

# INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM RELAÇÃO À ÁGUA SOBRE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

**Alexandre Atilio Ramos de Alencar Filho** – alexandreatilio@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Paulo Cesar Marques de Carvalho** – carvalho@dee.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Ivonne Montero Dupont** – ivonne.mdupont@gmail.com  
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

**Resumo.** A energia solar é considerada uma das alternativas energéticas mais promissoras na atualidade, e o sua aplicação em sistemas fotovoltaicos (FV) é a mais comum para geração de energia elétrica. Elevadas temperaturas de operação dos painéis FV causam a redução na eficiência energética. Por esse motivo, o presente trabalho busca, através de experimentos com painéis flutuantes, verificar a influência da distância entre o painel FV flutuante e o espelho d'água sobre a temperatura dos painéis, alterando esta distância e coletando os dados de temperatura através de um controlador lógico programável (CLP), com uso de sensores de temperatura PT-100. Foram coletados dados para distâncias entre a água e o painel FV de 7,5 cm, 6 cm, 4,5 cm e 3 cm. Após aquisição de dados e uso de modelo matemático não foram constatados ganhos de eficiência significativos para as condições descritas na presente pesquisa.

**Palavras-chave:** Painel fotovoltaico flutuante, Temperatura do painel fotovoltaico, Eficiência do painel fotovoltaico.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia solar é considerada uma das alternativas energéticas mais promissoras por sua sustentabilidade. A energia solar é livre e significativamente disponível em todo o mundo. A aplicação mais comum para o uso de energia solar é através dos sistemas fotovoltaicos (FV). Os módulos FV são um dos produtos mais eficazes, sustentáveis e ecológicos no campo das energias renováveis (Sahu *et al.*, 2016).

O Brasil possui uma imensa radiação solar anual com uma baixa variabilidade durante o ano devido sua localização em uma região próxima ao equador (Do Sacramento *et al.*, 2015), o que faz do país um dos líderes em recurso solar disponível. De acordo com CRESESB (2014), um projeto de um sistema FV possui cinco ou seis etapas básicas, a depender do tipo do projeto a ser implantado, são elas, levantamento de dados de recurso solar disponível, definição de local de instalação, levantamento de dados de demanda e consumo, dimensionamento do gerador FV, dimensionamento dos equipamentos de condicionamento de potência, dimensionamento do sistema de armazenamento (para sistemas isolados).

De acordo com Sahu *et al.* (2016), as instalações de plantas FV podem ser classificadas em cinco diferentes tipos, plantas em superfícies convencionais (solo), instalações em telhados, sobre canais, plantas *offshore* e sobre estruturas flutuantes. Desde 2007 diversas experiências em implantação de instalações de sistemas FV vêm se desenvolvendo no setor cujos painéis são instalados em estruturas flutuantes em reservatórios de barragens ou de lagos naturais, conforme apresentado na Fig. 1, (Trapani e Santafé, 2015; Galdino *et al.*, 2016). Esses sistemas solares flutuantes são um novo conceito e podem ser instalados em diversos tipos de corpos d'água (Sahu *et al.*, 2016).

A tecnologia foi criada como maneira alternativa de instalação de painéis FV em lugares onde há escassez de área seca para a instalação de usinas FV (Choi, 2014). A tecnologia se destaca em países como Japão, Singapura, Coreia, Filipinas, onde o acúmulo populacional em certas áreas dificulta a implantação de grandes usinas, ocasionado assim a necessidade de instalação dessas usinas em corpos d'água (Trapani e Santafé, 2015).

Além das vantagens de redução de uso de área para instalação dos painéis, Sahu *et al.* (2014), apresenta outros fatores positivos para o uso de sistemas FV em estruturas flutuantes, são elas, o aumento da eficiência do painel, a redução da evaporação de água (grandes usinas FV instaladas em lagos ou reservatórios), melhoria na qualidade da água e diminuição da deposição de poeira sobre os painéis. Assim, o objetivo do presente trabalho é determinar o ganho de eficiência do painel FV flutuante, que no presente estudo ocorre devido ao resfriamento da célula por conta do efeito natural evaporativo da água. Por estar sobre um corpo d'água é possível manter a temperatura de painéis FV menor que painéis instalados de forma convencional sobre uma superfície seca (Sahu *et al.*, 2014).

