

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO FOTOVOLTAICO BASEADO EM *POWER LINE COMMUNICATION*

Francisco Jonatas Siqueira Coelho – jonatas.coelho@ifsertao-pe.edu.br

Manuel Rangel Borges Neto – manuel.rangel@ifsertao-pe.edu.br

Ricardo Maia Costa – ricardo.maia@ifsertao-pe.edu.br

Poliana Silva – poliana.silva@ifsertao-pe.edu.br

José Américo de Carvalho – jose.carvalho@ifsertao-pe.edu.br

Luiz Carlos Nascimento Lopes – luiz.nascimento@ifsertao-pe.edu.br

Rita de Cassia Barbosa da Silva – cassia.barbosa@ifsertao-pe.edu.br

IF Sertão Pernambucano – Campus Petrolina, Grupo de Pesquisa de Energia no Meio Rural.

Resumo. *Sistemas de monitoramento dedicados à plantas de geração solar fotovoltaica, na maioria dos casos, não fazem o monitoramento individual em cada painel, dificultando a identificação rápida de um eventual componente defeituoso que esteja contribuindo para a redução do desempenho da instalação. A tarefa de identificar e solucionar problemas sem o auxílio um sistema de monitoramento apropriado pode demandar muito tempo, durante o qual, a planta de geração produzirá uma quantidade de energia abaixo da qual foi projetada ou, completamente desligada até a correção do problema. Algumas soluções comerciais com capacidade para analisar isoladamente cada painel apresentam elevado custo relativo, uma vez que exigem cabeamento dedicado que, demandam adaptações físicas ao ambiente para acomodação dos cabos, agregando custos à tecnologia. Nesse contexto este artigo descreve o desenvolvimento de um módulo para monitoramento, em tempo real, de parâmetros indicadores de produção de sistemas fotovoltaicos baseado em power line communication. Essa tecnologia faz uso da capilaridade dos cabos de alimentação pré-existentes entre painéis fotovoltaicos e banco de baterias, para troca de informações. Os resultados obtidos no experimento foram considerado satisfatórios em função do desempenho do sistema e, apontam a viabilidade da aplicação de tecnologias PLC no monitoramento e aquisição de dados em sistemas de geração por energias renováveis.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Power Line Communication, Instrumentação.*

1. INTRODUÇÃO

As principais tecnologias emergentes de produção de energia renovável se dão pela força dos ventos, na geração eólica ou pela luz do sol, nos sistemas fotovoltaicos. Esta última, mais abundante, tem experimentado um crescimento notável, graças a vários fatores estimulantes, tais como a redução dos custos de produção e apoio programas governamentais (Alonso *et al.*, 2006), além de diversos progressos tecnológicos que tornaram os sistemas de geração fotovoltaica a fonte de energia renovável mais popular em áreas residenciais (Han *et al.*, 2014).

Apesar de sua popularidade, sistemas de conversão de energia solar apresentam uma baixa eficiência, em torno de 14 a 16%. Valores que tendem a piorar no processo de conversão e transmissão, que de acordo com Alonso *et al.* (2006), apresentam perdas médias em torno de 20% a 25%.

Situações anormais de funcionamento como, erros na busca do ponto máximo de potência, sombreamento, acúmulo de poeira e diferenças nas curvas V-I, mesmo que num único painel, implica na redução da quantidade de energia gerada por todo o sistema (Han *et al.*, 2014).

Do ponto de vista econômico, esses problemas tendem a aumentar o tempo de amortização dos investimentos, implicando no aumento do tempo de retorno de investimento (Jonk *et al.*, 2013).

Em plantas fotovoltaicos, os painéis solares são conectados em grupos, em serie ou paralelo, formando *strings* e, o sistema de sensoriamento e medição é instalado na saída de cada grupo, fato que implica num sistema de supervisão capaz de monitorar apenas o comportamento parcial ou global da instalação, ficando impossibilitado de realizar diagnósticos individuais em cada painel (Andò *et al.*, 2015).

Em instalações como as presentes em telhados e fachadas, a desagregação da informação de cada painel praticamente não existe, uma vez que, por motivos de redução de custos, utilizam-se apenas os dados medidos diretamente pelo inversor (Bertani *et al.*, 2015).

