

Implementação de um Sistema Fotovoltaico de Rastreamento Solar Monitorado Remotamente

Gabriel S. Antoun Netto*. Thiago Oliveira Pais**
Téo Cerqueira Revoredo*** Pedro Henrique T. de M. Oliveira****

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil
(Tel: +55 21 98232-7087; e-mail: gabrielsanetto@gmail.com).

** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil
(e-mail: thiagopais.enguerj@gmail.com)

*** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil
(e-mail: teorevoredodo@uerj.br)

**** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Rio de Janeiro, Brasil
(e-mail: phtenorio.eng@gmail.com)

Abstract: This work presents the development of a small solar generator plant with tracking capacity, designed to operate either on or off grid, also encompassing a remote communication system for monitoring purposes. The project aims to provide a basis for the development of low-cost solutions when compared to plants controlled by programmable logic and has its computer system based on open-source platforms. Results of field tests are presented that validate the operation and remote monitoring of the system, as well as its greater power generation when compared to a fixed photovoltaic system.

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo gerador solar com capacidade de rastreamento, podendo operar em dentro ou fora da rede, abrangendo também um sistema de comunicação remota para fins de monitoramento. O projeto apresenta uma base para o desenvolvimento de soluções de baixo custo em comparação com plantas controladas por lógica programável e tem seu sistema de computador baseado em plataformas de código aberto. São apresentados resultados de testes de campo que validam a operação e o monitoramento remoto do sistema, bem como sua maior geração de energia em comparação com um sistema fotovoltaico fixo.

Keywords: Five to ten keywords separated by semicolon. solar generator plant; tracking; remote communication system; monitoring; power generation.

Palavras-chaves: protótipo gerador solar; rastreamento; sistema de comunicação remota; monitoramento; geração de energia.

1. INTRODUÇÃO

A energia é primordial para o desenvolvimento humano e tem estado constantemente sujeita a aumentos de demanda. No entanto, a maior parte da produção é realizada através de fontes de energia não renováveis, que degrada o meio ambiente, principalmente pela emissão de gases de efeito estufa. Como resultado e a fim de reduzir esses efeitos negativos, medidas devem ser adotadas em todo o mundo, não só para limitar essas emissões, mas também para desenvolver novas formas de produção de energia sustentável. Além disso, o surgimento de novas tecnologias de informação e comunicação em redes de baixa potência leva a uma importante mudança de paradigma e ajuda a estabelecer a microgeração como uma alternativa viável ao fornecimento de energia.

Entre as alternativas para geração de energia a partir de recursos renováveis, pode-se citar pequenas turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, coletores térmicos, miniusinas hidrelétricas e microturbinas, entre outras. Ao se concentrar principalmente em fontes de energia renováveis, a geração distribuída melhora o desempenho do sistema elétrico e apresenta grandes vantagens não apenas em termos ambientais, mas também em economia e tecnologia (De Souza Silva, J.L.).

Atualmente, a microgeração se destaca junto de medidores inteligentes de eletricidade, como um importante assunto de pesquisa e desenvolvimento, especialmente adequado ao desenvolvimento de cidades inteligentes. Além disso, importantes estudos associados à geração híbrida e à busca de aumentar a eficiência das diferentes formas de geração

envolvidas também são relevantes. Nesse contexto, a pesquisa básica e aplicada voltada para sistemas de geração de energia, em grande ou pequena escala, torna-se de grande importância para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos aplicáveis a essa nova realidade. Os sistemas de microgeração, aplicáveis a residências e estabelecimentos comerciais, baseados na geração fotovoltaica são de grande relevância e o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo de fabricação, instalação e manutenção, que devem, no entanto, ter um bom desempenho com base em diversos critérios é importante para o estabelecimento de uma nova matriz energética sustentável em todo o mundo. A utilidade do uso de sistemas de microgeração fotovoltaica é baseada em variáveis intrínsecas a cada ambiente. O rastreamento solar, por exemplo, requer consumo de energia para operação, além de custos adicionais de manutenção, entre outros, que podem não ser justificáveis em determinadas instalações.

Este trabalho tem como objetivo contribuir para esta discussão, apresentando o desenvolvimento de uma pequena usina geradora solar com capacidade de rastreamento solar. A planta é projetada para operar em aplicações dentro ou fora da rede e abrange um sistema de comunicação remota para fins de monitoramento. O projeto visa fornecer uma base para o desenvolvimento de soluções de baixo custo quando comparadas a plantas controladas por lógica programáveis e tem seu sistema computacional baseado em plataformas de código aberto.