Em virtude do aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente resultar na elevação da temperatura da célula FV, há uma redução da eficiência de conversão (CRESESB, 2014). Em Do Sacramento *et al.*, 2015, um módulo FV foi posto em contato direto com a água e comparado com um sobre o solo, apresentando ganhos de eficiência entre 9,52% e 14,5%, com gradientes de temperatura entre 17,27°C e 24,22°C. O mesmo módulo foi utilizado na presente pesquisa. Assim, o presente artigo visa por meio de experimentos realizados no Laboratório de Energias

Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC), verificar o gradiente de temperatura em função da distância do painel flutuante e o espelho d'água, utilizando bases flutuantes de isopor. O objetivo, por meio da evaporação da água, é resfriar o painel FV a ponto de colher resultados de redução de temperatura apreciáveis e que estejam em conformidade com pesquisas realizadas com esse tipo de projeto, bem como validar os dados obtidos em concordância com modelos matemáticos que correlacionam temperatura do painel e eficiência.

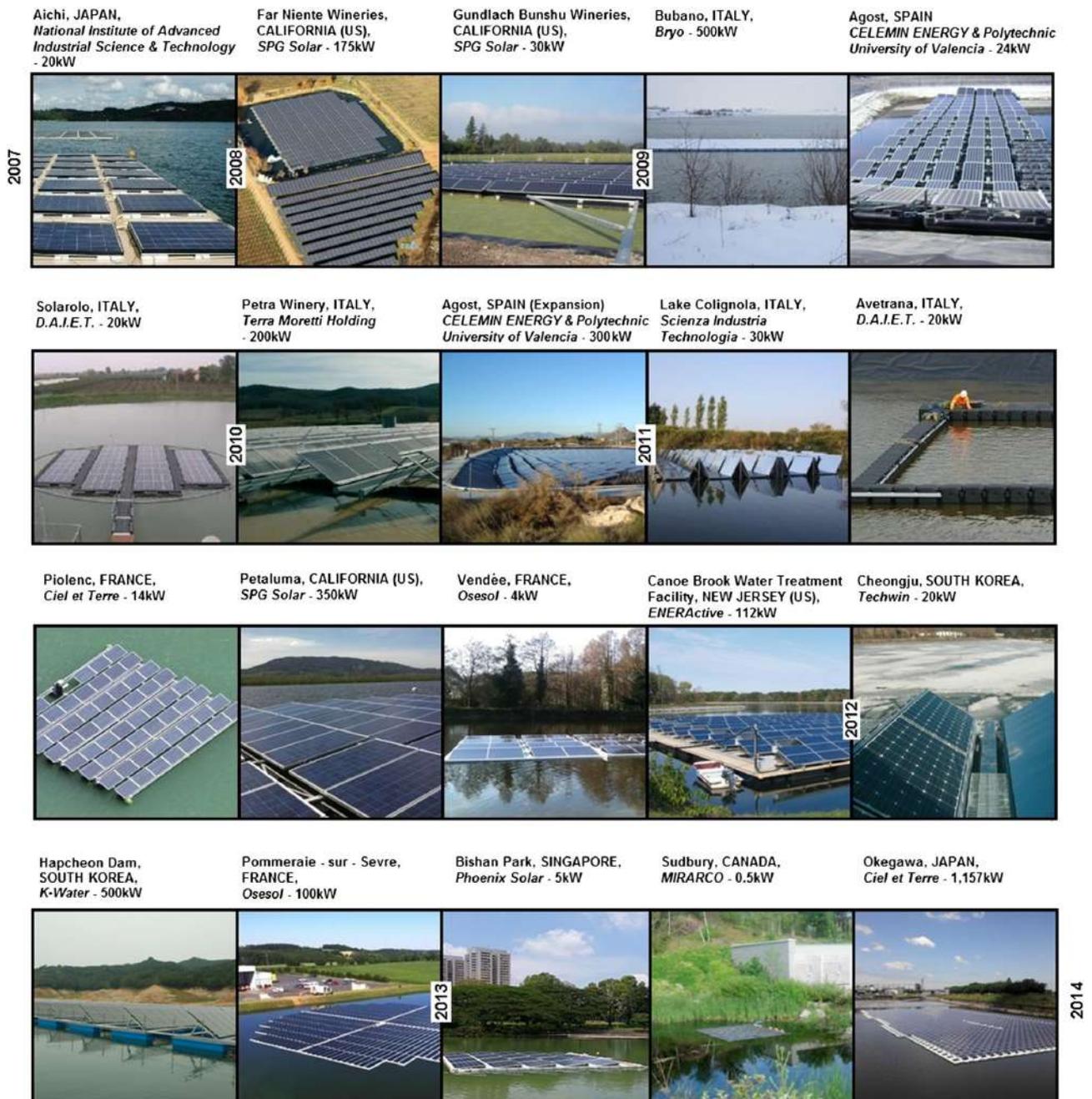


Figura 1- Projetos de painéis FV flutuantes (2007 – 2014).

Fonte: Trapani e Santafé, 2015

## 2. MODELO MATEMÁTICO PARA A RELAÇÃO EFICIÊNCIA X TEMPERATURA

Dubey *et al.* (2013) faz um levantamento de modelos matemáticos encontrados na literatura para descrever o comportamento numérico da eficiência de painéis FV em função da temperatura. A partir dos equipamentos (módulos FV policristalino sem concentradores e sensores de temperatura) utilizados nesse trabalho, a Tab 1. apresenta algumas das correlações extraídas da literatura apresentadas por Dubey *et al.* (2013) utilizadas como base para esse trabalho, por estarem de acordo com o tipo de teste e módulos utilizados.