As técnicas de monitoramento, até então comentadas, levam a situações que impossibilitam a detecção rápida de anormalidades individuais nos painéis, fato que, pode levar a planta fotovoltaica a uma produtividade abaixo da qual foi projetada, ou mesmo, ao total desligamento até que a falha seja identificada e corrigida.

De acordo com Han *et al.* (2014), o monitoramento de um sistema fotovoltaico é essencial para manter seu alto nível de desempenho. Por outro lado um sistema comercial de supervisão e aquisição de dados (SCADA), capaz de monitorar individualmente o comportamento de cada painel demanda altos investimentos, uma vez que, geralmente apresentam uma estrutura com cabeamento exclusivo para a troca de informações entre os módulos, conectados a cada

painel fotovoltaico e interligado a uma central de processamento. Essas estruturas cabeadas apresentam um alto custo de instalação pois além do material empregado demanda serviços para organização do cabeamento de dados e adequação do ambiente pra a instalação dos mesmos.

Tecnologias sem fio, baseadas em radiofrequência (RF), são uma boa alternativa para substituição de estruturas cabeadas. Sua principal vantagem, em relação a esta última, se dá pela facilidade de instalação, taxas de transferência tão alta quanto a cabeada e baixíssimos custos de implantação. Em projetos SCADA módulos baseados em WLAN (Wireless Local Area Network) e *Zigbee* tem sido aplicados com resultados satisfatórios.

Se comparada com a WLAN, a tecnologia *Zigbee* apresenta menor custo de aquisição e menor consumo de energia. Entretanto, ambas compartilham a mesma faixa de frequência, e com isso os módulos *Zigbee* tendem a sofrer interferência do sinal da rede WLAN, comprometendo a confiabilidade da informação transmitida. Módulos WLAN, por outro lado, apresentam um custo relativamente alto e não são projetados de forma apresentar um baixo consumo energético. Ambas as tecnologias tendem apresentar uma redução significativa no desempenho quando existem obstáculos entre o transmissor e o receptor que, no caso, podem ser representados pelos próprios painéis fotovoltaicos. Em alguns locais podem não ter cobertura do sinal, adicionando assim, custos aos projetos pela necessidade de dispositivos repetidores.

Uma alternativa aos sistemas com cabeamento dedicado e ao RF, ainda pouco exploradas em sistemas SCADA, é a *Power Line Communication* (PLC). Essa tecnologia faz uso do próprio cabeamento de transmissão de energia para a comunicação bidirecional de informação, ou seja, a estrutura para implantação do sistema PLC já está previamente montada e conectada em todos os pontos a serem medidos, evitando custos com cabeamento dedicado ou, obras de adequação ao meio no qual será instalada a rede. Outra vantagem citada por Lin et al. (2003), é que com a produção em massa, o custo da placa PLC terá 50% do custo da placa *wireless*, isso, por não haver necessidade de componentes de radio frequência (RF) com relativamente elevados.

Sistemas PLC se mostram robustos para aplicações em redes de corrente contínua (C.C.), uma vez que foram projetados para trabalhar no ambiente ruidoso da rede de baixa tensão de corrente alternada (CA). Dessa forma, se comparadas, a rede em C.C. apresenta menor ruído que as redes em CA, oferecendo assim uma maior integridade e confiabilidade dos dados transmitidos.

Este artigo descreve o desenvolvimento um sistema de supervisão e aquisição de dados capaz de monitorar o comportamento individual de painéis fotovoltaicos. O sistema fora desenvolvido com objetivo de monitorar a geração de cada painel e prover métricas que possam ajudar na detecção e identificação rápida de componentes defeituosos. O sistema é disposto uma rede mestre-escravo, no qual, o meio de comunicação entre os mesmos é a rede PLC. Optou-se pelo uso de um protocolo aberto e bem difundido para o encapsulamento dos dados trocados na rede.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema implementado foi desenvolvido com base no microcontrolador PIC18F452, que possui um módulo conversor analógico digital (AD) de 10 bits com sete canais, utilizados na medição dos painéis, dois módulos para modulação por largura de pulso (PWM), responsáveis pela geração do sinal PLC, e um módulo RS-232, usado para prover a comunicação com o computador. O módulo de monitoramento de sistemas fotovoltaicos baseado em PLC consiste numa rede mestre-escravo *half-duplex* com capacidade de até 65536 dispositivos conectados simultaneamente. Os circuitos dos dispositivos mestre e escravo são idênticos, apenas o *firmware* que funciona no microcontrolador de cada um é diferente. Utilizou-se essa tática para redução de custos da montagem dos mesmos.

