

SUPERVISÓRIO DE CÓDIGO ABERTO E BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO REMOTO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE

Gabriel de Andrade Torelli – eng.gabrieltorelli@yahoo.com.br
André Mendes Martins – mendesmartins@gmail.com
Rômulo Mello Alves – romulo1am@hotmail.com
Tuliana Pinto Martins – tulianapm@yahoo.com.br
Ivani Rodrigues dos Anjos – ivaranjo.com@hotmail.com
Rui Manuel Freire – ruimanufreire@gmail.com
Carlos Augusto Guimarães Medeiros – mgacarlos@yahoo.com.br
Departamento de Engenharia (ENG) / Engenharia Elétrica,
Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO)

Resumo. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um protótipo para monitoramento de energia empregado em conjunto com um gerador fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão. Buscou-se elaborar um sistema simples, eficaz e de baixo custo, que realize a supervisão on-line e remota via internet, de diversas grandezas elétricas. Além das características de simplicidade e flexibilidade do hardware utilizado, foi desenvolvido um sistema de supervisão em código aberto batizado de “STELLA FV”. Com esses elementos, este trabalho oferece contribuições para o acompanhamento da geração fotovoltaica e de seu desempenho ao longo do tempo e, portanto, estimula o uso deste tipo de geração, renovável e distribuída, possibilitando um sistema de monitoramento amigável, adaptável e que não onera o custo final do empreendimento de forma substancial.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Geração Distribuída, Monitoramento Remoto.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de fontes renováveis está em expansão no mundo e também no Brasil. Em particular, a energia fotovoltaica é uma fonte muito atrativa para este país em decorrência da notável radiação solar em praticamente todo o território nacional, com boa incidência no estado de Goiás (Tiba *et al.*, 2000). Além disso, suas vantagens inerentes como conversão direta da luz solar em eletricidade sem partes móveis e sem emissão de poluentes durante sua operação, baixa manutenção, considerável vida útil dos módulos fotovoltaicos e possibilidade de expansão gradativa (modular) da geração, são fatores que, com o crescente desenvolvimento tecnológico, industrial e de mercado, tendem a sobrepujar desvantagens como baixas eficiências e custos relativamente altos.

Outro aspecto a ser destacado é a possibilidade do uso dessa fonte para servir locais isolados da rede elétrica convencional, como no caso de comunidades rurais, o que ocorre no Brasil. Nesta situação, a energia fotovoltaica supre a carga, mas precisa ser também armazenada em baterias (gerando resíduos a serem reciclados posteriormente).

Outra forma de aproveitamento energético é feita através da conexão à rede elétrica de uma concessionária, por intermédio de um conversor CC/CA. Neste caso, têm-se sistemas fotovoltaicos de pequeno porte, que podem ser prontamente inseridos em meios onde já existe a rede de distribuição como nas cidades ou, sistemas de maior porte, que constituem as denominadas usinas fotovoltaicas. Sistemas conectados à rede não são novidade e estão presentes em diversos países como Alemanha, Japão, Estados Unidos, Espanha, etc. Atualmente constituem a grande maioria das instalações fotovoltaicas no mundo.

O Brasil conta com diversos destes sistemas em situação de pesquisa/pilotos, bem como, pode ser citada uma planta de 1 MWp no município de Tauá-CE, que juntos, representam ainda muito pouco na matriz energética nacional. Existem vários estudos, discussões, laboratórios, novos projetos em andamento e normas técnicas específicas para fotovoltaicos (como as normas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Recentemente, a resolução normativa n. 482 da ANEEL (ANEEL, 2012), estabeleceu regras gerais para o acesso de geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Inclui a microgeração com potência instalada menor ou igual a 100 kW e a minigeração acima de 100 kW até 1 MW (contempla, dessa maneira, a energia fotovoltaica). Esta resolução estabelece também o sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*), permitindo ao usuário instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local.

2. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE

O efeito fotovoltaico propicia a obtenção de energia elétrica a partir da conversão direta da luz em eletricidade. A unidade básica desta conversão é a célula fotovoltaica. Para fornecer tensões e correntes em níveis adequados para aplicações práticas várias células são conectadas em série e em paralelo, compondo um módulo fotovoltaico. Vários módulos agrupados formam um painel solar fotovoltaico. Porém, os sinais gerados por estes são em corrente contínua (CC). A fim de suprir cargas em corrente alternada (CA), torna-se necessário utilizar um inversor CC/CA, o qual, para funcionamento em paralelo com a rede elétrica, deve ser do tipo *grid-tie*, como mostra de forma simplificada a Fig. 1.

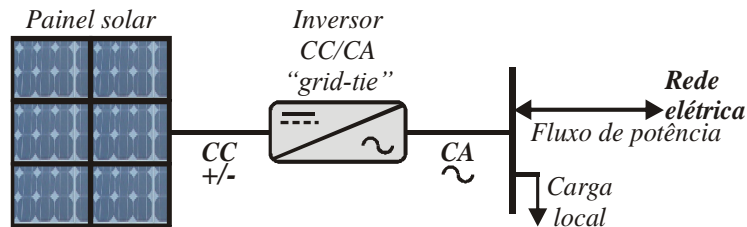


Figura 1- Configuração básica de um sistema de geração fotovoltaica conectado à rede elétrica por inversor *grid-tie*.

Na Fig. 1 a alimentação da carga local (em corrente alternada) é feita a partir da geração fotovoltaica (FV) que pode também ser complementada pela rede elétrica ou, em casos de carga baixa, exportar energia para a concessionária. Este é o contexto deste trabalho, a ser detalhado na sequência.

3. DESCRIÇÃO GERAL DO SISTEMA

O protótipo em desenvolvimento tem fins acadêmicos e de pesquisa. É composto por um painel solar, um inversor que funciona em paralelo com a rede elétrica em baixa tensão, sistema de aquisição de dados e envio via porta USB (*Universal Serial Bus*) a um microcomputador funcionado como servidor, *no-break*, cargas locais e medidor convencional de energia elétrica do tipo eletrônico bidirecional, conforme mostra a Fig. 2.

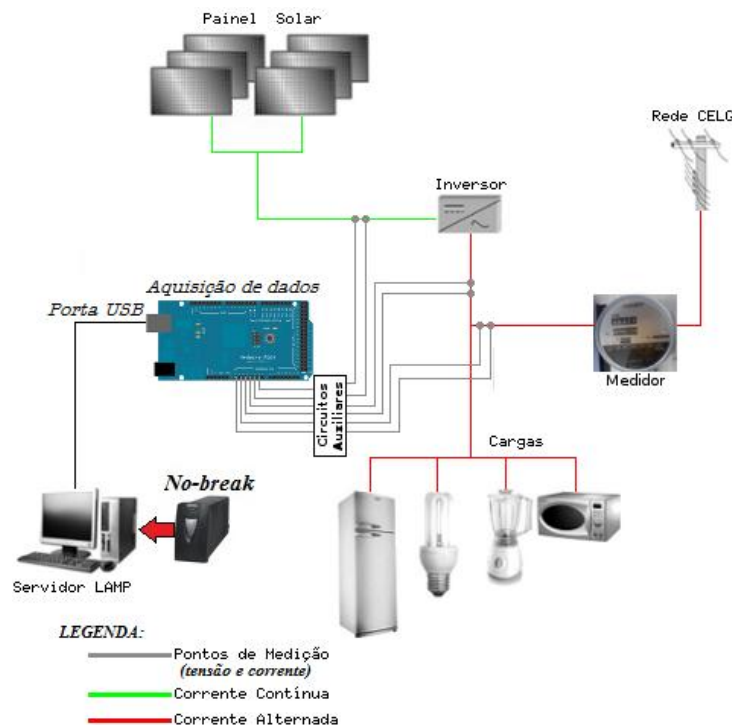


Figura 2- Visão geral do protótipo.

