

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO PARA ANÁLISE COMPARATIVA DE DOIS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES

Luiz Rodrigues Teixeira Junior – luizrtjunior3000@gmail.com

Luis Blasques – blasques@ifpa.edu.br

André Cavalcante do Nascimento – andre.nascimento@ifpa.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA

Resumo. O Brasil possui um grande potencial para geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede; todavia o mercado nacional de sistemas fotovoltaicos ainda se encontra em um crescimento não uniforme, resultado, dentre outros fatores, da baixa disponibilidade de dados sobre o desempenho de diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Nesse contexto o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoração para realização de estudos sobre o desempenho de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede com diferentes configurações. Foram desenvolvidas soluções em condicionamento de sinal e um software para supervisão e coleta de dados. Como forma de validação da solução desenvolvida foi feita a avaliação dos dados coletados durante um curto período de tempo. A série de dados analisada mostra que o sistema constituído por módulos fotovoltaicos de silício amorfo apresentou um melhor desempenho nas condições ambientais de Belém. Tal resultado se justifica pelo fato de que módulos fotovoltaicos de silício amorfo possuem um menor coeficiente de temperatura do que módulos fotovoltaicos de silício policristalino, mesmo que estes últimos possuam microinversores conectados a cada módulo, o que os faz operarem de forma mais eficiente, em especial em condições de sombreamento parcial dos arranjos fotovoltaicos.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Sistema de Monitoração, Análise de Desempenho.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade está extremamente ligado ao uso da energia em suas diversas formas, e atualmente a disponibilidade de energia elétrica é um fator determinante para o nível de desenvolvimento de um país. O que acaba contribuindo para uma maior demanda por esse tipo de recurso. No contexto de aumento da demanda de energia elétrica e de combate às mudanças climáticas, muitas organizações vêm incentivando a busca por fontes de energia mais limpas. Como política a nível mundial de incentivo ao acesso à energia mais limpa, pode-se destacar a meta de desenvolvimento sustentável da ONU número 7 (“Energia Limpa e Acessível”).

Dentre as formas de geração de energia elétrica renovável, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) vêm se destacando e possuem expectativa de crescimento em nível mundial, mesmo que atualmente estejam sendo empregadas ações de redução de incentivos a esta fonte, como o fim do programa Britânico de incentivo à instalação de SFCRs e a redução de tarifas no Japão sobre sistemas do tipo “feed-in tariff”. A SolarPower Europe (2016), em seu relatório “Global Market Outlook for Solar Power” do ano de 2016, prospectou que até 2020, em um cenário realista, o mercado mundial de SFCR contará com mais de 500 GW de potência instalada.

No contexto de expansão do mercado mundial de geração fotovoltaica, o Brasil ainda possui um mercado em fase de amadurecimento, o que se deve principalmente à elaboração tardia de uma legislação específica para o setor (a primeira e principal legislação de incentivo à instalação de SFCRs, a resolução n. 482, foi aprovada somente no ano de 2012, enquanto que em países como a Alemanha existem legislações do tipo desde a década de 1990). Nesse contexto de amadurecimento de mercado, muitos projetos deixam de ser otimizados devido à falta de dados e estudos específicos sobre a influência do tipo de material do módulo e da tipologia do inversor.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO OBJETO DO PRESENTE TRABALHO

O sistema de monitoração proposto neste trabalho tem como objetivo a avaliação de dois SFCRs distintos em relação à tecnologia de fabricação dos módulos fotovoltaicos e à tipologia dos inversores. Ambos os sistemas possuem potência de pico instalada de 1 kW. Para fins de nomenclatura, os sistemas foram denominados “sistema 1” e “sistema 2”, sendo o sistema 1 constituído por 4 módulos de silício policristalino de 250 Wp cada, utilizando microinversores (rendimento máximo de 99,4 %) conectados a cada módulo (configuração módulo c.a.), enquanto que o sistema 2 consiste em 10 módulos de silício amorfo de 100 Wp cada, associados em série e conectados a um único inversor (configuração *string*, rendimento máximo de 90,4%). Ambos os sistemas estão instalados na área de testes do Grupo de Estudos e

Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Na Fig. 1 é possível observar os sistemas após a instalação, à esquerda os 4 módulos do sistema 1, e à direita os 10 do sistema 2.



Figura 1- Foto dos sistemas a serem monitorados.

Para a avaliação do desempenho dos sistemas foram consideradas grandezas elétricas e grandezas meteorológicas. Em relação às grandezas elétricas, o sistema monitora correntes e tensões nas formas contínua e alternada, e quanto às grandezas meteorológicas são medidas irradiância solar, velocidade do vento, temperatura ambiente e as temperaturas da face posterior de dois módulos, um de cada sistema. A placa de aquisição de dados é do tipo PCI e está instalada em um computador na sala de monitoração e controle do GEDAE/UFPA.