O hardware montado, mostrado na Fig. 1, é composto de duas placas: A placa de processamento (PP) e a placa de acoplamento com a rede C.C. (PA).

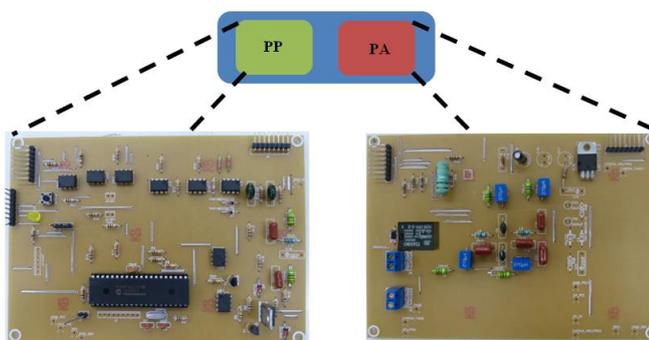


Figura 1 - Hardware implementado: Placa de processamento (PP), Placa de acoplamento (PA).

A placa de processamento é responsável por processar toda a informação gerada pelo sistema, além de modular e demodular o sinal PLC. Essa placa também responsável pela medição da corrente gerada por cada painel. Cada PP tem a capacidade de medir até sete sensores de forma simultânea, no entanto para a coleta dos resultados optou-se apenas pelo uso de um canal para a medição da corrente do painel fotovoltaico.

A placa PA serve para o acoplamento com a rede C.C., ela é responsável por isolar a tensão do barramento C.C., prejudicial a alguns circuitos dos módulos e, resgatar o sinal PLC injetado na rede. Seus circuitos compõem-se basicamente de filtros passa-faixa sintonizados na frequência do sinal PLC e um circuito responsável também de injetar o sinal PLC no barramento C.C.. Essa placa também capaz de ligar e desligar alguma carga por meio de um relé. Contudo, a funcionalidade de desligamento de cargas não foi utilizada na coleta de dados deste trabalho.

O dispositivo mestre é dotado de uma interface RS-232 para prover a comunicação com o computador, e tem as mesmas capacidades de medição dos módulos escravos. Porém neste experimento o módulo mestre fora utilizado apenas como *gateway* para o controle da rede.

Os módulos escravos são responsáveis por medir, em tempo real, a corrente gerada por cada painel, e enviar ao dispositivo mestre quando requisitado. Para a medição da corrente utilizou-se o sensor de efeito Hall ACS756. Esse transdutor é capaz de medir correntes C.C. ou C.A. de até 50 amperes, e apresenta uma tensão de isolamento de 3 kV. Sua saída proporciona uma tensão linear, com relação de transformação de 40 mV/A, de acordo com intensidade da corrente elétrica que passa através de seus terminais sensíveis. Esse transdutor apresenta em sua saída uma tensão de *offset* variável que tende a aumentar ou reduzir de acordo com a tensão de alimentação do sensor.

A curva de calibração utilizada para a transdução tensão/corrente pelo microcontrolador é mostrada na Fig. 2. Foi observado que fontes de alimentação instáveis podem levar a erros de medida, uma vez que o sensor tem uma tensão de *offset* sensível à mudanças na tensão de alimentação, assim, a curva de calibração deve ser ajustada de acordo com a fonte utilizada no projeto.

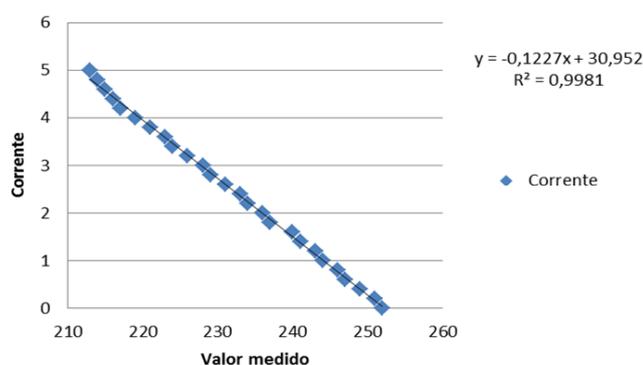


Figura 2 - Curva de Calibração pra o sensor ACS756.