O painel solar foi instalado no terraço do bloco E, do Campus I, área III da PUC-Goiás, localizado na Praça Universitária, Setor Universitário, Goiânia-GO. Este local foi escolhido por possibilitar a visita de forma mais acessível ao gerador. Os demais componentes foram instalados no Laboratório de Energias Alternativas e Renováveis localizado na sala 101 do bloco F da mesma área III.

3.1 Gerador fotovoltaico e inversor

O gerador é composto por seis módulos fotovoltaicos de células monocristalinas de silício, do fabricante SIEMENS, modelo SP75, 75 Wp cada, tensão nominal 17 V, corrente nominal 4,4 A, aparafusados sobre base metálica (*metalon*), como mostra a Fig. 3.



Figura 3- Foto do painel fotovoltaico composto por seis módulos, instalado no terraço do bloco E, Campus I, Área III, PUC-GO.

A potência nominal total do gerador é 450 Wp. Os módulos foram agrupados de dois a dois em ligações série visando aumentar a tensão CC de operação para 34 V, perfazendo três grupos ligados em paralelo, com corrente nominal de 13,2 A.

O inversor, do tipo *grid-tie*, converte sinais CC em CA e trabalha em paralelo com a rede elétrica, em baixa tensão, 220 V/60 Hz, onde sua saída é ligada. Outras informações do equipamento: faixa de tensão de entrada 24 a 52 Vcc; potência nominal 450 W; fabricante *Mass Power*; modelo *SUN-500G*.

É importante destacar que o inversor possui proteção própria "anti-ilhamento" (*anti-islanding protection*), isto é, ele detecta a falta de tensão da rede e se desliga automaticamente (o que evita possíveis acidentes durante desligamentos e manutenções na rede de distribuição da concessionária). Além disso, ele só entra em operação após entrar em sincronismo com a rede elétrica, ou seja, ele não alimenta cargas locais e/ou injeta potência, sem que a rede elétrica esteja energizada. De acordo com as informações do fabricante, a saída CA do inversor apresenta uma distorção harmônica total de tensão (DTT %) menor que 5%, o que está de acordo com a referência (PRODIST, 2012), visto que para nível de tensão (menor ou igual a 1 kV), o limite estabelecido é 10%.

3.2 Carga local e instalações elétricas

Tendo previamente disponível o painel fotovoltaico supracitado, a idéia subsequente foi efetuar a alimentação de energia à carga local (que neste caso representa uma "residência popular"), pela geração fotovoltaica em paralelo com a rede elétrica da concessionária. A planta baixa da "casa popular" ou de "baixa renda" foi retirada e adaptada a partir do projeto "Casa Própria", divulgado na revista do CREA-GO, ano I - N° 1 de agosto/2006, referente a um programa de habitação popular. A planta baixa foi passada em escala reduzida para uma placa de madeira tipo MDF (*Medium Density Fiberboard*) onde foram localizados os pontos de consumo, conforme mostra a Fig. 4 (Carvalho *et al.*, 2008). As instalações elétricas da "casa popular" possuem apenas dois circuitos CA monofásicos, 220 V / 60 Hz, sendo um para iluminação com lâmpadas fluorescentes compactas e o outro para tomadas de uso geral.



Figura 4- Carga local representando uma residência popular em escala reduzida (Carvalho *et al.*, 2008).

Assim, a carga instalada foi ajustada de acordo com a potência e quantidade de módulos fotovoltaicos disponíveis, com possibilidade de complemento energético pela rede elétrica convencional.

O dimensionamento dos condutores e das proteções foi feito como da forma usual para instalações elétricas em baixa tensão, tendo como base as referências – (Filho, 2001), (CRESESB, 2004), (ABNT, 2004), (Júnior, 2005), (Felix *et al.*, 2006), (Schultz, 2011), (ABNT, 2005) –, e levando em conta as especificidades do sistema tais como: circuitos em corrente contínua e alternada; presença de sistema SPDA externo; carga (tomadas e lâmpadas) localizada em ambiente laboratorial. A Tab. 1 sintetiza as proteções tradicionalmente consideradas em sistemas fotovoltaicos de pequeno porte e o que foi efetivamente utilizado no protótipo.