3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO

A implementação do sistema de monitoração ocorreu em três etapas: desenho e desenvolvimento dos circuitos de condicionamento de sinal; instalação do sistema de monitoração; e calibração do sistema. Com base nas especificações dos equipamentos foi feito um mapeamento dos pontos onde há necessidade da aplicação de alguma técnica de condicionamento de sinal. Após o mapeamento e desenvolvimento dos circuitos eletrônicos foi feita a instalação e a calibração. Deve-se ressaltar que devido ao número de canais da placa de aquisição de dados ser menor que o número de sensores e transdutores, foi necessário o uso de um circuito de multiplexação de sinais, onde os sinais multiplexados foram todos os transdutores de corrente contínua e um transdutor de tensão contínua do sistema 1. A Fig. 2 apresenta o diagrama de conexão de todos os sensores, com destaque para os pontos de aplicação de sistemas de condicionamento de sinal.

3.1 Desenho e desenvolvimento dos circuitos de condicionamento de sinal

Como visto na Fig. 2, foram aplicadas técnicas de amplificação de sinal, conversão e filtragem, além da multiplexação do sinal de alguns transdutores, por motivo já exposto. Ao todo foram desenvolvidos 3 tipos de circuitos eletrônicos com as seguintes funções: amplificação e conversão (quando necessária), filtragem dos sinais e multiplexação.

O circuito de amplificação e conversão foi desenvolvido com o uso do circuito integrado LM 324, utilizando-se também de divisores de tensão. O valor da resistência do divisor de tensão é o mesmo da resistência do sensor PT100 a 0° C. Os valores das resistências dos amplificadores ($R1$ e $R2$) foram utilizados para a definição do ganho de amplificação (G) com base no modelo matemático apresentado por Balbinot e Brusamarello (2013), conforme Eq. (1). Na Fig. 3 é possível observar o circuito de amplificação e conversão após a confecção da placa.

$$G = -\left(\frac{R2}{R1} + 1\right) \quad (1)$$

Para a filtragem dos sinais foram utilizados filtros do tipo passa baixa. A definição da frequência de corte (f_{corte}) se deu por meio do modelo matemático apresentado por Balbinot e Brusamarello (2013), que pode ser visto na Eq. (2), de posse dos valores de resistência (R) e capacitância (C) empregados. Além da filtragem de sinais, o circuito tem como objetivo servir de interface entre os equipamentos de campo e a placa de aquisição de dados. A Fig.4 apresenta a placa de filtragem após a sua confecção. Para o circuito de multiplexação foi empregado o circuito integrado CD4051.

$$f_{corte} = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad (2)$$

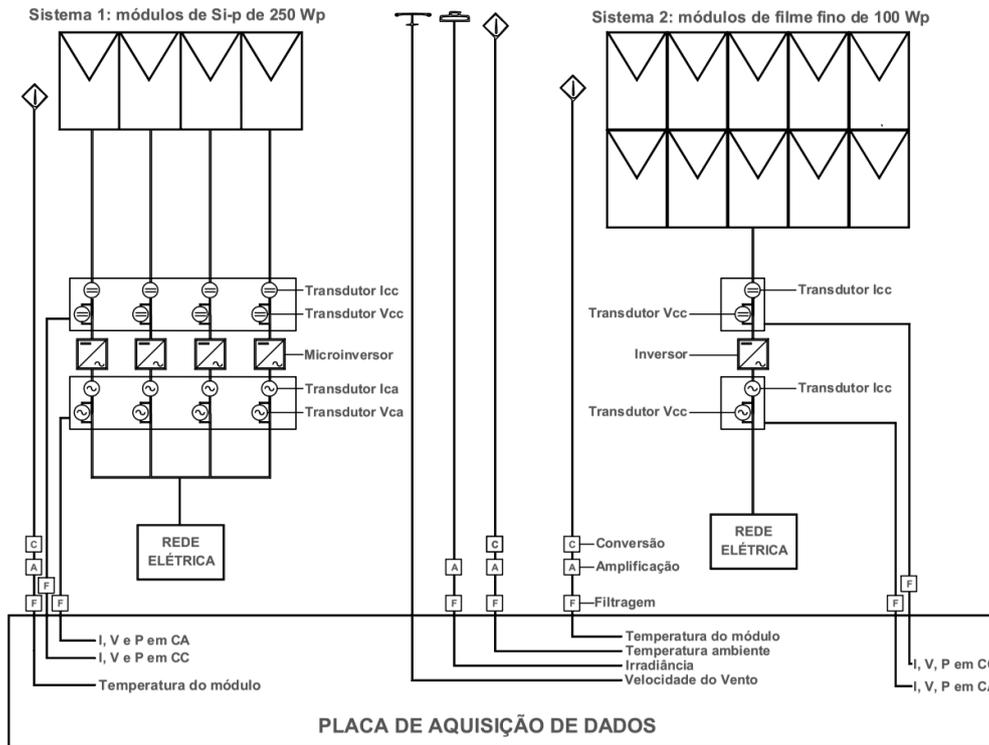


Figura 2- Diagrama do sistema, com pontos de aplicação de técnicas de condicionamento de sinal.