Para a comunicação entre os módulos mestre-escravo utilizou-se o protocolo KNX PL 132, segundo Tompro (2009), KNX é um protocolo europeu aberto, usado por fabricantes de dispositivos eletrônicos de automação para comunicação entre seus dispositivos através de fios de pares trançados, RF, ou comunicação por rede elétrica. Misuzaki (2009) relata que esse padrão é administrado pela *Konnex Association*, e foi criado a partir da junção dos padrões EHS, BatiBYS e EIB.

O protocolo KNX especifica dois padrões para o uso da tecnologia PLC: O padrão PL 110 e o Padrão PL 132. A letra PL denota *power line* e os números especificam a frequência central da largura de banda destinada para cada padrão. De acordo com Tompro (2009) o padrão PL132 suporta comunicações com taxas de até 2400 bps, enquanto PL110 atinge 1.200 bps. A escolha desse protocolo torna o sistema desenvolvido compatível com outras tecnologias bem difundidas no mercado, garantindo também robustez na transmissão dos dados, uma vez que o KNX PL 132 usa a modulação por chaveamento de frequência (FSK), que garante facilidade na modulação e demodulação do sistema e imunidade a ruídos. A Fig. 3 mostra o sinal KNX PL 110, gerado módulo mestre. Em azul, (canal 1, 115,2 kHz) e rosa (canal 2, 105,6 kHz) é mostrado as portadoras FSK, e em vermelho é mostrado o sinal demodulado por um dispositivo escravo.

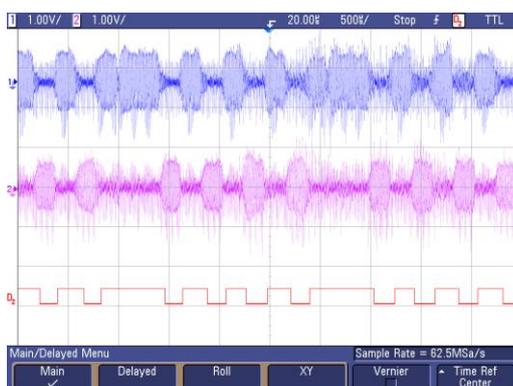


Figura 3 - Sinal PLC no barramento C.C..

A pesar de não ser projetado para operar em barramentos C.C. a análises feitas por Sirinamaratana *et al.* (2012), mostram que o sinal dos dois padrões PLC KNX não sofrem grandes atenuações devido às características elétricas dos painéis fotovoltaicos.

Para o controle dos dispositivos mestre e escravo, buscou-se construir *firmwares* quase idênticos e com funcionalidades comuns aos dois, diferindo apenas pelas funcionalidades específicas do mestre, que tem interface de comunicação serial e dos escravos que tem interface para medição de corrente. A Fig. 4 mostra o fluxograma do *firmware* dos dois dispositivos. A estratégia de manter os códigos fonte parecidos permitiu a otimização do tempo na construção dos mesmos e facilidade na detecção e correção de *bugs*, além de favorecer a manutenção e atualizações das funcionalidades do sistema.

