

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO OPERACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE DE BAIXA TENSÃO

Luiz Henrique Lima Carvalho – luizhlcarvalho@hotmail.com

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

João Tavares Pinho - jtpinho@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. *O presente trabalho visa apresentar as etapas empregadas durante o desenvolvimento de um sistema de monitoração para avaliação de desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede de baixa tensão. O sistema de monitoração proposto foi desenvolvido utilizando a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino como unidade central de aquisição e tratamento do dados. Com o uso de sensores e circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais adequados, foi possível construir um protótipo de baixo custo que realiza levantamentos de dados com satisfatória exatidão acerca de variáveis relevantes para a análise operacional do sistema fotovoltaico, como tensão e corrente do gerador fotovoltaico, temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico e irradiância solar. Além disso, o protótipo proporciona que o sistema seja monitorado em tempo real de forma local, através das informações visualizadas nos displays de LCD instalados, tendo assim também utilidade como recurso didático em cursos e oficinas.*

Palavras-chave: *Sistema de monitoração, Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Arduino.*

1. INTRODUÇÃO

O incentivo ideológico à exploração de fontes renováveis de energia e o aumento da geração distribuída em todo o mundo proporcionou à sociedade um contato mais próximo com tecnologias como os aerogeradores e os sistemas fotovoltaicos. No que diz respeito a este último, cada vez mais pessoas se interessam acerca do seu funcionamento e de suas aplicações, tendo muitas vezes intenções futuras de adquirir tais sistemas. A possibilidade de produzir a própria energia elétrica e de ainda contribuir com o desenvolvimento sustentável do planeta são estímulos que têm convencido muita gente a pelo menos cogitar o investimento.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) já fazem parte da realidade de muitas pessoas em países como Alemanha, Espanha e Estados Unidos, e recentemente vêm sofrendo um processo de expansão dentro do território brasileiro. Em função disso, a realização de estudos e pesquisas é fundamental para entender e avaliar o quanto cada SFCR pode produzir de energia elétrica e quais são os fatores que influenciam no seu desempenho, estejam esses fatores relacionados às condições climáticas do local, aos aspectos associados à instalação ou à escolha dos equipamentos que compõem o sistema (Bayrak e Cebeci, 2013) (Fuentes *et al*, 2014).

Assim, neste trabalho apresenta-se um protótipo de sistema de monitoração desenvolvido com o objetivo de contribuir com os estudos e análises a respeito de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, realizando o levantamento de dados operacionais de um dos SFCR instalados no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará - GEDAE/UFPA., localizado na cidade de Belém.

2. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE MONITORADO

O SFCR escolhido para a implementação do sistema de monitoração está instalado na área de testes do GEDAE/UFPA, pois este SFCR tem sido utilizado como sistema demonstrativo de uma instalação destinada às atividades de divulgação relacionadas à microgeração distribuída, como também tem sido útil como ferramenta de capacitação de recursos humanos, com ênfase para a promoção de diretrizes que orientem instaladores no processo de implantação de SFCRs, bem como o comissionamento e acompanhamento da operação de sistemas deste tipo.

O SFCR monitorado é composto por 6 módulos fotovoltaicos de 245 Wp em série da marca Yingli Solar, modelo YL245P-29b, constituindo assim um gerador fotovoltaico de 1,47 kWp de potência. O inversor utilizado no sistema é o inversor *grid tie* SB 1200, da marca SMA, que apresenta uma potência nominal de 1200 W. Deste modo, optou-se por um ligeiro sobredimensionamento do gerador em relação ao inversor, resultando em um Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) de aproximadamente 0,82 (Amorim, 2015).

Juntando-se ao gerador fotovoltaico e ao inversor, encontram-se instalados todos os componentes de proteção, seccionamento e medição necessários para a interligação do sistema fotovoltaico à rede elétrica de baixa tensão, conforme orientado pela Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL (Brasil, 2015) e pela norma técnica NT.31.020 da concessionária de energia elétrica local (Celpa, 2015).

A Fig. 1 mostra o *layout* geral do SFCR no qual foi instalado o sistema de monitoração desenvolvido, estando ressaltados os principais elementos que compõem o sistema. Mais detalhes sobre os aspectos relacionados à instalação deste sistema são encontrados no trabalho de Amorim (2015).