Tabela 1. Proteções consideradas e efetivamente usadas.

Proteção:	Utilização no protótipo, comentário:
Sobrecorrente no lado CC.	Sim, disjuntores.
Sobrecorrente no lado CA.	Sim, disjuntores. Incluindo disjuntor de conexão inversor/rede.
Disjuntor diferencial residual (DR) no quadro de distribuição em CA.	Não. Protótipo dentro de instalação já existente no laboratório, em local controlado e seco.
Aterramento das massas metálicas.	Sim. Estrutura de sustentação (na qual estão parafusados os módulos fotovoltaicos) ligada à condutor terra. Condutor de proteção (PE) nas instalações em CA.
SPDA.	Sim. Para proteção dos módulos fotovoltaicos expostos a descargas atmosféricas. Já existente no local e suficiente.
DPS – lado CC do inversor.	Sim. Posicionados próximos ao inversor no lado CC, nos pólos positivo e negativo, classe II (pois existe SPDA).
DPS em CA – inversor.	Não, protótipo dentro de instalação do laboratório. (Quando necessário é posicionado próximo ao inversor no lado CA, classe II se já existir SPDA).
DPS em CA – medição.	Não, protótipo dentro de instalação do laboratório. (Quando necessário posicionado no medidor de entrada, em CA, classe I).

Conforme comentado na Tab. 1, a conexão entre a saída do inversor e a rede CA foi feita por um disjuntor bipolar, denominado disjuntor de conexão. Este disjuntor permite isolar fisicamente o inversor da rede quando necessário. Vale ressaltar que este procedimento não interrompe o suprimento à carga, pois a rede da concessionária passa a assumi-lo integralmente.

Para fins de medição e para melhor caracterizar a situação de entrada de energia da rede elétrica convencional para uma unidade consumidora, foi empregado um medidor de energia eletrônico, bidirecional, posicionado como mostrado na Fig. 2. De acordo com o local de conexão adotado, a energia fotovoltaica que não for consumida na "casa popular" será entregue à rede da concessionária. Como o medidor é bidirecional, ele descontará a produção local da energia fornecida via rede (ou seja, indica apenas o líquido, em kWh, em seu mostrador). Além disso, é comum encontrar nesse tipo de configuração um medidor na saída do inversor. Entretanto, para esse projeto tal medição foi realizada exclusivamente pelo sistema supervisório, apresentado a seguir.

4. SISTEMA SUPERVISÓRIO

A concepção, projeto e montagem do *hardware* e elaboração do *software* que compõe o sistema de monitoramento (supervisório), foram todos desenvolvidos neste trabalho utilizando ferramentas de código aberto. Optou-se pela implementação de um servidor LAMP (*Linux, Apache, MySQL e PHP*) para atender as necessidades do sistema. Este servidor é responsável por armazenar e organizar os dados para consulta posterior, através de qualquer equipamento que possui um navegador *web*, conferindo maior mobilidade, portabilidade e disponibilidade ao sistema.

4.1 Considerações sobre o *hardware* e o servidor LAMP

Utilizou-se como *hardware* para o servidor um computador com poucas exigências de desempenho isto é: *Intel Pentium 4, 2,0 GHz, 758 MBytes de memória RAM, HD com 320 GBytes*. Para aquisição de dados foi empregado o Arduino MEGA, equipado com o microcontrolador ATmega1280, cujo conversor A/D tem resolução de 10 bits. A plataforma utilizada na parte servidora é composta por:

- sistema operacional: *Linux 2.6.32 – CentOS 6*;
- servidor *HTTP: Apache 2.2.15*;
- banco de Dados: *MySQL 5.1.61*;
- PHP versão 5.3.3.

A ferramenta para desenvolvimento do sistema supervisor foi o programa *Eclipse 3.6.2*. Como mostrado na Fig. 2, sensores de tensão e corrente foram posicionados em três pontos: saída fotovoltaica em CC (sensores de efeito *Hall*); saída do inversor em CA (sensores indutivos); circuito da rede da concessionária em CA, cujo fluxo de potência é bidirecional (sensores indutivos). Os sinais de tensão e corrente nestes pontos de medição foram condicionados por circuitos eletrônicos comuns e enviados à placa microcontrolada a fim de realizar a conversão analógico-digital (A/D).