2. RASTREAMENTO SOLAR E *HARDWARE*

Um rastreador solar é um sistema capaz de mover o painel fotovoltaico para seguir a posição do sol. Um rastreador ideal permitiria que o sistema fotovoltaico apontasse exatamente para a posição do Sol, compensando as mudanças no ângulo de altitude diária, o desvio sazonal da latitude e o ângulo de azimute da estrela, com sistema de controle operando de forma constante e sem oscilações. Para mover o painel fotovoltaico, uma estrutura de dois eixos é acoplada a motores independentes acionados por meio de drivers comandados por um microcontrolador central. O posicionamento correto do painel fotovoltaico é realizado em duas etapas: a orientação geral é baseada no conceito de tempo solar, a partir do qual os ângulos horário e de declinação são calculados. Em seguida, é realizado um ajuste da posição atual, definido como ajuste fino, de acordo com as condições ambientais do momento, utilizando informações obtidas de sensores do tipo resistência dependente de luz (LDR).

O algoritmo de rastreamento pode ser resumido nas principais etapas mostradas na Tabela 1. Para operar ao ar livre sujeito a mau tempo, os componentes eletrônicos são instalados dentro de um invólucro IP 55, que protege o circuito interno contra poeira e jatos de água. Uma estrutura de aço com quatro rodas de travamento facilita a mobilidade e fixação da carcaça e outros elementos externos em vários lugares. Alguns gabinetes adicionais são usados para distribuir melhor os componentes dentro da carcaça, fabricados sob medida usando uma impressora 3D,

facilitando a fabricação de peças de reposição ou adaptações no sistema pelo próprio usuário. A Fig. 1 apresenta o aspecto externo e interno dos componentes do sistema de microgeração.

Tabela 1. Algoritmo de rastreamento

Passo	Comando
1	Início do dia
2	Cálculo das Variáveis do dia
3	Tempo solar
4	Cálculo de ângulos de declinação e hora
5	Leitura dos LDR's (t + 10 minutos)
6	Ajuste de ângulos
7	Acionamento de motores de passo
8	Movimento do painel
9	Leitura de valores de tensão e corrente
10	Cálculo de potência
11	t minutos
12	Cálculo do tempo do relógio local
13	Se não for o fim do dia: volte para 2
14	Senão: fim do dia

A execução do algoritmo de rastreamento é realizada por um microcontrolador, assim como a geração dos sinais de acionamento para os drivers do motor e da troca de dados com os sensores do sistema, como medições de tensão e corrente. Embora um sistema de monitoramento remoto projetado e os dados históricos sejam armazenados na nuvem, um armazenamento de dados local também é implementado, usando uma memória do tipo SD Card operada através de um módulo integrado ao microcontrolador. Quatro variáveis são escolhidas para serem registradas: tensão e corrente geradas pelo painel fotovoltaico e temperatura e umidade dentro do gabinete do sistema.

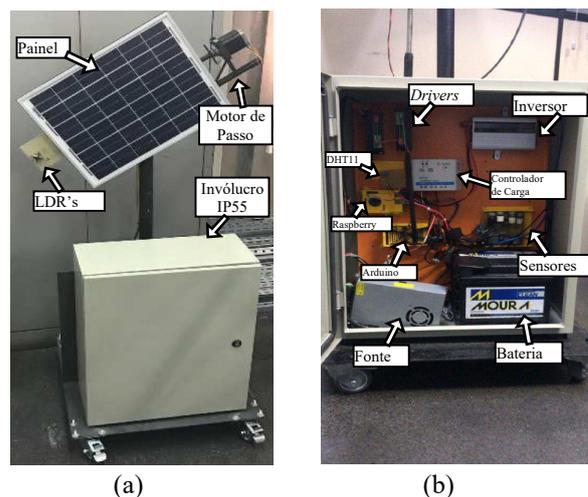


Fig. 1 Apresentação externa (a) e interna (b) do protótipo.

O sistema de energia é projetado de tal forma que o protótipo pode operar nos conectado ou não à rede. Engloba uma bateria, um controlador de carga e um inversor. O controlador de carga é responsável por gerenciar o fluxo de energia entre o painel fotovoltaico, a bateria e a rede elétrica, além de proteger a bateria contra condições inadequadas de operação.