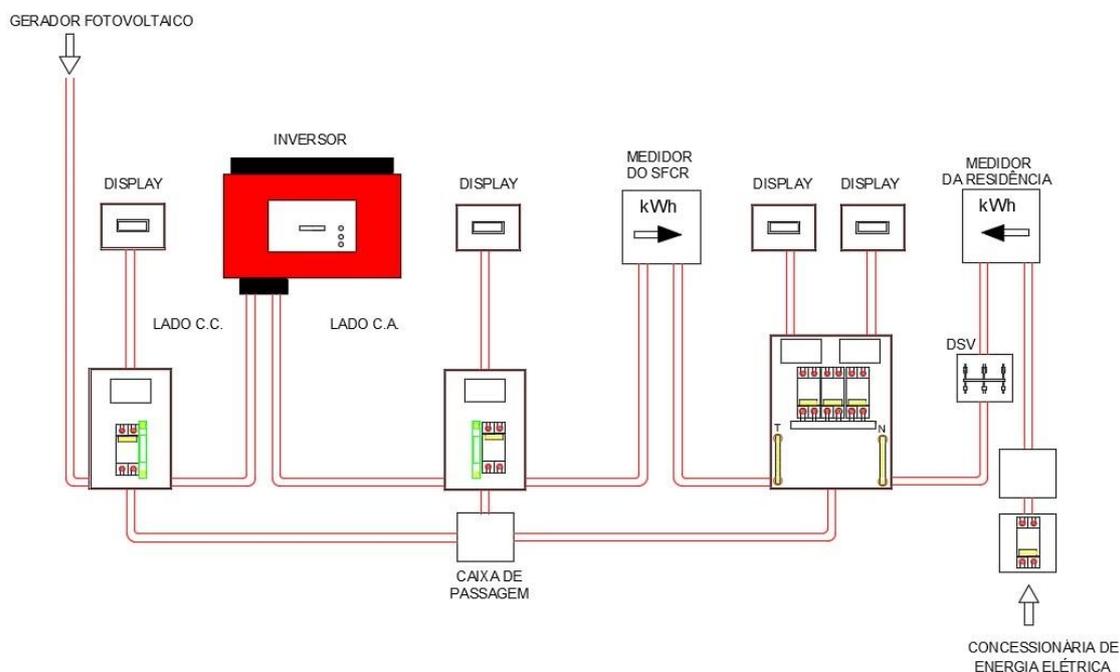


Figura 1 - *Layout* geral do SFCR monitorado.

2. PROJETO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

O protótipo do sistema de monitoração foi para a monitoração de oito variáveis do SFCR, a saber: corrente e tensão do gerador fotovoltaico, corrente e tensão do inversor, corrente da rede elétrica, corrente da carga, temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico e irradiância solar. A Fig. 2 resume de maneira ilustrativa os principais elementos envolvidos no funcionamento do sistema.

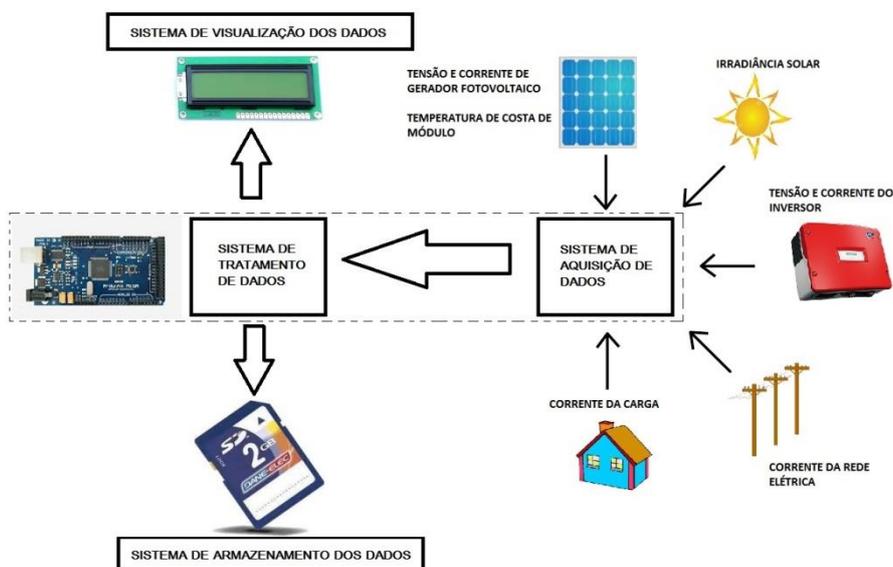


Figura 2 - Diagrama esquemático do sistema de monitoração.

A fim de melhor explicar sobre os elementos constituintes do sistema de monitoração e concebidos em sua fase de projeto, adotou-se uma divisão em quatro subsistemas descritos a seguir.

