia ao longo do dia para uma mesma carga instalada (motobomba).

Outro ponto importante é que, para localidades que venham a ser beneficiadas pela extensão da rede elétrica convencional, a única parte do sistema que precisa ser removida é o sistema de geração de energia solar e eólica, tendo em vista a utilização do inversor de frequência como dispositivo de condicionamento de potência.

5.0 - CONCLUSÃO

A inserção de um sistema híbrido em comunidades rurais, que muitas das vezes se encontram isoladas energeticamente, promove um desenvolvimento econômico, social e cultural. Além de diminuir sua dependência da concessionária, que nessas localidades, apresentam um fornecimento de energia elétrica precária.

Com um fornecimento de energia elétrica complementar a convencional, se cria uma possibilidade de bombeamento de água em um volume muitas das vezes superior ao habitual e com um custo inferior, possibilitando promover a expansão da agricultura familiar e aumento de renda.

Outra vantagem do sistema é a utilização de fontes renováveis que podem se complementar, conforme abordado no início do artigo, onde as fontes de energia eólica e solar são utilizados separadamente conforme a disponibilidade de tal recurso energético.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Blasques, L. C. M, "Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade", Dissertação de Mestrado, UFPA, 2005, pág. 65. Brasil.

[2] CAPELLI, A. Inversores de Frequência, Mecatrônica Atual, v.1, n.2, p.7-15, 2002. Brasil.

[3] MENDEZ, B. F.; BRITO, A. U.; NASCIMENTO, M. A. S.; CUNHA, A. C. Uso de inversores de frequência e motobombas nacionais em sistemas eólicos de bombeamento de água. In: Elizabeth Viana Moraes da Costa, Fernando Castro Amoras, Liudmila Miyar Otero. (Org.). CIÊNCIAS EXATAS: Resultados dos projetos de iniciação científica da Universidade Federal do Amapá (2009-2011). 1ed. Macapá: Editora da Universidade Federal do Amapá, 2014, v. 1, p. 57-67. Brasil.

[4] BRITO, A. U. Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais Para Acionar Bombas Centrífugas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP. São Paulo, 2006. Brasil.

[5] WEG. Manual do Inversor de Frequência – CFW 08 Vector Inverter. 2003. Brasil.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alaán Ubaiara Brito possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2000), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2002) e doutorado em Energia pela Universidade de São Paulo (2006). Atualmente é Professor Adjunto III da Universidade Federal do Amapá e Presidente da Associação Amapaense de Engenheiros Eletricistas (AAEE). Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em energias renováveis (solar fotovoltaica e eólica) e eficiência energética.



Geraldo Neves de Albuquerque Maranhão possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2006). Atualmente é Docente da Universidade Federal do Amapá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos. Atuando principalmente nos seguintes temas: Diagnóstico de Falta, Geradores Síncronos, identificação de Sistemas, Sistemas de geração de energia elétrica, Sistemas Fuzzy e Sistemas FDI.



Felipe Monteiro possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará - UFPA em 2011 e 2013, respectivamente. Atualmente exerce a função de Professor Assistente A na Universidade Federal do Amapá - UNIFAP. Membro do IEEE-PES (Institute of Electrical and Electronic Engineers - Power & Energy Society) e do CIGRÉ-Brasil (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação Eletrônica e Sistema de Potência. No momento, desenvolve pesquisas em Energia Eólica voltada para a estabilidade transitória



Franklin Pereira Santana atualmente é técnico da Secretaria de Estado e Infra-Estrutura do Estado do Amapá. Especialista em levantamento de torres tubulares.



Gilvan Portela Oliveira possui curso de graduação em Tecnólogo em Gestão Ambiental pela Faculdade de Macapá (FAMA) em 2011. Técnico em mecânica geral pelo SENAI em 1990. Foi responsável pela logística de campo dos pesquisadores do empreendimento Hidroelétrico Ferreira Gomes e Cachoeira Caldeirão no Estado do Amapá no período de 2009 à 2011. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica onde fez análise dos nutrientes das águas das áreas de ressacas de Macapá e Santana. No projeto Rede de Gestão Integrada e hidroclimática da bacia do Jari participou de jornadas de campo e da instalação da Plataforma de Coleta de Dados no município de Laranjal do Jari. Atualmente faz parte de projetos onde desenvolve atividades de medição, vazão e batimetria com a utilização do equipamento "Acoustic Doppler Profiler/ADP" em pequenos, médios e grandes rios.



José Henrique Dias de Souza possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade do Estado do Pará (2006), graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2007) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2009). Atualmente é professor da Universidade Federal do Amapá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência.



Mozer Ramont Areias Pereira possui curso Técnico em Rede de Computadores pelo Centro de Educação Profissional do Amapá (2013). Atualmente graduando do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Amapá – UNIFAP e bolsista de iniciação científica.