As quatro correlações apresentadas na Tab. 1, são utilizadas para calcular a eficiência de painéis FV que possuem células FV policristalinas.

Tabela 1 – Correlações da eficiência de painéis FV em função da temperatura

CORRELAÇÕES	EQUAÇÃO
$\eta(I(t), T_c) = \eta(I(t), 25^\circ\text{C}) \times [1 + c(T_c - 25)]$	(1)
$\eta_T = \eta_0 - K(T^{1/4} - T_0^{1/4})$	(2)
$\eta = -0,053T_{back} + 12,62$	(3)

Fonte: Dubey *et al.* (2013) (adaptado)

Na Eq. (1),  $c$  representa a redução de eficiência,  $c = -0,5\% / ^\circ\text{C}$  para módulos de silício policristalino,  $c = 0,02\% / ^\circ\text{C}$  para módulos de silício monocristalino e  $c = -0,41$  para módulos de célula de filme fino,  $\eta(I(t), 25^\circ\text{C})$ , representa a eficiência do módulo à uma temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , que é fornecida pelo fabricante. Na Eq. (2),  $K$  representa uma constante ( $K = 22,4$ ),  $T$  representa a temperatura medida,  $T_0 = 273 \text{ K}$ . Na Eq. (3),  $T_{back}$ , representa a temperatura medida da parte traseira do módulo FV.

O modelo matemático para cálculo da eficiência dos painéis FV utilizado no presente estudo é o modelo de Mohring *et al.* (2004), Eq. (1), que faz uma função entre eficiência e a temperatura do módulo para painéis FV policristalinos, seguindo a metodologia utilizada durante os experimentos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Módulo FV utilizado

Para o presente estudo foram utilizados dois módulos FV iguais de 20Wp da Kyocera Solar, produzidos pela Solartec S.A., modelo KS20T, cujas especificações são apresentadas na Tab. 2. Ambos painéis foram utilizados sem a moldura externa de alumínio, reduzindo sua massa total em 31,18%.

A área do lado traseiro do painel exposta, sem isopor, que trocou calor com o ambiente foi  $1.142,08 \text{ cm}^2$  o que equivale a 64,85% da área total do painel.