2.1 Sistema de aquisição de dados

Com o intuito de realizar a medição das quatro grandezas mencionadas (corrente, tensão, temperatura e irradiância solar), foram escolhidos sensores e transdutores adequados para cada grandeza, a partir dos quais foram elaborados os circuitos de condicionamento necessários a cada um. Os sensores/transdutores em conjunto com os seus respectivos circuitos de condicionamento formam o sistema de aquisição de dados.

Este sistema é responsável por converter as grandezas que se desejam medir em sinais elétricos mensuráveis, de forma que eles possam ser devidamente recebidos pela entrada analógica do microcontrolador empregado. Nesta função, os sensores e transdutores atuam primeiramente, transformando a grandeza medida em um sinal elétrico ou, no caso das medições de tensão e corrente, que já são sinais elétricos, apenas adéquam a magnitude do sinal para que possa ser manipulado mais facilmente. Em seguida, os circuitos de condicionamento agem de forma a modificar os sinais analógicos vindos dos sensores e transdutores a fim de torná-los adequados para serem recebidos pelo conversor analógico-digital do microcontrolador.

2.2 Sistema de tratamento de dados

O sistema de tratamento de dados é exclusivamente composto pela plataforma de prototipagem eletrônica Arduino Mega 2560 (Arduino, 2015). É através do Arduino que os sinais analógicos vindo dos circuitos de condicionamento dos sensores e transdutores são digitalizados, permitindo que eles sejam manipulados pelo microcontrolador existente na plataforma. Assim, todas as operações lógicas e aritméticas e as tomadas de decisões do sistema de monitoração são feitas pela ação do Arduino devidamente programado.

A plataforma do Arduino Mega 2560 conta com um microcontrolador ATmega2560, do fabricante Atmel, além de possuir 16 entradas analógicas, 54 entradas/saídas digitais, memória flash de 256 kb e *clock* de 16 MHz. A sua programação é feita por meio de um Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE, em inglês) próprio para o Arduino, no qual os programas são escritos em uma linguagem de programação padrão, similar às linguagens C e C++.

O Arduino é particularmente conhecido por ser uma plataforma de código aberto, de utilização simples e acessível a todos, de modo que tanto o *hardware* quanto o *software* podem ser adaptados às necessidades de cada projeto. Somando a isso a grande comunidade que faz uso do Arduino e que compartilha abertamente seus testes e experimentos realizados, têm-se que a utilização da plataforma como unidade de controle do sistema de monitoração é perfeitamente cabível dentre as tantas possibilidades de uso para o Arduino.

2.3 Sistema de visualização dos dados

A programação feita para o Arduino realiza, entre outras funções, os cálculos dos valores RMS para as variáveis de corrente alternada (c.a.) e dos valores médios para as variáveis de corrente contínua (c.c.) e os apresenta nos *displays* de LCD instalados no sistema de monitoração na medida em que os cálculos são feitos. Com isso, é possível acompanhar em tempo real e de forma local os valores RMS e médios das variáveis monitoradas pelo sistema. Além desses cálculos, o Arduino também calcula as potências ativas e as potências aparentes na entrada e na saída do inversor de tensão, na entrada para as cargas e na entrada para a rede elétrica.

Esta é uma boa forma de acompanhar o funcionamento do SFCR e verificar informações básicas a respeito dele, como quanto do que está sendo produzido está alimentando as cargas, ou quanto está sendo injetado na rede, ou quanto está sendo produzido para dada condição de irradiância e temperatura, entre outros. Do mesmo modo, a visualização por meio dos LCDs atua como uma importante ferramenta didática na utilização do SFCR para a realização de cursos e oficinas de capacitação em sistemas fotovoltaicos. Com as informações exibidas, torna-se possível acompanhar de forma prática alguns dos conceitos vistos de forma teórica, como por exemplo a potência produzida em função da temperatura e irradiância solar, facilitando a compreensão acerca do assunto.

2.4 Sistema de armazenamento dos dados

Do mesmo jeito que o Arduino é responsável pelo cálculo dos valores RMS e médios das variáveis, ele também realiza uma média aritmética dos valores de cada umas das variáveis monitoradas em um intervalo de 5 minutos e os salva em um cartão de memória SD, juntamente com os valores máximos e mínimos obtidos dentro desse intervalo. Adicionalmente, também são salvas as médias dos valores de potência ativa e aparente calculadas.