O Arduino é uma plataforma eletrônica de desenvolvimento (*open-source electronics prototyping platform*) de código aberto, com *hardware* e *software* de uso relativamente fácil. O microcontrolador é programado usando o código escrito na *Arduino Programming Language*, cuja sintaxe é semelhante à da linguagem C.

Além da aquisição de dados, o Arduino foi programado para calcular e enviar para o servidor LAMP, por comunicação USB, os valores de tensão e corrente eficazes, de potência ativa, aparente e do fator de potência. A saída dos valores foi configurada no código fonte do programa utilizando o padrão *CSV (Comma Separated Values)*.

4.2 O software STELLA FV

O STELLA FV é um programa que foi desenvolvido com a função de manipular o banco de dados composto pelos valores do sistema de aquisição e prover uma interface amigável com o usuário. Foram consideradas outras opções para realizar esta tarefa, mas a preferência por elaborar um *software* sob medida prevaleceu pelo fato de nenhuma das alternativas abordadas apresentarem fácil e direta personalização, acesso remoto e que fossem gratuitas.

Através do STELLA FV é possível monitorar, de forma *on-line*, os valores de tensão e corrente eficazes, potência ativa e aparente, fator de potência e energia (kWh). O programa gera gráficos e relatórios e os valores de energia são também armazenados separadamente por dia, a fim de armazenar dados históricos sobre a produção fotovoltaica do local, permitindo observar a influência da sazonalidade. Uma ponte escrita em *PHP* coleta os dados da porta serial onde o Arduino está conectado e os incrementa de forma recursiva no banco de dados. Esta combinação apresenta excelente desempenho e estabilidade, mesmo em computadores com poucos recursos de *hardware*, como é o caso. O STELLA FV deve ser executado remotamente através de navegador *web*, o que independe de sistema operacional, dispensando instalação de qualquer *software* adicional. Como exemplo, a Fig. 5 mostra a tela de geração de registros (*logs*).

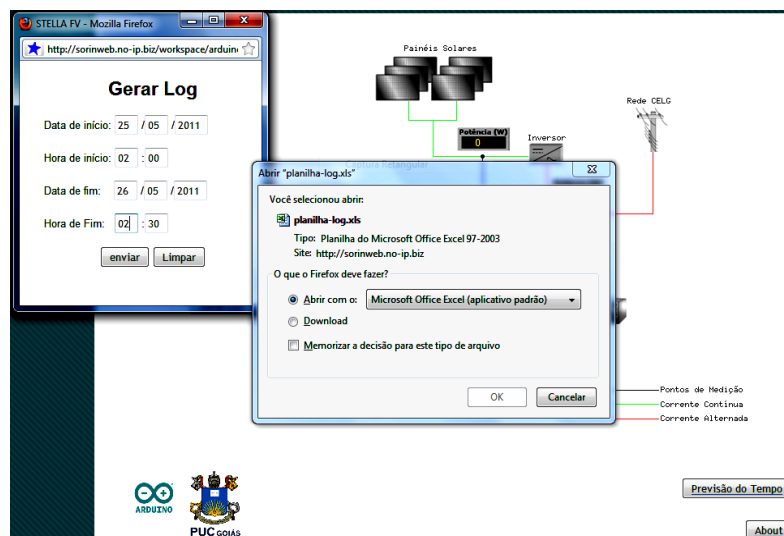


Figura 5- Geração de *log* no STELLA FV.

A figura 6 apresenta de forma mais intuitiva como funciona a coleta dos dados da porta serial. A saída em *CSV* é recebida por um *script* PHP que faz a ponte entre a porta serial e o banco de dados através de *sockets* para tratar este tipo de protocolo. Depois que estes dados estão armazenados e organizados, outro *script* em *PHP* é responsável por fazer a seleção dos últimos valores do banco de dados e enviar para a tela da aplicação que é interpretada pelo navegador do usuário.