Tabela 2 – Especificações do módulo FV modelo Kyocera KS20T.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência Nominal ( $P_{nom}$ )	20Wp
Corrente de Curto-Circuito ( $I_{oc}$ )	1,24 A
Tensão de Circuito Aberto ( $V_{oc}$ )	21,70 V
Corrente de Máxima Potência ( $I_{max}$ )	1,16 A
Tensão de Máxima Potência ( $V_{max}$ )	15,0 V
Temperatura de referência ( $T_0$ )	$25^\circ\text{C}$
Irradiância de referência ( $G_0$ )	$1.000 \text{ W/m}^2$
Massa do painel com moldura	2.550 g
Massa do painel sem moldura	1.755 g
Largura do painel sem moldura	34,4 cm
Comprimento do painel sem moldura	51,2 cm

Fonte: Kyocera Solar (2017)

Um dos painéis FV utilizados foi exposto a um ambiente convencional, instalado sobre o solo, conforme Fig. 2. O segundo painel FV foi posto flutuante, instalado em uma estrutura de isopor sobre o espelho d'água de um tanque de 12.000 L com 1,20m de altura e 3,80 de diâmetro localizado no LEA, conforme Fig. 3.



Figura 2- Painel FV instalado sobre o solo.

A distância entre painel FV e espelho d’água foi ajustada a cada dois dias, retirando-se uma camada de isopor de 1,5 cm de altura de cada vez. As distâncias entre o espelho d’água e o painel FV para o experimento variaram de 7,5 cm, 6 cm, 4,5 cm e 3 cm.



Figura 3- Painel FV instalado sobre a água.

### 3.2 Sensores e aquisição de dados

Para realizar as medições de temperatura dos dois painéis (sobre o solo e sobre o espelho d’água) foram utilizados dois sensores PT-100 (a prova d’água). Na Fig. 4 (a) é mostrado o sensor antes da instalação e a Fig. 4 (b) apresenta o sensor fixado no centro do painel. O sensor PT-100 é um tipo particular de Detector de Temperatura por Resistência (RTD – *Resistance Temperature Detectors*) que mede a temperatura pela correlação da sua resistência elétrica com a temperatura ( $100 \Omega$  a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). A escolha do PT-100 como sensor para o presente estudo foi devido a várias vantagens: Ampla faixa de temperatura, boa precisão e boa permutabilidade (melhor que termopares) e estabilidade em longo prazo (Dupont, 2017). Outro PT-100 foi colocado em uma moldura de isopor abaixo do painel FV flutuante para monitorar a temperatura da água durante os experimentos, como pode ser visto na Fig. 3, ele já posicionado abaixo do painel e na Fig. 5 antes de ser posicionado na água. Todos os sensores que foram expostos à água receberam uma camada extra de silicone para vedá-los, evitando possíveis infiltrações que poderiam inutilizá-los ou alterar dados coletados.



(a)

(b)

Figura 4- Sensores PT-100.

Os sensores foram conectados a transmissores de temperatura da marca NOVUS, modelo TxRail, equipamentos disponíveis no LEA-UFC e utilizados para adquirir dados da mesma natureza desse trabalho, mostrados na Fig 6. Os transmissores aceitam sensores PT-100 a uma faixa de temperatura de  $-200$  a  $650 \text{ }^\circ\text{C}$  (Novus, 2016)

Todas as medições efetuadas pelos sensores descritos são coletadas por um sistema supervisorio composto por controladores lógicos programáveis (CLP). O sistema de supervisão e aquisição de dados comercial utilizado é composto por um *software* de monitoramento, e o CLP como protocolo de comunicação para supervisionar e armazenar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle conectados através de *drivers* específico (Dupont, 2016). Esse

o sistema já foi utilizado em pesquisas anteriores do LEA-UFC. Os dados monitorados foram apresentados em uma tela que fornece os dados em tempo real, como é representado na Fig. 7.

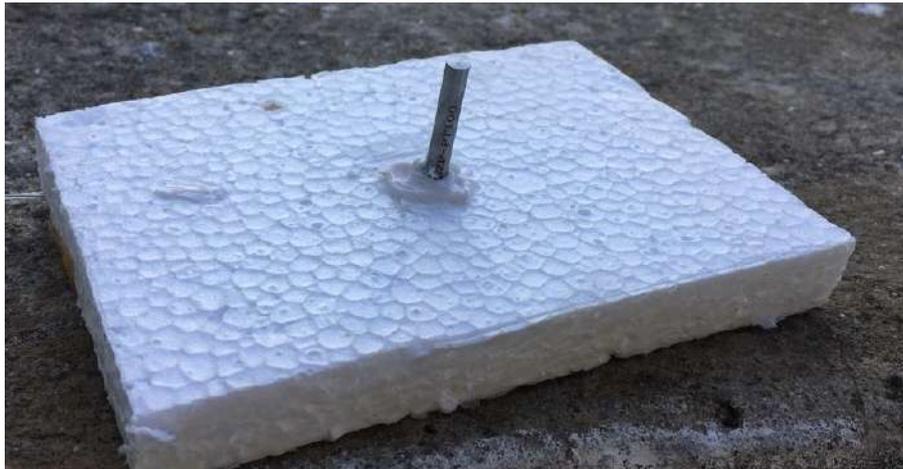


Figura 5 – Sensor PT-100 utilizado para monitorar a temperatura da água.