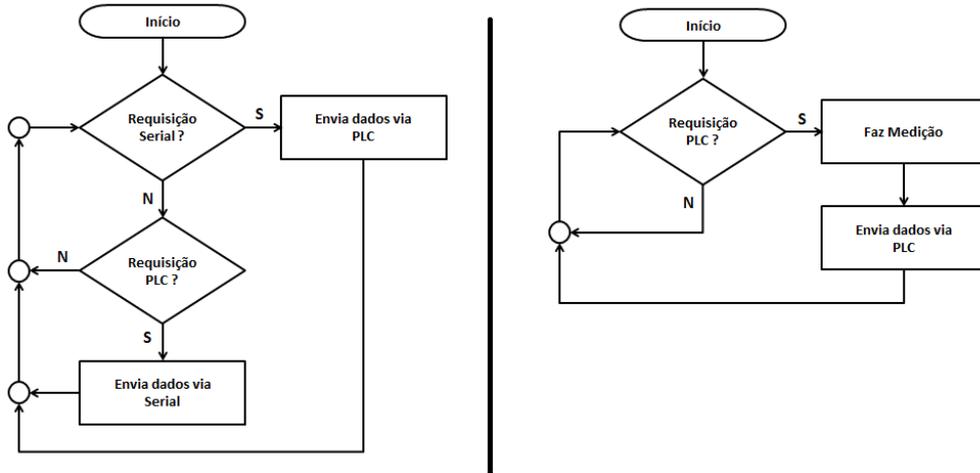


Figura 4 - Fluxograma do *firmware* dos dispositivos mestre (a) e escravo (b).

O programa para controle da rede PLC fora desenvolvido utilizando a IDE (*Integrated Development Environment*) Delphi. O *software* implementado tem a capacidade de fazer requisições temporizadas ao mestre e aos escravos, registrar e listar todos dos escravos ativos, além gerar *logs* de dados com medidas instantâneas para criação de gráficos e geração de arquivos de histórico.

Essas funcionalidades implementadas no *firmware* dos módulos da rede PLC e no programa de controle da rede, foram pensadas para testar a aplicabilidade e funcionamento de todos os elementos do sistema de monitoramento proposto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o teste do sistema e coleta de dados utilizou-se dois módulos escravos e um módulo mestre. Os módulos escravos foram instalados numa bancada didática, mostrado na Fig. 5, desenvolvida por pesquisadores do IFSertão-PE, exclusivamente para estudos na área de energia solar fotovoltaica.

O módulo mestre (*gateway* da rede) fora conectado ao sistema de armazenamento (baterias chumbo ácido) e a um computador remoto instalado no Laboratório de Pesquisa em Energias Renováveis (LAPER). A bancada didática utilizada é composta por dois painéis fotovoltaicos fixos de 65 Wp, um inversor de frequência, controlador de carga, banco de baterias, além de cargas C.C. e C.A..



Figura 5 - Módulo didático fotovoltaico.

Os painéis fotovoltaicos foram conectados em paralelo e associados ao controlador de carga e ao banco de baterias. Os testes foram feitos durante o período de três dias não contínuos, de forma a possibilitar ajustes em todo o sistema.

Por meio do software desenvolvido para o controle da rede PLC, fez-se requisições de forma automática para cada módulo escravo, durante intervalos variáveis de 5 segundos até 5 minutos.

A cada requisição, o dispositivo escravo correspondente, respondia ao mestre com a medida, em tempo real, da corrente instantânea fornecida pelo painel. A informação então enviada via porta serial para o computador, fora armazenada em arquivo e exibida através os gráficos. A Fig. 6 representa o resultado da medição individual de corrente gerada nos painéis um (P1) e dois (P2) durante um dos dias de teste.

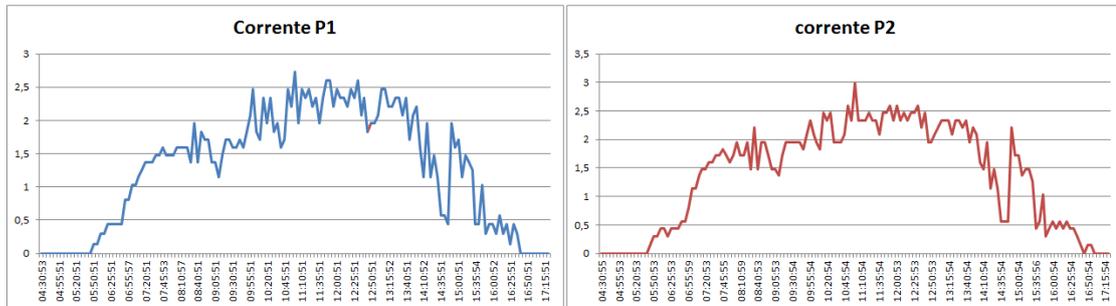


Figura 6 - Dados medidos durante um dia de análise.