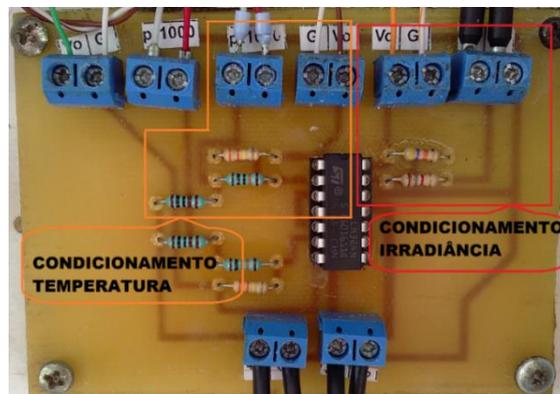


Figura 3- Circuito de conversão e amplificação de sinal após a sua confecção.

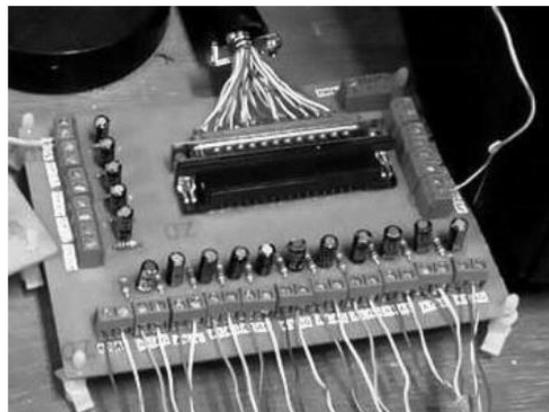


Figura 4- Circuito de filtragem dos sinais do sistema de monitoração.

3.2 Instalação do sistema de monitoração

Após a confecção dos circuitos de condicionamento foi feita a integração do sistema de monitoração com os dois SFCRs. Como alguns sensores são intrusivos, fez-se necessária a elaboração de adaptadores. Devido ao fato da área de testes ser um espaço aberto, todos os transdutores de grandezas elétricas e circuitos de condicionamento foram instalados em caixas impermeáveis. Nas Fig. 5 e 6, respectivamente, é possível observar os sistemas 1 e 2, com destaque para a caixa onde estão instalados os transdutores.



Figura 5- Sistema 1 após a instalação dos transdutores de grandeza elétrica.



Figura 6- Sistema 2 após a instalação dos transdutores de grandeza elétrica.

3.3 Calibração e modelagem dos componentes do sistema de monitoração

Todos os transdutores e sensores foram calibrados em campo, com exceção do sensor de velocidade do vento, pois no laboratório não haviam recursos para calibração do mesmo, sendo adotadas as informações de calibração fornecidas pelo fabricante. Após o levantamento de dados em campo foi feita a modelagem dos componentes adotando-se a técnica do método dos mínimos quadrados apresentada por Coelho e Coelho (2004), conforme Eq. (3).

$$\theta(t) = \left(\varphi^T(t) \varphi(t) \right)^{-1} \varphi(t) (y(t) + e(t)) \quad (3)$$

Sendo $\theta(t)$ o vetor com os valores dos coeficientes do modelo escolhido para modelagem do sistema; $\varphi(t)$ o vetor com valores de entrada do sistema a ser modelado; $\varphi^T(t)$ o vetor transposto com valores de entrada do sistema a ser modelado; $y(t)$ o vetor com valores de saída do sistema a ser modelado; e $e(t)$ o erro de modelagem ou *offset*.

A coleta de dados em campo para a calibração foi feita com o uso de um computador portátil (que estava conectado remotamente ao computador com a placa de aquisição de dados), um osciloscópio digital FLUKE® 199C (exatidão de $\pm 1,5\%$ mais 4% da amplitude de cada divisão), uma célula de referência para medição de irradiância e um termômetro a laser Minipa® modelo MT-350 (exatidão de ± 2 °C). Foi elaborada uma tabela com os principais valores e faixa de operação dos sistemas para então se realizar a coleta de dados.

Com os dados coletados em campo organizados, foi aplicado o método dos mínimos quadrados de forma a se obter os coeficientes angular (A) e linear (B) do modelo da Eq. (4), onde o termo independente x é a tensão lida pela placa de aquisição de dados e o termo dependente y é a grandeza a ser mensurada pelo sensor/transdutor. O modelo da Eq. (4) foi escolhido devido ao fato de todos os sensores e transdutores apresentarem comportamento linear.

$$y = Ax + B \quad (4)$$

3.4 Modelagem dos Inversores

Devido ao fato dos transdutores de tensão e corrente na forma alternada serem do tipo RMS, foi necessária a modelagem da curva fator de potência (FP) *versus* potência aparente de cada um dos inversores, para que então fosse possível a obtenção de parâmetros como a potência ativa. A técnica utilizada para a modelagem do sistema foi o método dos mínimos quadrados e os dados de entrada e saída foram obtidos com o uso de um sistema de monitoração que tem o objetivo de levantar as formas de onda da tensão e corrente em corrente alternada na saída de inversores. A coleta de dados foi feita de forma separada e em dias com pouca incidência de nuvens, permitindo a obtenção de dados em uma faixa mais ampla. As curvas FP *versus* potência aparente dos inversores foram divididas em dois pontos, e após a divisão foram estimados os parâmetros para os modelos representados pelas Eq. (4) e (5). Os coeficientes obtidos após a aplicação do método podem ser vistos na Tab. 2.

$$y = A \times x^4 + B \times x^3 + C \times x^2 + D \times x + E \quad (5)$$

Tabela 2 - Coeficientes das Eq. (4) e (5) para os elementos obtidos após aplicação do método dos mínimos quadrados.