Figura 6 – Transmissores de temperatura NOVUS.

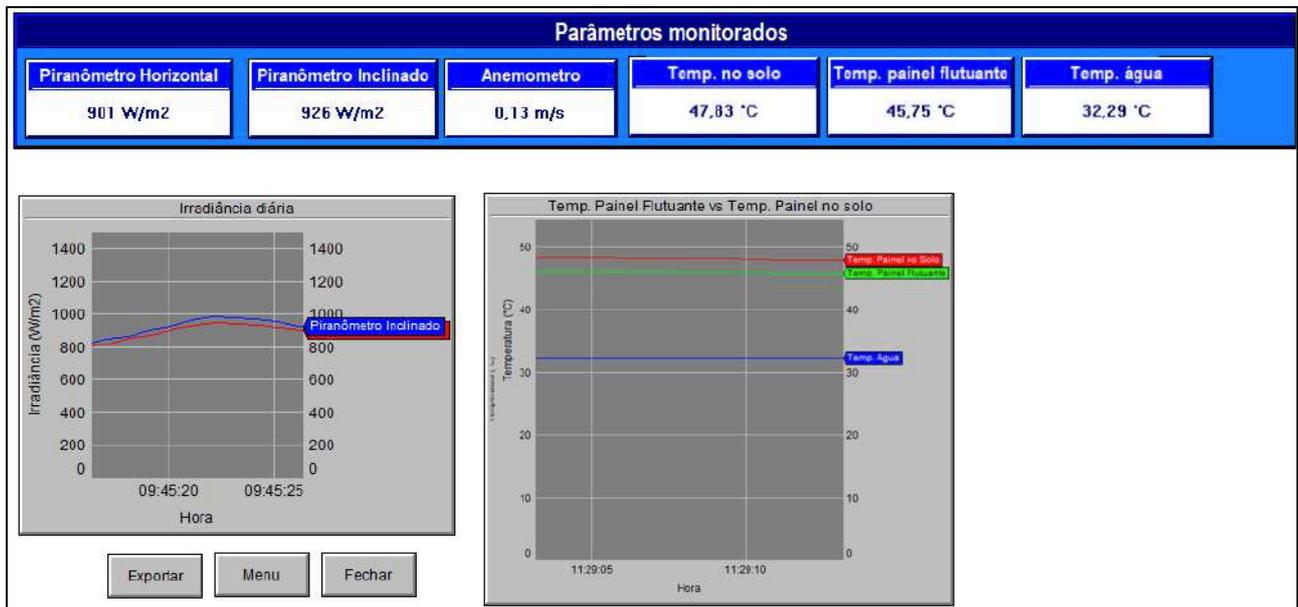


Figura 7 – Tela do programa de monitoramento de dados.

Utilizou-se também um piranômetro (Fig. 8(a)) e um anemômetro (Fig. 8(b)) já existentes no LEA-UFC para aquisição de dados.