Um elemento de armazenamento em uma planta de microgeração solar é uma parte importante do sistema para ambos os modos de operação (dentro e fora da rede). Quando fora da rede, o elemento de armazenamento de energia permite o uso de energia acumulada durante o dia durante a noite ou em cenários fortemente nublados. Ao operar na conectada à rede, esse elemento é útil para permitir que o sistema forneça energia ao cliente final ou à rede elétrica e, assim, reduza o estresse sobre este último em períodos de pico de demanda. Finalmente, o inversor é usado para converter a corrente contínua gerada pelo painel fotovoltaico em uma corrente alternada que pode ser fornecida pela rede elétrica ou pelo equipamento operado. O inversor também desempenha um papel secundário na proteção do sistema fotovoltaico, preservando-o contra sobrecarga, superaquecimento e descarga excessiva da bateria. É válido ressaltar que o inversor escolhido foi apenas para testes, e não possui os requisitos mínimos para conexão em rede (anti-ilhamento, *overfrequency*, entre outros).

3. SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO

O sistema de monitoramento foi implementado com o objetivo de adquirir dados operacionais remotamente, o que é uma capacidade útil especialmente em sistemas isolados, permitindo diagnósticos remotos de falhas, por exemplo.

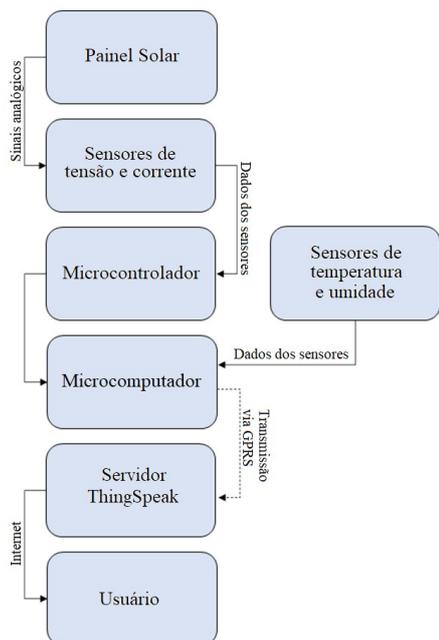


Fig. 2 Fluxo de dados no sistema de microgeração.

O sistema permite a leitura de valores históricos de tensão, corrente elétrica, energia gerada, bem como índices de temperatura e umidade dentro da instalação. A comunicação é realizada através da rede GPRS baseada em um microcomputador dedicado e um modem celular. As informações transmitidas são armazenadas em uma plataforma IoT chamada ThingSpeak, onde os dados podem ser facilmente analisados e visualizados. A Fig. 2 resume o fluxo de dados adquiridos da planta de microgeração.

O microcomputador é dedicado a controlar a comunicação remota e atua como a interface entre o microprocessador e a nuvem. Ele é capaz de fazer interface com diversos sistemas de microgeração, como descrito aqui, e a plataforma IoT, ou seja, para futuras implementações de plantas abrangendo vários painéis, apenas um sistema de comunicação pode ser usado. O algoritmo de comunicação pode ser resumido nas principais etapas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Algoritmo de comunicação

Passo	Comando
1	Inicialização
2	Aguarde o sistema operacional inicializar
3	Conecte-se à rede GSM
4	Aguarde conexão e sincronização de tempo
5	Se a hora de início da operação \leq a hora atual \leq hora de término da operação e se o intervalo minuto/medição = 0, vá para 7
6	Senão: fora do tempo de transmissão. Vá para 14
7	Solicitação de dados ao microcontrolador
8	Recebimento de comando de transmissão
9	Conversão de string e eliminação de bits desnecessários
10	Armazenamento de medições em uma matriz de variáveis
11	Ler índices de temperatura e umidade
12	Início da comunicação e transmissão GSM
13	Aguarde 70 segundos e volte para 5
14	Fim da operação

Ademais, os modelos dos equipamentos utilizados no protótipo estão disponibilizados na Tabela 3.

Tabela 3. Modelos dos equipamentos utilizados

Equipamento	Modelo
Painel Solar	Yingli YL020P-17b
Motores de Passo	Sanyo Denki 103H7126-0541
<i>Drivers</i>	HY DIV268N-5A
Microcontrolador	Arduino Mega 2560
Microcomputador	Raspberry Pi 3 Model B
Controlador de Carga	EPSolar LS2024
Bateria	Moura Clean Nano 12V 36 Ah
Inversor	Unitron iVolt 400 W

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo passou por testes de campo com o objetivo de validar o desempenho dos sistemas de rastreamento solar e monitoramento remoto. Um resumo de tais resultados é apresentado nas subseções a seguir.