MODELO	COEFICIENTE	INVERSOR SISTEMA 1	INVERSOR SISTEMA 2
Eq. (4)	A	0,000030815049323	0,000009306767731
	B	0,974248082279053	0,992285748200411
Eq. (5)	A	-0,000000004785776	0,000000058160519
	B	0,000003033619635	-0,000030699351710
	C	-0,000700114645086	0,005710574777759
	D	0,072420320984905	-0,429844844243164
	E	-2,179490513851183	11,145209871334632

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como forma de validação do sistema de monitoração foi realizada a coleta de dados no período entre 31/10/2017 a 12/11/2017. Após o período de coleta foi feita a análise do desempenho dos sistemas, com destaque inicial para a avaliação da influência da temperatura e do sombreamento. Vale ressaltar que o curto período de medições teve como finalidade principal a validação dos dados obtidos a partir do sistema de monitoração (*hardware* e *software*) de grandezas elétricas e meteorológicas desenvolvido. Este curto período de medição não serve, obviamente, para dar conclusão clara e definitiva sobre o desempenho dos sistemas, mas é capaz de apresentar as funcionalidades do sistema e validar os dados medidos.

Na Fig. 7 é possível observar a tela do *software* de aquisição de dados e supervisão desenvolvido neste projeto, em operação. As produções diárias de energia em corrente contínua e em corrente alternada dos sistemas 1 e 2 podem ser vistas nas Fig. 8 e 9, respectivamente.

Como pode ser visto nas Fig. 8 e 9, o sistema 2 apresenta uma produção de energia, tanto em corrente contínua como em alternada, maior que o sistema 1. A diferença entre a geração de energia em corrente alternada dos sistemas é menor do que em corrente contínua, o que se deve ao fato dos microinversores do sistema 1 operarem de forma mais eficiente. O sistema 1 produziu ao todo 61,64 kWh de energia em corrente contínua e 54,36 kWh de energia em corrente alternada, enquanto que o sistema 2 gerou 72,40 kWh de energia em corrente contínua e 59,55 kWh em corrente alternada.

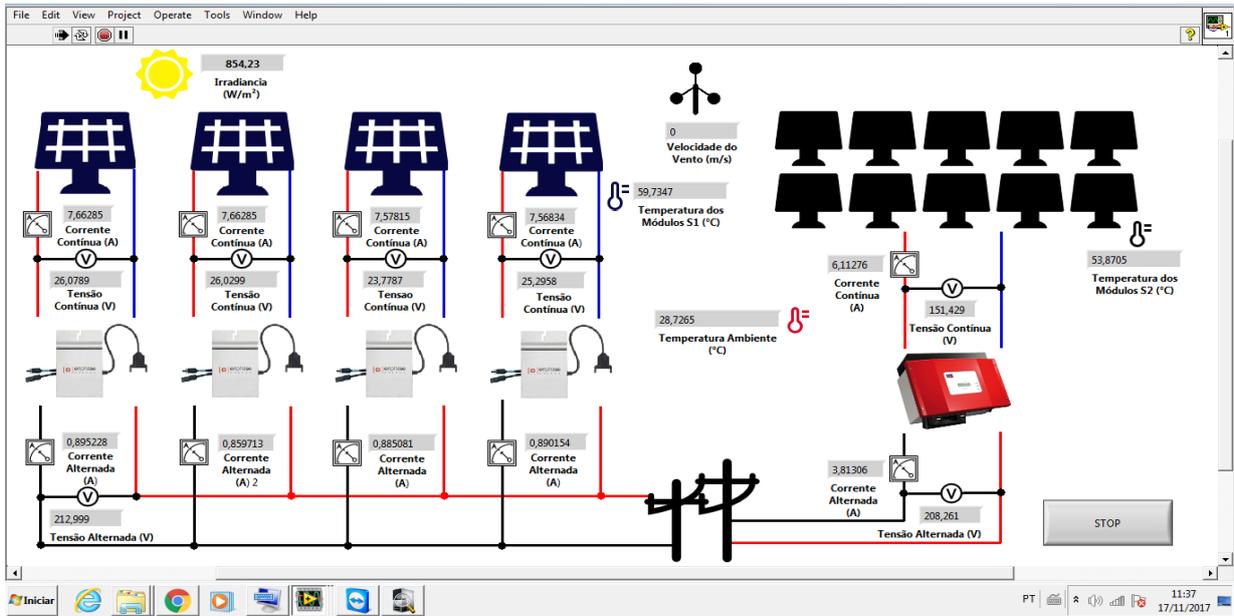


Figura 7- Software de aquisição de dados e supervisão em operação.