É por meio deste armazenamento no cartão de memória que é criada uma base de dados a respeito do funcionamento do SFCR, que possibilita a produção de gráficos, o acompanhamento da produção do SFCR ao longo de períodos mais extensos, como meses ou anos, a identificação de relações de influência entre a produção de energia e os fatores climáticos etc. Em outras palavras, é por meio da análise desses dados armazenados que se torna viável a avaliação do desempenho operacional do SFCR, que é um dos objetivos primordiais do sistema de monitoração proposto.

3. MONTAGEM DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

De maneira a organizar melhor a estrutura física do sistema de monitoração, confeccionou-se uma placa de circuito impresso para cada um dos circuitos de condicionamento dos sensores e transdutores. Para alimentar estes circuitos, assim como os sensores e o Arduino, foi instalada junto ao sistema uma fonte tipo ATX de 300 W para utilização de tensões simétricas. Procurou-se adequar os elementos físicos constituintes do sistema de monitoração ao espaço físico disponível nos quadros de distribuição colocados para o sistema fotovoltaico. Para melhor compreensão do processo de instalação do sistema de monitoração, a Fig. 3 mostra uma imagem do SFCR após a instalação das placas de circuito, do Arduino e da fonte de alimentação.

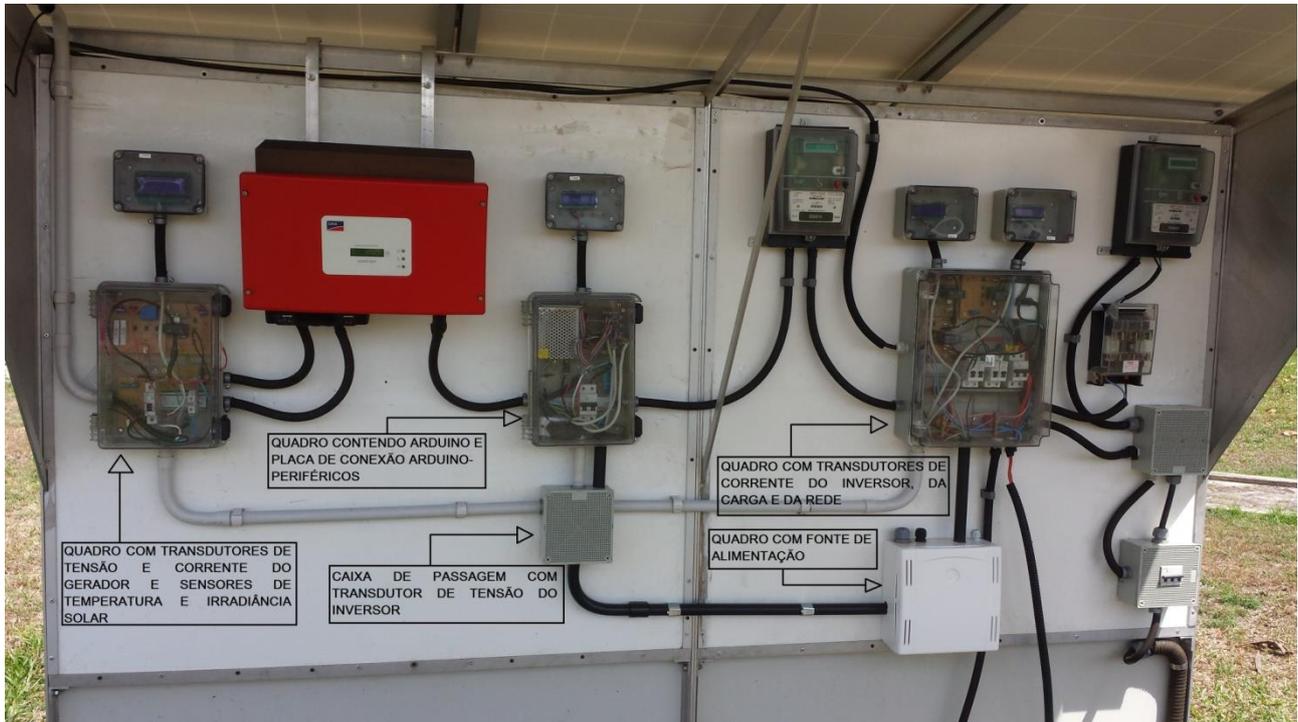


Figura 3 - Imagem após a instalação do sistema de monitoração.

4. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

O programa desenvolvido para o funcionamento do sistema de monitoração consiste em algumas etapas básicas, as quais estão divididas em duas partes principais. A primeira parte é a parte inicial do programa, que é executada apenas uma vez quando o Arduino é ligado, sendo responsável por realizar os procedimentos de configuração do programa, como a definição de bibliotecas e variáveis e a inicialização de componentes periféricos. A segunda parte principal consiste na rotina de amostragem das variáveis medidas, realização dos cálculos dos valores RMS e médios, cálculo das potências, armazenamento dos dados no cartão de memória e exibição nos LCDs, etapas nas quais o programa fica realizando um laço durante todo o tempo que o programa permanecer em funcionamento.