Durante os testes de validação do sistema 95% das requisições foram atendidas com sucesso, confirmando a estabilidade do sistema e a confiabilidade da rede PLC.

A potência requerida por cada módulo mestre ou escravo é de 0,8 W que, no o experimento, representou 1,2%.

O sistema de medição de corrente baseado no sensor de efeito *Hall* em conjunto com o conversor analógico digital (AD) do microcontrolador, foi capaz de prover o valor instantâneo e exato da corrente, em tempo real, sem que houvesse falhas nas medições ou, quaisquer problemas relacionados a erros na curva de calibração. Também não foram verificados alterações no *offset* do sensor, comprovando sua exatidão e eficácia.

4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Nesse trabalho desenvolveu-se um módulo de supervisão e aquisição de dados para sistemas fotovoltaicos baseado em *power line communication*. A rede PLC apresentou bom desempenho, contabilizando apenas 5% de pacotes perdidos durante todo o período de testes. O sistema de medição baseado no sensor ACS756 funcionou sem quaisquer problemas, mostrando a eficácia e exatidão do mesmo.

Com base no comportamento do sistema proposto e nos dados colhidos, conclui-se que embora passível de ajustes, o sistema funcionou como o esperado, mostrando que a tecnologia PLC pode ser uma ótima alternativa no desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no desenvolvimento de pesquisas na área de energias renováveis.

Como desenvolvimento futuro espera-se montar uma rede com um maior número de dispositivos capaz de medir tensão, corrente e temperatura de cada painel solar, além do desenvolvimento de um software capaz de identificar por meio das medições dos escravos painéis defeituosos ou com funcionamento anormal.

REFERÊNCIAS

- Alonso, R. et al. Intelligent PV Module for Grid-Connected PV Systems. IEEE Industrial Electronics, pp 1066-1073, 2006.
- Andò, B. et al. Sentinella: Smart Monitoring of Photovoltaic Systems at Panel Level. Dept. of Electr., Itália, IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, pp. 2188-2199, 2015.
- Bertani, D. et al. Long term measurement accuracy analysis of a commercial monitoring system for photovoltaic plants. IEEE Workshop on Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems, p. 84-89, 2015.
- Han, et al. PLC-Based Photovoltaic System Management for Smart Home Energy Management System. Dept. of Eng. & Tele., Coréia do Sul, IEEE Consumer Electronics, pp. 184-198, 2014.
- Jonk, P. et al. Development of a Module Integrated Photovoltaic Monitoring System. Dept. of Electr. Eng., Austria, IEEE Industrial Electronics Society, pp. 8080-8084, 2013.
- Lin, Yu-Ju et al. A power line communication network infrastructure for the smart home. Dept. of Electr. & Comput. Eng., Florida Univ., FL, USA. IEEE Wireless Communications, p. 104-111, 2003.
- Misuzaki, L. E. P. Comparação de Mecanismos de Comunicação para a Casa Inteligente. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

Sirinamaratana, P.;Leelarasmee, E. Communication circuit for series connected solar panels. Dept. of Electr. Eng.,
Tailandia, IEEE Electron Devices and Solid State Circuit, 2012.
Tompros, S. EMD Design and specification report. 2009.

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEMS PHOTOVOLTAIC MODULE BASED ON POWER LINE COMMUNICATION

***Abstract.** Monitoring systems dedicated to the photovoltaic generation plants, in most cases, are not individual monitoring in each panel, hindering the rapid identification of any defective component that is contributing to the reduction in the performance of the network installation. The task of identifying and solving problems without the aid of an appropriate monitoring system can be a time consuming, during which the generating plant will produce an amount of energy below the designed levels or completely off until the problem is fixed. Some commercial solutions with the ability to individually analyze each panel have a high relative cost, since which demand dedicated cabling that require physical adaptations on the environment for accommodating cables, adding costs to the technology. In this context, this article describes the development of a module for monitoring, in real time, the parameters indicative of the photovoltaic system production based on power line communication. This technology uses the capillarity of pre-existing power cables between PV panels and battery bank to exchange information. The results obtained in the experiment were considered satisfactory depending on the system performance and point to the feasibility of the application of PLC technology in monitoring and data acquisition in generation systems by renewable energy.*

Key words: Solar Energy, Power Line Communication, Instrumentation.