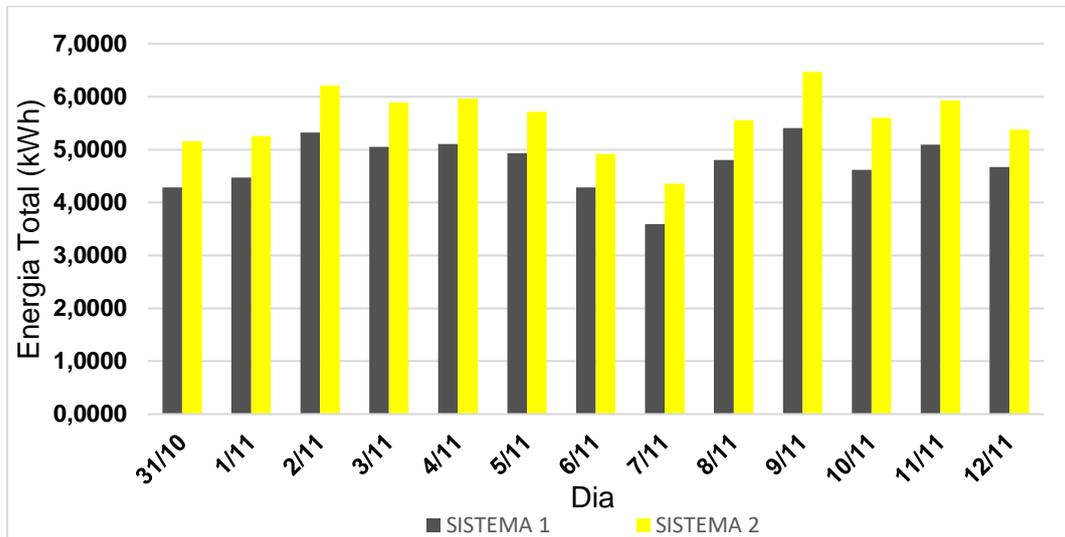


Figura 8- Produção diária de energia em corrente contínua dos sistemas 1 e 2.

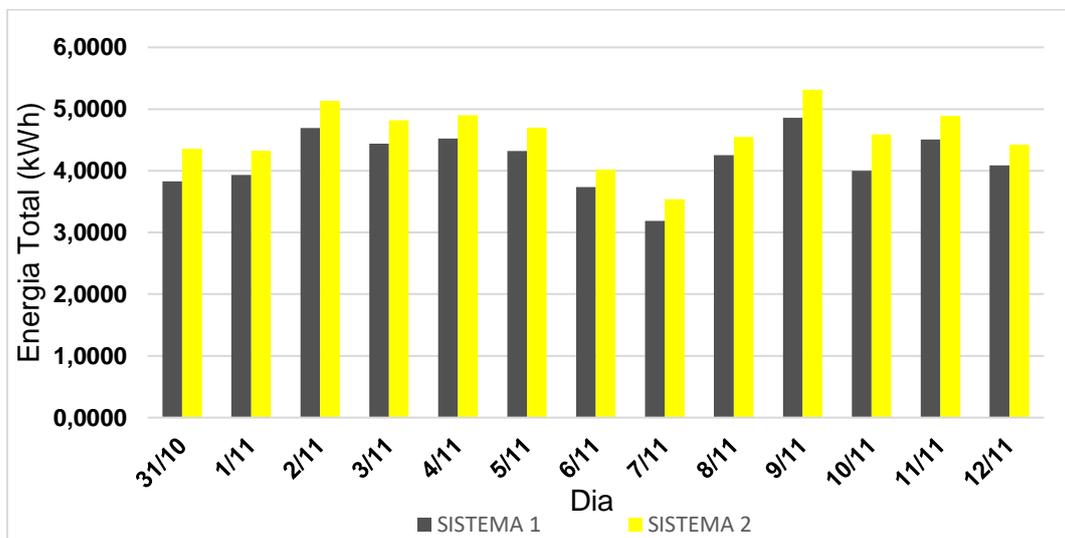


Figura 9- Produção diária de energia em corrente alternada dos sistemas 1 e 2.

Como índices de desempenho foram utilizados a produtividade final, perda de produtividade e o *performance ratio*. A produtividade final é definida como a quantidade de energia elétrica em corrente alternada injetada na rede por unidade de potência nominal do gerador FV (Almeida, 2012). A perda de produtividade é a diferença entre a produtividade de referência e a final. O *performance ratio* é a relação entre a produtividade final do sistema e a produtividade de referência (Mello, 2016).

Quanto aos índices de desempenho calculados, o sistema 2 apresentou valores mais satisfatórios do que o sistema 1. Nas Fig. 10 e 11 é possível observar, respectivamente, os valores diários de produtividade final e perda de produtividade dos SFCRs dos sistemas 1 e 2.