Durante a etapa de amostragem das variáveis, são coletadas 5000 amostras das variáveis c.a., que são as correntes da rede elétrica, da carga e do inversor e a tensão na saída do inversor, e 2500 amostras das variáveis c.c., que são a temperatura, irradiância solar e tensão e corrente do gerador. Com essas amostras, são realizados os cálculos dos valores RMS para as variáveis c.a. e dos valores médios para as variáveis c.c. Cada valor RMS ou médio calculado para as variáveis são amostrados simultaneamente nos LCDs. O programa então realiza uma média para os valores calculados de cada variável dentro do intervalo de um minuto, para ao fim de 5 minutos, realizar uma nova média com as médias de cada um dos 5 minutos precedentes, valor esse que é armazenado em arquivo .csv no cartão de memória. Além do mais, também são salvos os maiores e menores valores calculados das médias e valores RMS dentro do respectivo intervalo de 5 minutos. Feito isso, o programa reinicia sua rotina de amostragem das variáveis.

O Arduino é programado para criar um arquivo para cada dia de monitoração no cartão de memória, de modo que cada arquivo é devidamente identificado pelo nome com a data nas quais os dados foram armazenados. Complementando isso, cada vez que o Arduino salva os dados ao fim dos intervalos de 5 minutos, é colocado um rótulo de data e hora daquele armazenamento dentro do arquivo. Dessa forma, contando que o sistema funcione plenamente e sem interrupções, são armazenados 288 pontos de dados por dia para cada variável, que corresponde ao período de 24 horas dividido por intervalos de 5 minutos.

5. CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E TESTE DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

Visando garantir que os valores de saída dos sensores e transdutores operados no sistema de monitoração estivessem os mais condizentes possíveis com os valores reais das variáveis medidas, foram realizados ensaios de calibração em laboratório dos sensores e transdutores, de forma a encontrar a relação matemática entre os valores indicados pelo sistema de medição (calibrador) e os valores lido na entrada analógica do microcontrolador. Com esse fim, os sensores e transdutores foram submetidos à medição de valores conhecidos com o intuito de observar os valores fornecidos em suas saídas, possibilitando assim traçar a curva de calibração de cada um.

Estando o sistema de monitoração instalado junto ao SFCR e os sensores e transdutores devidamente calibrados, deu-se início ao processo de validação e teste do sistema. Para verificar se os valores fornecidos pelo sistema estavam dentro de uma margem aceitável de exatidão, foram utilizados os mesmos instrumentos de medição que no processo de calibração. No caso, utilizou-se o osciloscópio digital *Fluke 199C Scopemeter Color* para a calibração e validação das grandezas elétricas e o termômetro digital MT-455 da marca Minipa para calibrar e validar as medições de temperatura. Para calibrar e validar os valores do sensor de irradiância solar, fez-se uso de dados fornecidos por um sistema de monitoração instalado em outro sistema fotovoltaico no GEDAE/UFPA (Maia, 2011), cujo sensor de irradiância é o mesmo empregado no presente trabalho (piranômetro LI-200SA), encontrando-se também na mesma orientação e inclinação.

A partir da análise e comparação entre os valores fornecidos pelo sistema de monitoração e os valores fornecidos pelos outros instrumentos de medição, tornou-se evidente que o sistema de monitoração fornecia informações adequadas e condizentes para a realização de análises acerca do sistema fotovoltaico monitorado.

No que diz respeito aos testes feitos com o sistema, inicialmente o mesmo foi posto em funcionamento ininterrupto durante períodos que variavam de 2 a 3 dias, a fim de analisar seu comportamento de modo geral e a confiabilidade dos dados apresentados. Tendo apresentado retorno positivo para as análises realizadas, passou-se a colocar o sistema de monitoração para funcionar durante maiores períodos de tempo, sendo interrompido o funcionamento apenas por faltas de energia elétrica da rede ou por motivo de ocasionais manutenções e ajustes no sistema.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Uma vez realizados os testes e validações necessários, o sistema de monitoração passou operar em plena funcionalidade, permitindo a coleta de uma considerável quantidade de dados acerca do SFCR. Com o auxílio desses dados, viabilizou-se a construção de gráficos que melhor ilustram como o protótipo desenvolvido neste trabalho pode ser de grande utilidade para a realização da avaliação do desempenho operacional do SFCR. Vale ressaltar que o objetivo do trabalho não é fazer a análise operacional do SFCR em si, mas proporcionar os dados que permitam que tal análise seja realizada posteriormente.