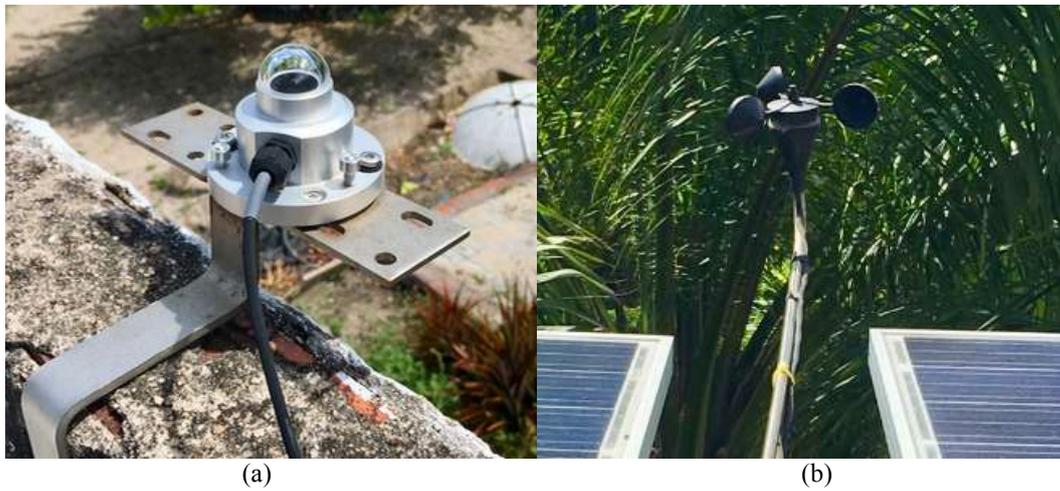


Figura 8 – Piranômetro e anemômetro utilizados.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através dos experimentos realizados no LEA-UFC são apresentados em forma de gráficos. Na Fig. 9 são apresentados o comportamento da temperatura dos painéis FV sobre o solo e flutuante a uma distância de 7,5 cm em relação ao espelho d'água, na Fig. 10 são apresentados os dados de irradiância e velocidade do vento para o mesmo dia. Na Fig. 11 a distância é de 6 cm, na Fig. 13 a distância é 4,5 cm e na Fig. 15 é apresentado o painel FV com distância de 3 cm em relação à água, já nas Fig. 12, Fig. 14 e Fig. 16 são respectivamente apresentados os dados de irradiância e velocidade do vento dos dias apresentados nas Fig. 11, Fig. 13 e Fig. 15. Todos os gráficos representam o dados de temperaturas coletados durante 13 horas (das 5:00 às 18:00 hs) dos dias 11 de novembro de 2017 a 18 de novembro de 2017, sendo possível observar que há uma similaridade entre as curvas de temperatura dos dois painéis durante todo o dia.

Conforme dados da Fig. 9, foi constatado que durante as horas que a irradiação apresentava-se maior que  $0 \text{ W/m}^2$  a média da diferença de temperatura dos painéis FV monitorados foi  $0,21^\circ \text{ C}$  entre o painel instalado sobre estrutura flutuante (mostrou-se com média de temperatura inferior) e o painel instalado sobre o solo. De acordo com o modelo matemático utilizado, isto representa que o painel sobre o solo, apresentou uma redução média de 10,7% sobre a eficiência do painel, já o painel flutuante apresentou uma redução média de 10,6%. Nada pode ser concluído sobre isto, uma vez que as diferenças de temperatura estão dentro das incertezas experimentais.

Conforme dados da Fig. 11, foi constatado que durante as horas que a irradiação apresentava-se maior que  $0 \text{ W/m}^2$  a média da diferença de temperatura dos painéis FV monitorados foi  $1,08^\circ \text{ C}$  entre o painel instalado sobre estrutura flutuante (mostrou-se com média de temperatura inferior) e o painel instalado sobre o solo. De acordo com o modelo matemático utilizado, isto representa que o painel sobre o solo, apresentou uma redução média de 9,23% sobre a eficiência do painel, já o painel flutuante apresentou uma redução média de 8,69%.

Conforme dados da Fig. 13, foi constatado que durante as horas que a irradiação apresentava-se maior que  $0 \text{ W/m}^2$  a média da diferença de temperatura dos painéis FV monitorados foi  $0,03^\circ \text{ C}$  entre o painel instalado sobre estrutura flutuante (mostrou-se com média de temperatura inferior) e o painel instalado sobre o solo. De acordo com o modelo matemático utilizado, isto representa que o painel sobre o solo, apresentou uma redução média de 8,07% sobre a eficiência do painel, já o painel flutuante apresentou uma redução média de 8,06%. Nada pode ser concluído sobre isto, uma vez que as diferenças de temperatura estão dentro das incertezas experimentais.