Figura 6- Esquema simplificado da importação do arquivo *CSV* para o banco de dados *MySQL*.

Resultados a partir dos recursos deste programa são apresentados na seqüência.

5. RESULTADOS DE ENSAIOS

Esta seção apresenta os ensaios referentes ao protótipo, realizados em dias de céu limpo e ensolarados. A Fig. 7 mostra o resultado de um ensaio para verificar a proteção "anti-ilhamento" do inversor, uma característica importante para que não haja energização indevida da rede em casos de desligamento por defeito ou manutenção. As curvas da tensão na rede elétrica e do inversor estão sobrepostas. Neste ensaio a rede foi propositalmente desconectada através da abertura de um disjuntor. Nesta situação a tensão na saída do inversor zera, ou seja, ele sai de operação e permanece desativado, mesmo com a presença da tensão CC advinda do gerador fotovoltaico em sua entrada.

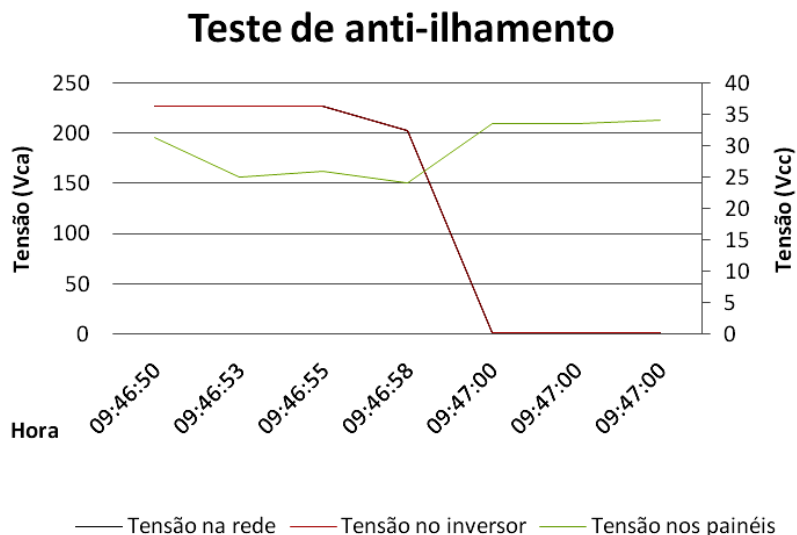


Figura 7- Teste de "anti-ilhamento" do inversor.

A Fig. 8 mostra resultados evidenciando a interação entre as potências de geração do painel fotovoltaico, de saída do inversor e da rede elétrica. A carga local deste caso teve potência ajustada em aproximadamente 300 W. Outro ensaio realizado foi com carga local em torno de 50 W apenas, para observar a exportação de energia para a rede da concessionária.

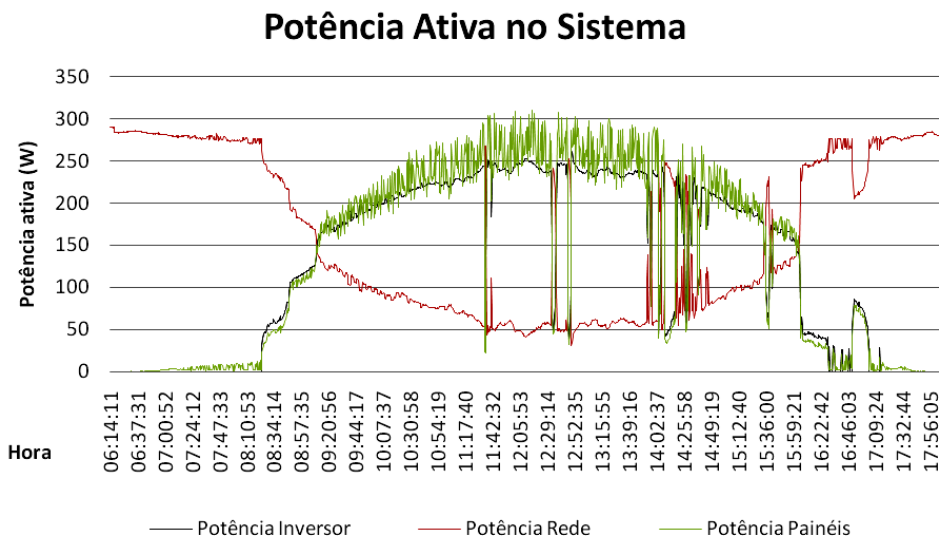


Figura 8- Potência ativa em dia ensolarado, carga local em torno de 300 W.