Como forma de exemplificar o uso dos dados como ferramenta de análise, foi primeiramente construído um gráfico relacionando o efeito da irradiância solar sobre a temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico, conforme pode ser observado na Fig. 4.

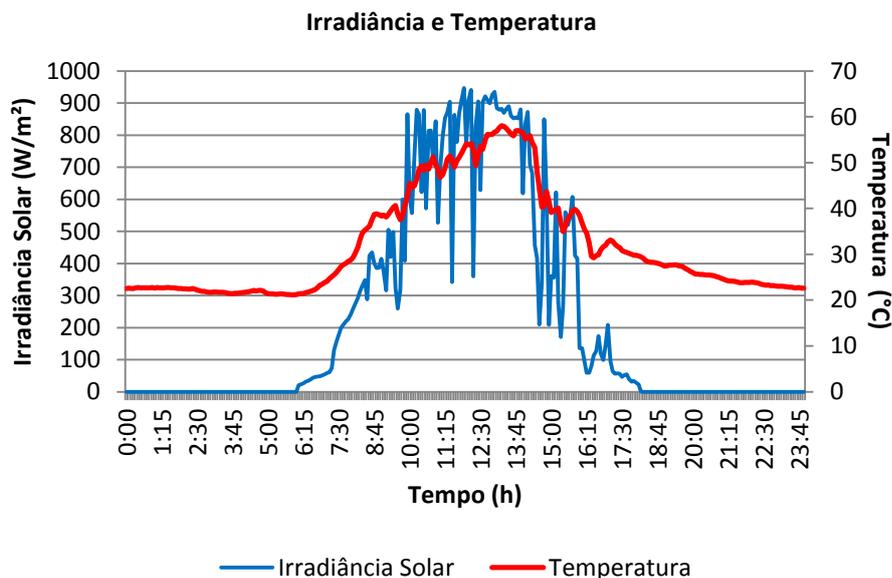


Figura 4 - Gráfico da temperatura e da irradiância solar para um dia de medições.

Outro exemplo que pode ser apresentado sobre como os dados coletados podem auxiliar na análise do SFCR é o gráfico da Fig. 5, que mostra a curva de produção de potência ativa juntamente com a temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico.

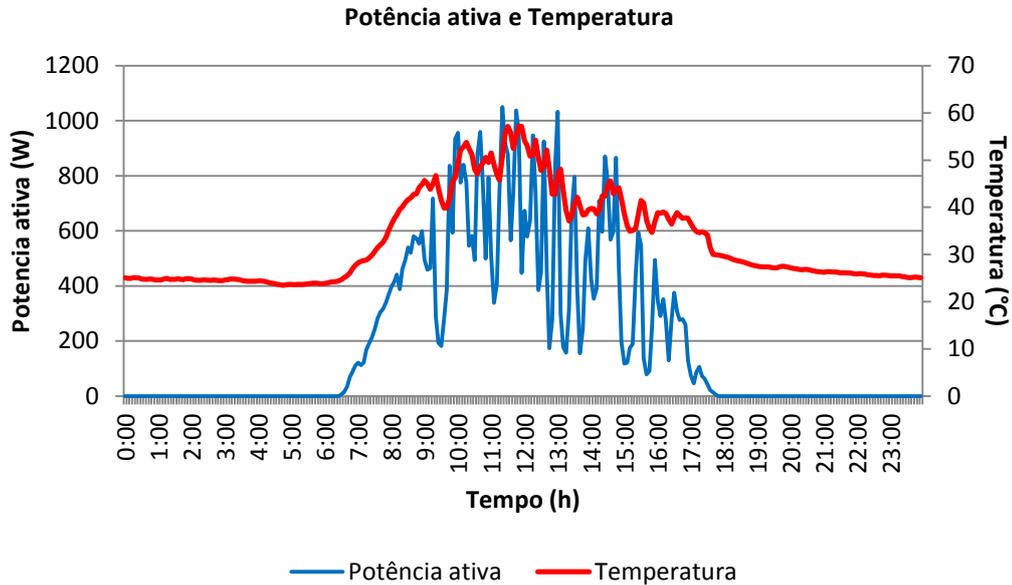


Figura 5 - Gráfico de potência ativa e da temperatura para um dia de medições.