Conforme dados da Fig. 15, foi constatado que durante as horas que a irradiação apresentava-se maior que  $0 \text{ W/m}^2$  a média da diferença de temperatura dos painéis FV monitorados foi  $0,04^\circ \text{ C}$  entre o painel instalado sobre estrutura flutuante (mostrou-se com média de temperatura inferior) e o painel instalado sobre o solo. De acordo com o modelo matemático utilizado, isto representa que o painel sobre o solo, apresentou uma redução média de 9,56% sobre a eficiência do painel, já o painel flutuante apresentou uma redução média de 9,54%. Nada pode ser concluído sobre isto, uma vez que as diferenças de temperatura estão dentro das incertezas experimentais.

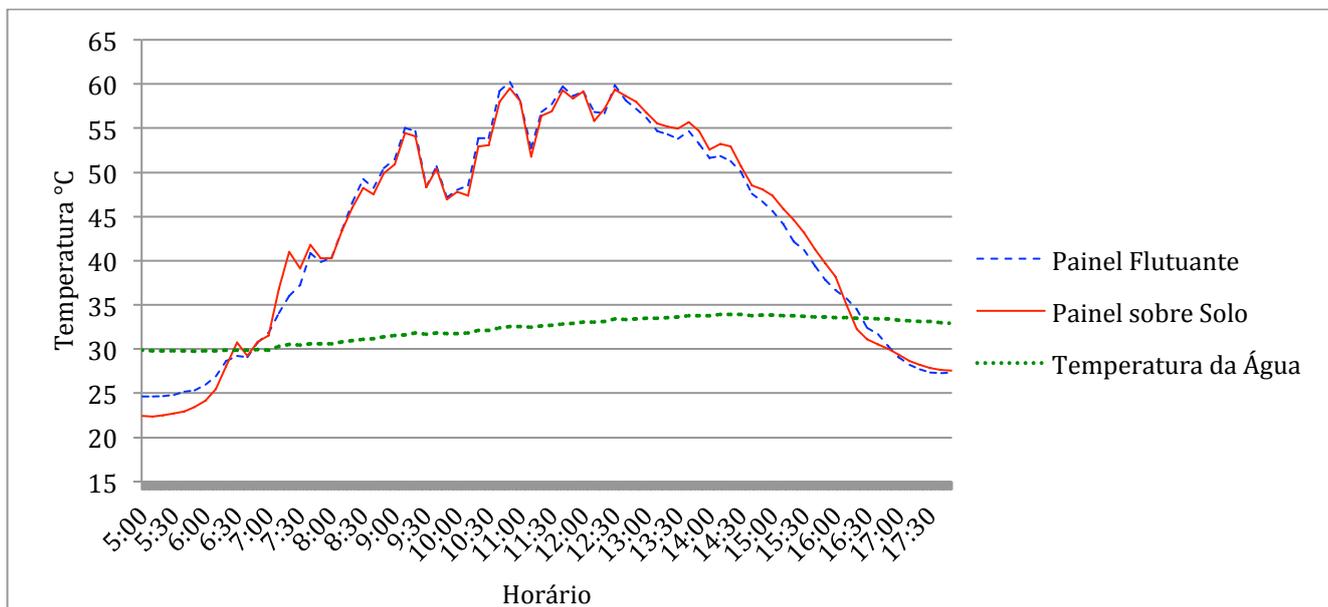


Figura 9 – Temperatura dos painéis FV (flutuante: 7,5 cm).