4.1 Geração de Energia

A geração de energia da usina solar foi comparada à de um painel fotovoltaico idêntico, mas fixo. A Fig. 3 mostra um

exemplo da variação da energia gerada pelos painéis fixos e móveis durante um período de 8 horas em um teste de campo (Revoredo, T.C.).

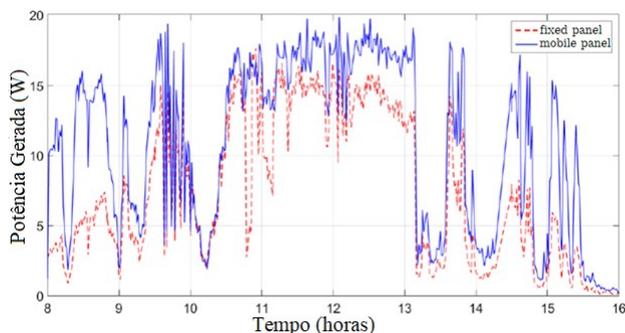


Fig. 3 Energia gerada pelos sistemas fixo e móvel

A potência média alcançada pelo painel móvel foi de 11,05 W, o que, em comparação com a potência média observada para o painel fixo de 7,44 W, indica uma melhoria de 48,5%. O sistema fixo não é tão produtivo quanto o sistema móvel ao longo do dia, especialmente de manhã e ao pôr do sol. Isso acontece porque em tais períodos os ângulos das horas estão distantes de 0° que ocorre em torno de doze horas. Através do gráfico é possível observar pontos de potência reduzida em relação aos valores esperados, por exemplo em torno de 10 horas e quinze minutos pela manhã. Essa redução de potência é consequência do aumento da nebulosidade durante esses intervalos de tempo, situação que foi comprovada visualmente ao longo do experimento. A influência (negativa) que a nebulosidade tem na geração de energia é significativa, e é discutida em alguns estudos.

Tabela 4. Ganho na conversão de energia com base em diferentes obras

Obras	Ganhos
Este Protótipo	48,5%
Alves (2008)	53,1%
Chun-Sheng (2008)	47,3%
Mamun (2014)	32,3%

Como referência para validação dos resultados obtidos nos testes aqui descritos, eles foram comparados com trabalhos semelhantes, três dos quais são destacados: Alves (2008) descreve o desenvolvimento de um sistema de rastreamento solar sem sensor, controlado por um controlador lógico programável (CLP); Chun-Sheng (2008) descreve a implementação de diferentes formas de rastreamento solar para um sistema gerador maior do que o considerado neste trabalho, com uma potência de 165,0 W por painel e Mamun (2014) apresenta um sistema de rastreamento solar baseado exclusivamente em medições de sensores. A Tabela 4 mostra a comparação entre a melhoria na geração de energia do sistema descrito neste trabalho e as referências mencionadas acima. Nota-se que o protótipo aqui apresentado e a estratégia de controle utilizada para o rastreamento solar alcançaram um desempenho semelhante às referências Alves (2008) e Chun-Sheng (2008) e substancialmente melhor do que um painel posicionado exclusivamente através da leitura

do sensor. Além disso, se comparado ao trabalho mencionado com melhor desempenho, o sistema aqui descrito é mais simples em complexidade e menos dispendioso (Pulungan, A. B.).

4.2 Comunicação Remota

O sistema de comunicação remota também foi validado por meio de testes arquivados. Os resultados são exemplificados a seguir por dados adquiridos em dois dias distintos, com diferentes condições ambientais. O primeiro conjunto de dados, apresentados na Fig. 4, mostra valores adquiridos ao longo de um período de aproximadamente três horas em um dia ensolarado, por volta do meio-dia, com temperatura ambiente de cerca de 40°C e umidade relativa média de 15%. A energia gerada ao longo do dia é exibida na Fig. 4. A potência instantânea máxima é facilmente vista como sendo de 12,05 W, o que lida com o valor máximo esperado para o painel fotovoltaico utilizado.