A Fig. 9 mostra os resultados obtidos. Foi convencionado o sentido positivo para o fluxo da potência exportada. Os gráficos apresentaram um comportamento típico para esse tipo de geração. Para fins de pesquisa, foi também mostrada a potência em CC obtida do painel fotovoltaico, embora esta não seja fundamental para o usuário cujo maior interesse é na energia fotovoltaica produzida (descontadas as perdas do inversor).

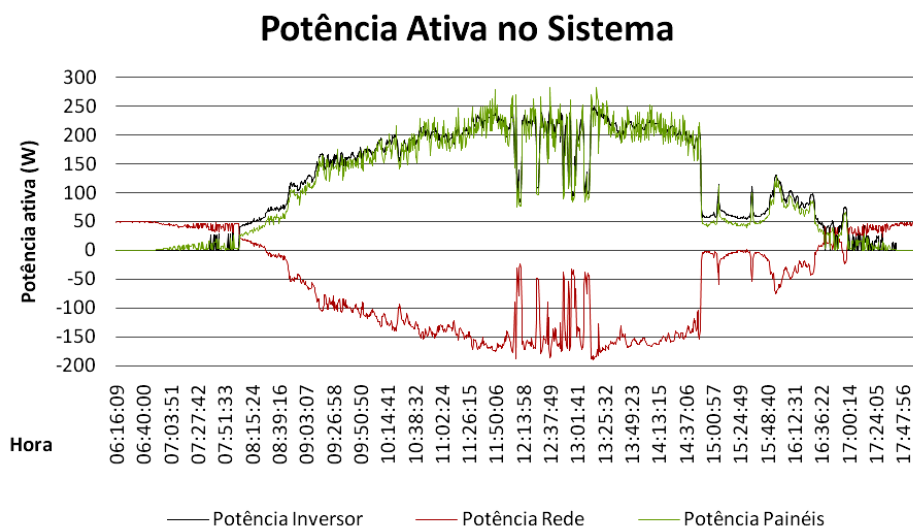


Figura 9- Potência ativa em dia ensolarado, carga local 50 W.

Naturalmente, é possível monitorar (e mesmo controlar) remotamente várias gerações em locais diversos, que fizerem uso do STELLA FV, ao mesmo tempo. Para isso, a cada servidor LAMP atribui-se um endereço IP diferente. Assim sendo, basta acessar o IP do local que se deseja monitorar e fazer o redirecionamento para a tela de um programa onde pode ser feita a identificação de cada geração, como ilustra a Fig. 10.

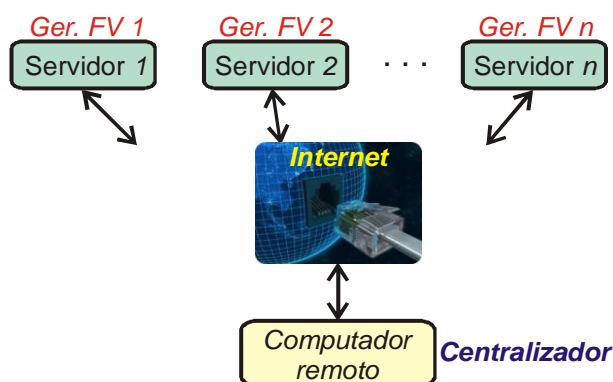


Figura 10- Monitoramento de várias gerações fotovoltaicas ao mesmo tempo.

Enfim, isso possibilita uma posterior centralização das informações (idéia de "usina virtual"), além de propiciar o monitoramento múltiplo independente do lugar ou dispositivo que o usuário esteja utilizando como *smartphones*, *tablets*, *netbooks*, etc.