Um dos parâmetros mais analisados quando é realizado um estudo acerca de um SFCR é a eficiência do inversor, uma vez que este parâmetro mostra o quanto da quantidade de energia elétrica disponibilizada pelo gerador fotovoltaico está de fato chegando às cargas e à rede elétrica. Como a potência ativa fornecida pelo inversor e a potência ativa na entrada do equipamento são apresentadas pelo sistema de monitoração, também torna-se possível construir o gráfico da eficiência do inversor ao longo do dia, o que auxilia a visualizar em que momentos do dia o inversor está sendo mais ou menos eficiente. A Fig. 6 mostra um exemplo do gráfico de eficiência do inversor ao longo de um dia típico de funcionamento. Através deste gráfico, observa-se o inversor funcionando com uma baixa eficiência nos períodos de baixa irradiância, mais precisamente no começo da manhã e no fim da tarde, e operando perto dos 90% de eficiência durante o resto do dia.

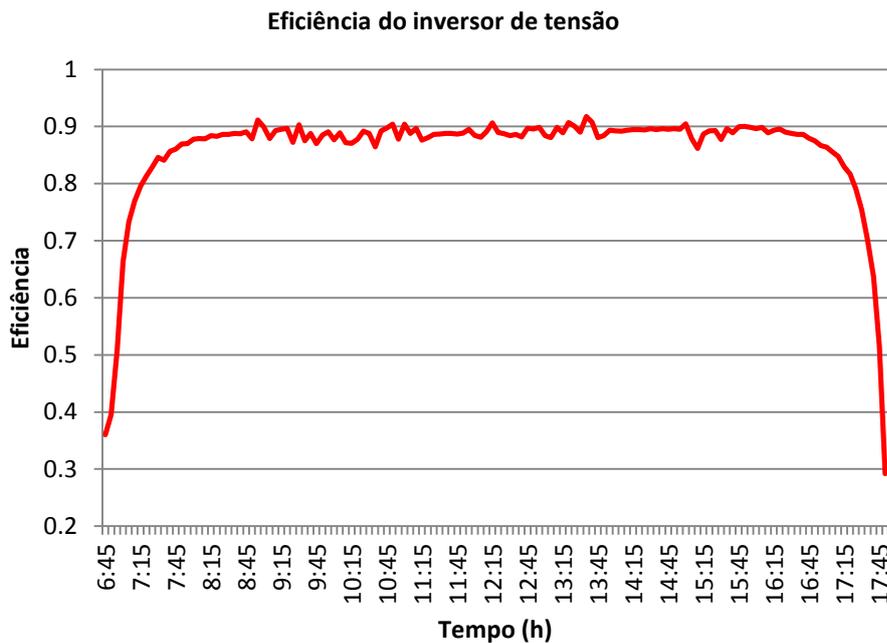


Figura 6 - Gráfico da eficiência do inversor ao longo de um dia.

As possibilidades de combinações dos dados para criação de gráficos e tabelas são bastante extensas, de modo que fica a cargo do analista de dados definir quais serão mais relevantes para avaliar o desempenho do SFCR. Como último exemplo de utilização dos dados, fez-se o levantamento da produção diária do SFCR monitorado ao longo de uma semana. Os dados a respeito da energia elétrica produzida em cada dia da semana são mostrados no gráfico de colunas na Fig. 7. A tabela 1 complementa os dados da Fig. 7, exibindo a média da energia diária produzida na semana em questão. Os dados coletados se referem ao período compreendido entre os dias 20 e 26 de agosto de 2015.

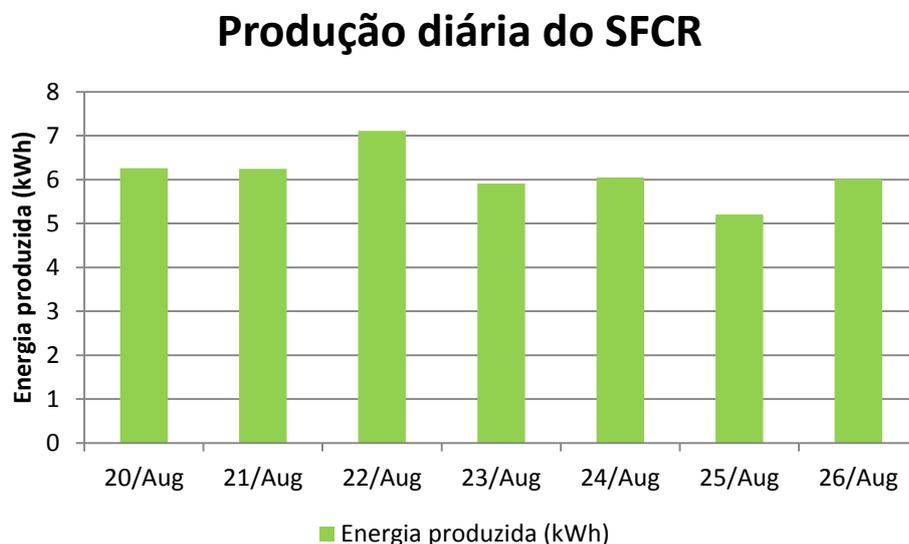


Figura 7 - Gráfico com a produção diária do SFCR no período de 20 a 26 de agosto.