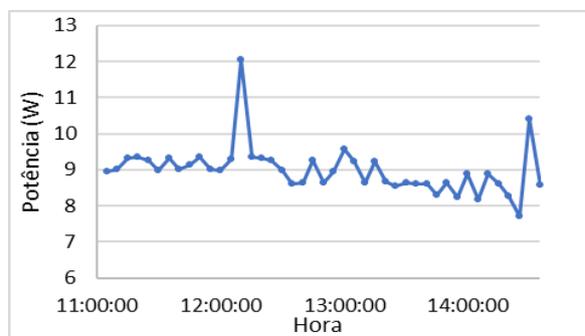


Fig. 4 Medidas de potência adquiridos em 30 de agosto (intervalo de 5 minutos).

Os dados armazenados localmente pelo microcontrolador do sistema foram comparados com os dados transmitidos e armazenados na nuvem. Não foram identificadas diferenças em nenhuma variável (temperatura, tensão, potência, temperatura e umidade) e nenhum pacote de transmissão foi perdido. O segundo conjunto de dados, exibidos na Fig. 5, foi adquirido em um dia nublado com algumas pancadas de chuva, com temperatura média de 30°C e umidade relativa média de 80%.

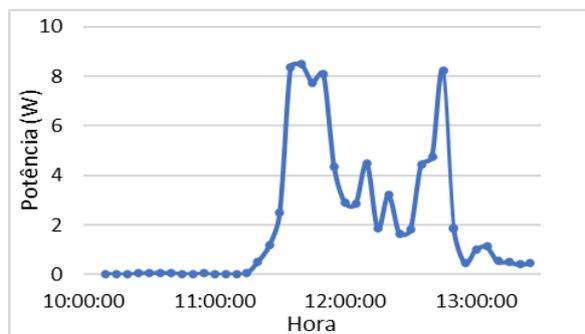


Fig. 5 Índices de potência adquiridos em 2 de setembro (intervalo de 5 minutos).

As medidas desta condição ambiental são retratadas na Fig. 6. Pode-se facilmente notar as variações significativas na incidência de luz solar, dificultadas pela passagem de nuvens, o que resultou em menor geração de energia. A potência

máxima obtida nestas circunstâncias é de 8,49 W, o que é cerca de 30% menos do que o primeiro conjunto de dados, adquirido quando não havia nuvens presentes nos céus.

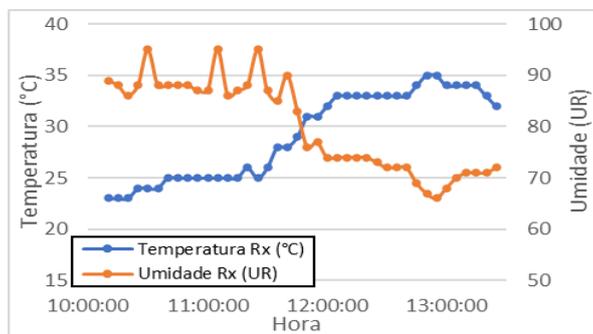


Fig. 6 Medidas de umidade adquiridos em 2 de setembro (intervalo de 5 minutos).

Uma consideração importante ao utilizar painéis móveis e comunicação remota em sistemas de microgeração solar é a quantidade de energia consumida na operação do controle e transmissão, quando comparada à energia gerada pela usina. Rastreadores solares bem projetados compensam a geração de todas as perdas de energia relacionadas aos movimentos, tendo assim mais vantagens do que os fixos (Mamun, 2014). A comunicação remota, por outro lado, é uma tarefa de alto consumo de energia e deve ser adequadamente utilizada para não degradar a geração de energia além da utilidade. Ligar e desligar o modem e enviar menos informações durante um determinado período de tempo são dois exemplos de ações que podem reduzir o consumo de energia. Uma alternativa que se pode considerar, por exemplo, é estender os intervalos de aquisição de dados para que uma menor largura de banda de comunicação seja usada para transmitir dados para a nuvem em um determinado período de tempo. Esta deve ser uma ação válida, desde que os dados adquiridos estejam dentro de uma diferença aceitável daqueles lidos em intervalos menores. Como exemplo considere a Fig. 7 e a Fig. 8, que apresentam os valores da potência gerada adquirida em diferentes intervalos de tempo para os mesmos conjuntos de dados apresentados acima, como base para avaliar o *trade-off* entre o uso da banda de transmissão disponível e o número de leituras realizadas pelo sistema. É fácil observar que o espaçamento entre as amostras só é interessante em períodos em que há baixa variação entre as amostras, um bom exemplo é o pico de potência próximo às 12 horas que é perdido ao usar intervalos de 10 e 20 minutos. Entretanto o consumo de largura de banda de comunicação seja para estes dois casos é reduzido, sendo de em cerca de 50% para o caso de 10 minutos.