No dia 09/11/2017 o sistema 2 apresentou sua melhor produtividade, pois foi o dia com maior irradiação total (6,58 kWh/m²). Já o sistema 1 teve sua maior produtividade no dia 10/11/2017, em função de sua maior influência com o aumento da temperatura. As menores produtividades também apresentaram este comportamento, sendo a menor registrada para o sistema 2 no dia 07/11/2017 (dia que contou com irradiação total de 4,71 kWh/m²), e a menor do sistema 1 registrada no dia seguinte. Como pode ser visto na Fig. 11, o sistema 1 apresenta maiores perdas de produtividade que o sistema 2; 20,77 kWh/kWp ante 15,58 do sistema 2.

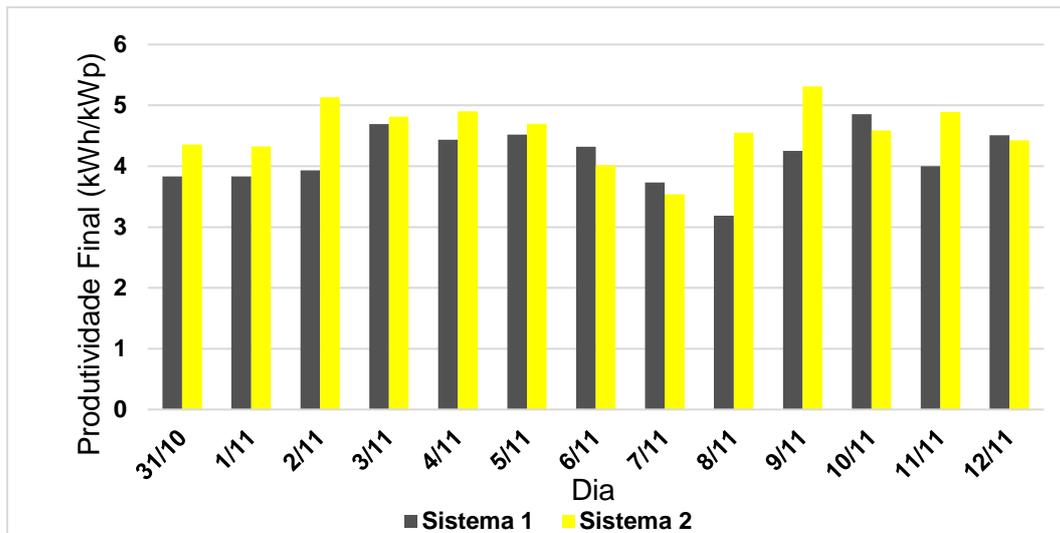


Figura 10- Valores diários de produtividade dos SFCRs.

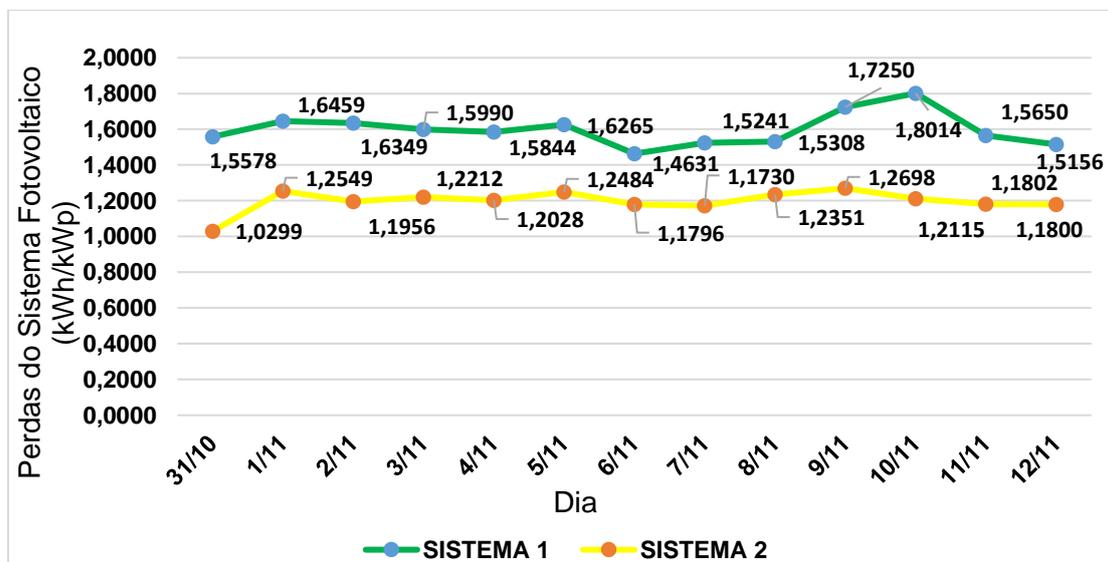


Figura 11- Valores diários de perdas de produtividade dos SFCRs.