Tabela 1 - Média semanal da produção diária do SFCR no período de 20 a 26 de agosto.

Dia	20/ago	21/ago	22/ago	23/ago	24/ago	25/ago	26/ago
Potência produzida (kWh)	6,26	6,25	7,11	5,91	6,05	5,20	6,01
Média	6,11 kWh						

7. CONCLUSÕES

Tendo como objetivo principal desenvolver um sistema de monitoração que permitisse a avaliação operacional de um sistema fotovoltaico conectado à rede, o presente trabalho foi realizado mostrando as etapas que envolveram o processo de projeto, montagem e teste do sistema, além de ter buscado evidenciar as possibilidades de contribuição com o fornecimento de dados para o estudo de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Desse modo, o sistema de monitoração desenvolvido neste trabalho apresentou resultados consistentes no que diz respeito à monitoração do sistema fotovoltaico no qual foi instalado, embora ainda haja uma parcela de aprimoramentos que podem ser realizados no sistema de forma a torná-lo mais eficiente e robusto na execução de suas tarefas de monitoramento.

O uso da plataforma de prototipagem Arduino mostrou-se uma boa escolha para realizar as funções de controle do sistema de monitoração, uma vez que é uma ferramenta de baixo custo, fácil programação e com uma grande capacidade de adaptação às necessidades do projeto. Com a sua utilização, pode-se alterar diversos cálculos, parâmetros e funções do sistema de monitoração de acordo com a conveniência para a avaliação do sistema. Além do mais, há várias alternativas viáveis para acrescentar novas funções ao sistema, como a possibilidade de implementar um sistema de transmissão de dados via cabo Ethernet ou via transmissão *wireless*, o que permitiria a monitoração remota do SFCR.

Durante todo o desenvolvimento do projeto, primou-se por elaborar e organizar um protótipo que pudesse atender não somente os fins laboratoriais e educacionais aos quais se propôs inicialmente, mas que também tivesse qualidade para que possa ser replicado em sistemas semelhantes.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do edital **Chamada Universal - MCTI/CNPq N° 14/2013** e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA), além do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA).

REFERÊNCIAS

- Amorim, A. S., 2015. Teste e Demonstração para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Arduino, 2015. Dados técnicos sobre o Arduino Mega 2560. Disponível em <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>>. Acesso em 25 de agosto de 2015.
- Bayrak, G., Cebeci, M., 2013. Monitoring a grid connected PV power generation system with labview, International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Madri, Espanha, 549-554.
- Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. Resolução normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da União, 19 abr. 2012, seção 1, v. 149, n. 76, p. 53. Brasília, DF.
- Celipa, 2015. Norma técnica NT 31.020 de outubro de 2014. Conexão de microgeração distribuída ao sistema de baixa tensão.
- Maia, K. C. S., 2011. Monitoração e Análise de um Sistema de Geração Individual com Fontes Intermitentes do Tipo Fotovoltaico, com Disponibilidade Energética Mensal de 13 kWh. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Belém, PA.
- Fuentes, M., Vivar, M., Burgos, J.M., Aguilera, J., Vacas, J.A., 2014. Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 130, novembro 2014, p. 529-543.

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF A LOW-VOLTAGE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Abstract. *This paper aims to present the steps conducted during the development of a monitoring system to evaluate the performance of a low-voltage grid-connected photovoltaic system. The proposed monitoring system was developed utilizing the open-source computer hardware and software Arduino as central acquisition and processing unit. Making use of appropriate sensors and signal conditioning electronic circuits, it was possible to built a low-cost prototype which provides accurate data related to relevant variables to the PV system's analysis, as photovoltaic generator's voltage and current, backside surface temperature of PV module and solar irradiance. Besides that, the prototype provides locally real-time information about the monitored system through the installed LCDs, thus contributing as a didactic resource in courses and workshops.*

Key words: *Monitoring System, Grid-Connected Photovoltaic System, Arduino.*