A análise discutida acima visa apenas exemplificar o tipo de ações que podem ser tomadas para otimizar o sistema. Eles são uma análise preliminar que é apenas o ponto de partida de uma investigação em andamento para determinar o melhor ajuste do sistema completo, considerando o ganho de geração de energia quando os parâmetros de rastreamento e comunicação solar são alterados.

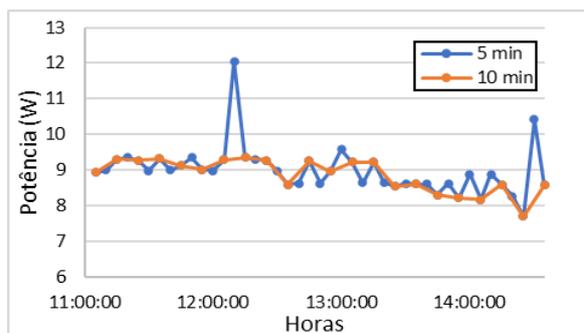


Fig. 7 Medidas de potência adquiridos em 30 de agosto para intervalos de 5 e 10 minutos

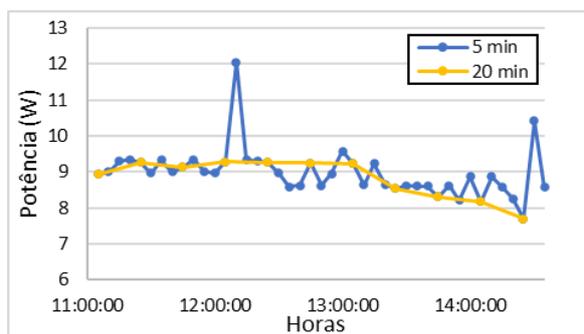


Fig. 8 Medidas de potência adquiridos em 30 de agosto para intervalos de 5 e 20 minutos.

5. CONCLUSÕES

No contexto do desenvolvimento sustentável global e do novo paradigma da microgeração, este trabalho apresenta a especificação, implementação e validação de testes de campo de um protótipo solar de microgeração com capacidade de rastreamento solar, capaz de operar dentro ou fora da rede. O sistema compreende um painel solar, dois motores de passo operados independentemente para ajustar sua orientação em direção ao Sol, um microcontrolador de código aberto para controlar o movimento da usina e adquirir dados de diferentes sensores, um sistema de energia que inclui um dispositivo de armazenamento de energia e um sistema de comunicação que, além de uma plataforma IoT aberta, estabelece um sistema de monitoramento remoto para armazenamento e avaliação de dados históricos, bem como com detecção de falhas e fins de diagnóstico.

São apresentados resultados de testes de campo que validam o funcionamento do sistema, bem como a sua maior geração de energia quando comparado com um sistema fotovoltaico fixo que engloba um painel idêntico. O sistema de monitoramento também é validado e um exemplo simples de ajustes para diminuir o *trade-off* entre a energia gerada pela usina e a energia consumida pela operação do sistema de comunicação também é discutido, como uma análise preliminar que é apenas o ponto de partida de uma investigação em andamento para determinar o melhor ajuste de todo o sistema considerando o ganho de geração de

energia quando os parâmetros de rastreamento solar e comunicação são alterados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

De Souza Silva, J. L. et al (2018). Análise do Avanço da Geração Distribuída no Brasil. *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Gramado.

Revored, T.C., Dos Santos Ribeiro, M.V., Leitão, P. L. M. (2019). Especificação e Prototipagem de Um Sistema de Microgeração Fotovoltaica com Rastreamento Solar. *Revista Brasileira de Energia Solar Ano 10*, Volume X, pp. 64-76.

Alves, A. F. (2008). Desenvolvimento de um Sistema de Posicionamento Automático para Painéis Fotovoltaicos. *Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista*, São Paulo.

Chun-Sheng, W. et al (2008). Study on Automatic Sun-tracking Technology in PV Generation. *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, vol. 4, pp. 2586-2591.

Mamun, N., Samrat, N. H. (2014). Multi-directional Solar Tracker Using Low Cost Photo Sensor Matrix. *University of Malaya*, Malásia.

Pulungan, A. B. et al (2018). A Review of Solar Tracker Control Strategies. *IAES Indonesia Section*, Vol 5.

Apêndice A. DIAGRAMA DE LIGAÇÃO