A justificativa principal para as maiores perdas de produtividade apresentadas pelo sistema 1 reside no fato de módulos de silício policristalino possuírem um coeficiente térmico maior do que módulos de silício amorfo, o que faz com que as quedas na tensão dos módulos de silício policristalino sejam maiores (Pinho e Galdino, 2014). Na Fig. 12 é possível observar as temperaturas máximas de superfície posterior dos módulos dos sistemas 1 e 2 em cada dia, e a Fig. 13 apresenta a variação das temperaturas dos módulos e da temperatura ambiente no dia 08/11/2017. A diferença entre as

temperaturas máximas de superfície posterior dos módulos dos sistemas varia de 2,1 °C a 6,4 °C entre diferentes dias. Quando se compara os gráficos das Fig. 11 e 12 fica evidente a relação proporcional da temperatura com as perdas de produtividade dos SFCRs.

A Fig. 14 exibe os valores de *performance ratio* durante os dias de coleta de dados. Como reflexo dos índices anteriores, o sistema 2 apresenta um desempenho global melhor que o sistema 1. Os menores valores de eficiência global dos sistemas foram atingidos no dia 07/11/2017, enquanto que os maiores valores dos sistemas 1 e 2 foram obtidos, respectivamente, nos dias 11/11/2017 e 02/11/2017.

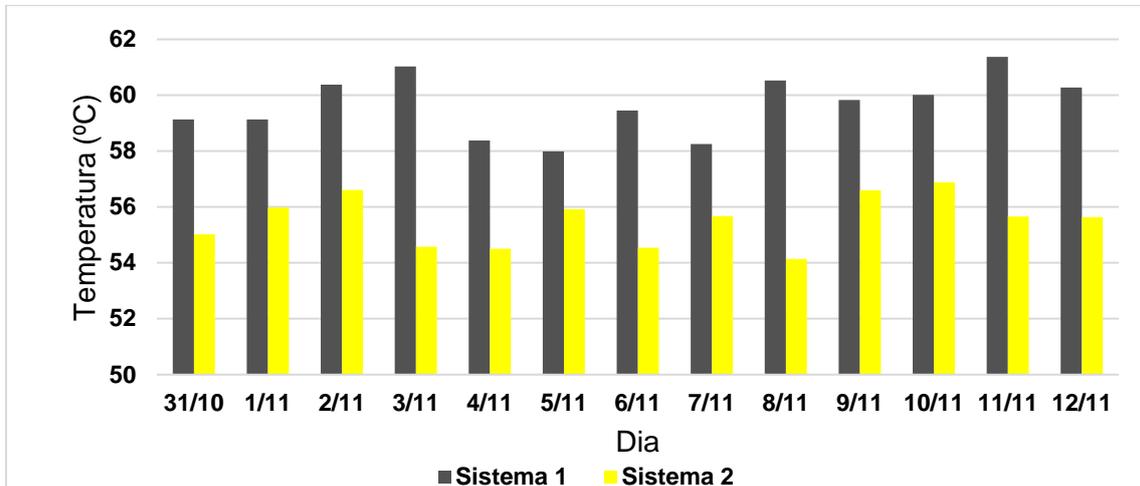


Figura 12- Valores de máxima temperatura de superfície posterior dos módulos dos SFCRs.

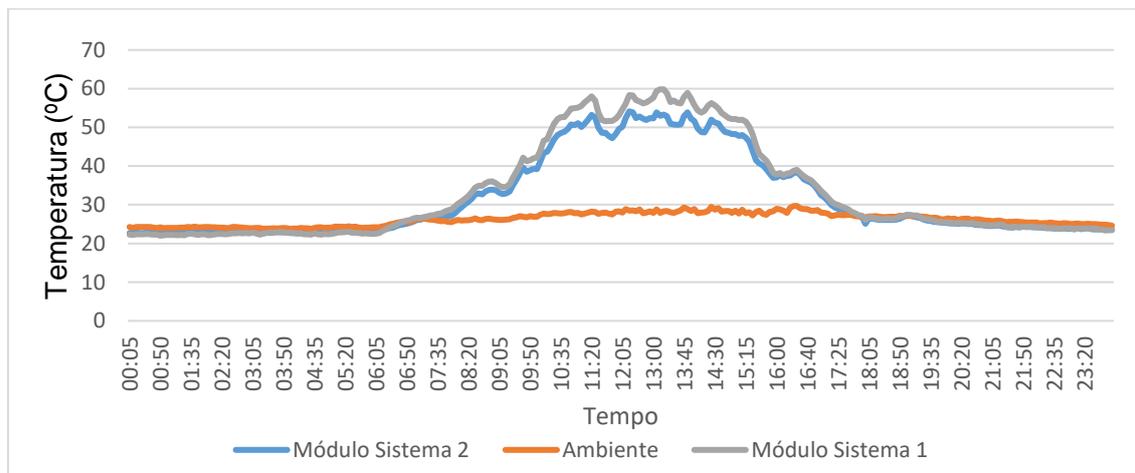


Figura 13- Variação das temperaturas medidas pelo sistema de monitoração no dia 08/11/2017.