6. CONCLUSÕES

As principais vantagens do protótipo proposto são baixo custo e emprego de *hardware* e *software* abertos sendo que: o sistema microcontrolado Arduino simplificou o processamento e proporcionou um circuito em tamanho portátil; o programa STELLA FV demonstrou a possibilidade de construção de uma solução eficaz, de baixo custo, em que o usuário pode adicionar funcionalidades e personalizações de acordo com suas necessidades.

O monitoramento remoto via *internet* é uma característica interessante e não necessita da instalação de qualquer *software* no computador que acessará o servidor. O supervisor mostra de forma *on-line* entre outros dados, os valores da energia gerada (na saída do inversor) e líquida (para a rede da concessionária). O banco de dados armazena esses valores e seus correspondentes diários para análise e conhecimento da geração fotovoltaica local.

Pode ser adotado um meio de transmissão sem fio entre o Arduino e o microcomputador, para que este último não tenha que ficar próximo ao sistema de aquisição de dados. Uma solução é o uso do módulo conhecido como APC 220, que consegue transmitir dados até 1 km de distância e faz a conversão serial, o que é equivalente ao Arduino estar plugado ao servidor, sem necessidade de acrescentar configurações ou programas.

Outras informações para o usuário como ganhos monetários e amortização gradual do investimento inicial, redução (comparativa) da emissão de gás carbônico, monitoramento da temperatura do painel fotovoltaico, etc. podem ser implementadas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os laboratoristas do Lab. de Eletricidade do curso de Engenharia Elétrica e aos funcionários da Divisão de Serviços Gerais (DSG) da PUC-GO pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- ABNT Norma Brasileira - Instalações Elétricas de Baixa Tensão, NBR 5410, 2a ed., 2004.
- ABNT Norma Brasileira - Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, NBR 5419, 2a ed., 2005.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa n. 482 de 17 de abril de 2012.
- Carvalho, D. V. P., Carvalho, F. W. S., Caixeta, L. G. P., Neves, M. L., Estudo e Implementação de um Sistema Solar Fotovoltaico para a Geração de Energia Elétrica, Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, PUC-GO, 2008.
- CRESESB, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES, CEPEL-CRESESB, Edição Especial, PRC-PRODEEM, 2004.
- Felix, A., Farret, F. A., Simões, M. G., Integration of Alternative Sources of Energy, John Wiley & Sons, 2006.
- Filho, J. M., Instalações Elétricas Industriais, 6ª edição, LTC: Rio de Janeiro, 2001.
- Júnior, L. O., Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: Estudo de Caso – 3 kWp Instalados no Estacionamento do IEE-USP, Dissertação de Mestrado, IEE/USP, São Paulo, 2005.
- PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 4, ANEEL, data de vigência 01/02/2012.
- Schultz, B., Wettingfeld, J., Proteção contra Descargas Atmosféricas e Surtos em Instalações Fotovoltaicas, artigo (original da Alemanha), revista Eletricidade Moderna, Aranda Editora, ano 39, n. 450, setembro de 2011, pp. 106-115.
- Tiba, C., *et al.*, Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos, UFPE/CHESF, MME - ELETROBRÁS-CEPEL/CRESESB, Brasil, 2000. *On-line*: disponível em <http://www.cresesb.cepel.br>, acessado em 29/04/2012.

OPEN SOURCE AND LOW COST REMOTE MONITORING PROTOTYPE FOR GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEMS

Abstract. *This paper presents the development of a prototype of a supervisory system to monitor (locally or remotely) a low voltage and grid-connected photovoltaic generator. Its main features are: simplicity, low cost and easy customization. The system is composed by a modular open-source electronics prototyping platform and by an open-source software named "STELLA FV". With these characteristics, this work aims to spread out an important, renewable, distributed energy source, since it implements a friendly, adaptable supervising system that does not increase the final cost of the whole project substantially.*

Key words: Photovoltaic Solar Energy, Distributed Power Generation, Remote Monitoring.