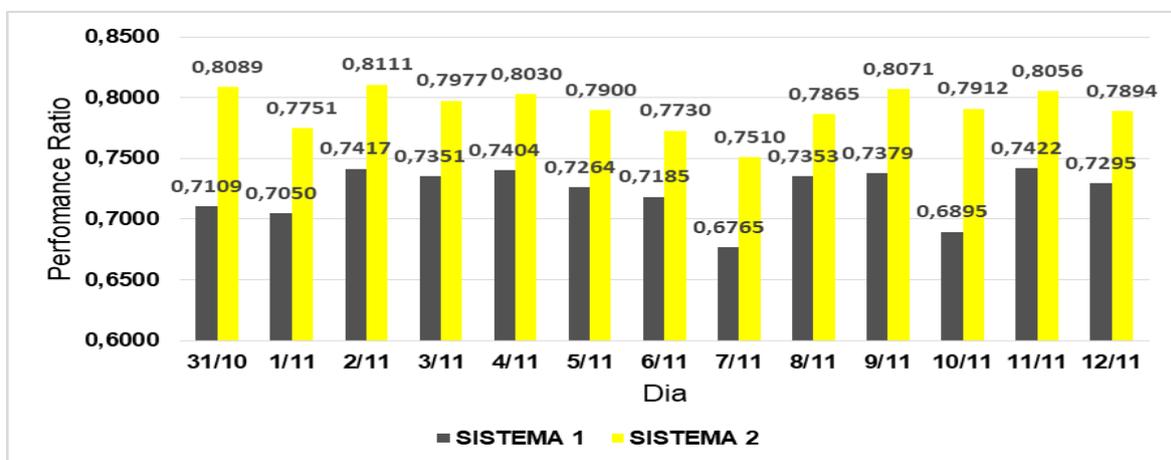


Figura 14- Valores diários de *performance ratio* dos SFCRs.

5. CONCLUSÕES

O sistema de monitoração e aquisição de dados exposto neste trabalho está operando de forma satisfatória e fornecendo dados coerentes. Os valores médios dos índices de desempenho do sistema 1 são: produtividade final 4,18 kWh/kWp; perdas de produtividade de 1,60 kWh/kWp; e *performance ratio* de 72,22%. O sistema 2 apresentou os seguintes valores médios: produtividade final de 4,58 kWh/kWp; perdas de produtividade de 1,20 kWh/kWp; e *performance ratio* de 79,15%. Sobre a geração de energia, em corrente contínua e alternada, o sistema 1 apresentou valores médios de 4,74 e 4,18 kWh, respectivamente, enquanto o sistema 2 apresentou geração média de energia em corrente contínua de 5,57 kWh e 4,58 kWh em corrente alternada.

A série histórica de dados mostrou que o sistema 2 apresentou um desempenho melhor do que o sistema 1, justificado principalmente pelo fato de que módulos de silício amorfo possuem melhor desempenho em ambientes com elevadas temperaturas do que módulos de silício policristalino, pois o silício amorfo possui um coeficiente de temperatura menor. Como altos valores de temperatura são uma característica do clima da Região Amazônica, sistemas compostos por módulos de silício amorfo em geral apresentam melhores produtividades.

Por fim, ressalta-se que o objetivo principal do presente trabalho foi apresentar o desenvolvimento de um sistema de monitoração (*hardware* e *software*) de grandezas elétricas e meteorológicas passível de aplicação a qualquer SFCR, e sua validação. O curto período de medição teve esta finalidade, não servindo, obviamente, para dar conclusão clara e definitiva sobre o desempenho dos sistemas. Um trabalho futuro pretende comparar a operação de ambos os sistemas em um maior período de tempo e em diferentes condições, incluindo simulações de sombreamento.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. P. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. 2012. 171 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012
- BALBINOT, A. BRUSAMARELLO, V. J. (1970). Instrumentação e Fundamentos de Medidas. 2ª Edição. Rio de Janeiro, LTC, 2013. Volume 1.
- COELHO, A. A. R. COELHO, L. S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. 1ª Edição. Florianópolis, Editora da UFSC, 2004.
- MELLO, A. D. Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede a partir da Determinação de Índices de Mérito. 2016. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Instituto de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 2016.
- PINHO, J. T. GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. 2ª Edição. Rio de Janeiro: CEPTEL – CRESESB, 2014.

DEVELOPMENT OF A MONITORING SYSTEM FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF TWO GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH DIFFERENT CONFIGURATION

Abstract. Brazil has a great potential for electricity generation through grid-connected photovoltaic systems; however Brazilian photovoltaic systems' market still present a non-uniform growth, caused, among other factors, by the low availability of data about performance of different types of grid-connected photovoltaic systems. In this context, the present work presents the development of a monitoring system to carry out studies on the performance of two grid-connected photovoltaic systems with different configuration. Signal conditioning solutions and a software for data acquisition and monitoring were developed. In order to validate the solution developed, an analysis was done of data collected during a short period of time. The data series analyzed show that the system composed of amorphous silicon PV modules presented better performance for the environmental conditions of Belém city. This result is justified by the fact that amorphous silicon PV modules have temperature coefficients lower than the ones presented by crystalline silicon PV modules, even though the latter are individually connected to microinverters, which makes them operate more efficiently, especially under conditions of partially shading of the PV generator.

Key words: Grid-Connected Photovoltaic Systems, Monitoring System, Performance Analysis.