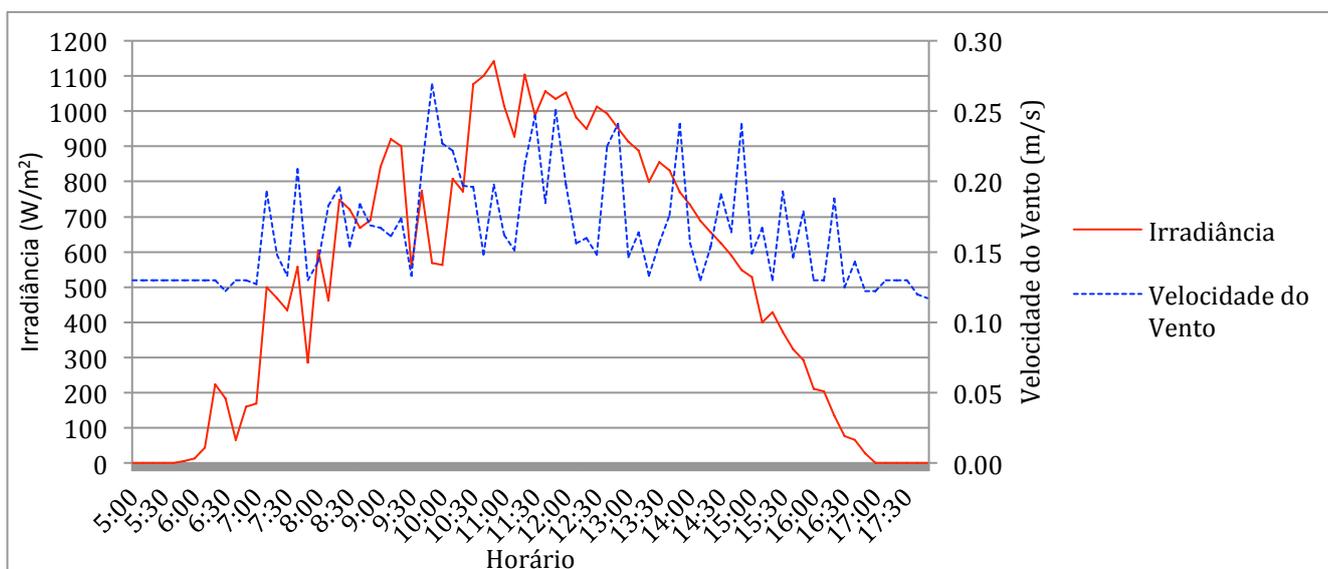


Figura 10 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 7,5 cm).

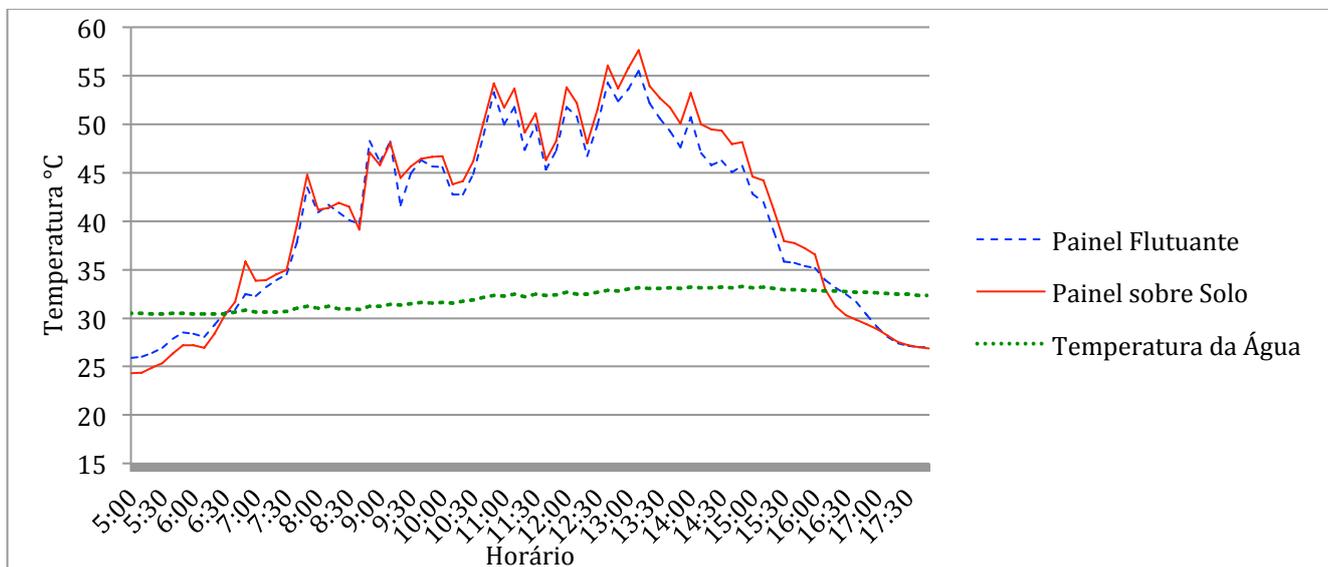


Figura 11 – Temperatura dos painéis FV (flutuante: 6 cm).

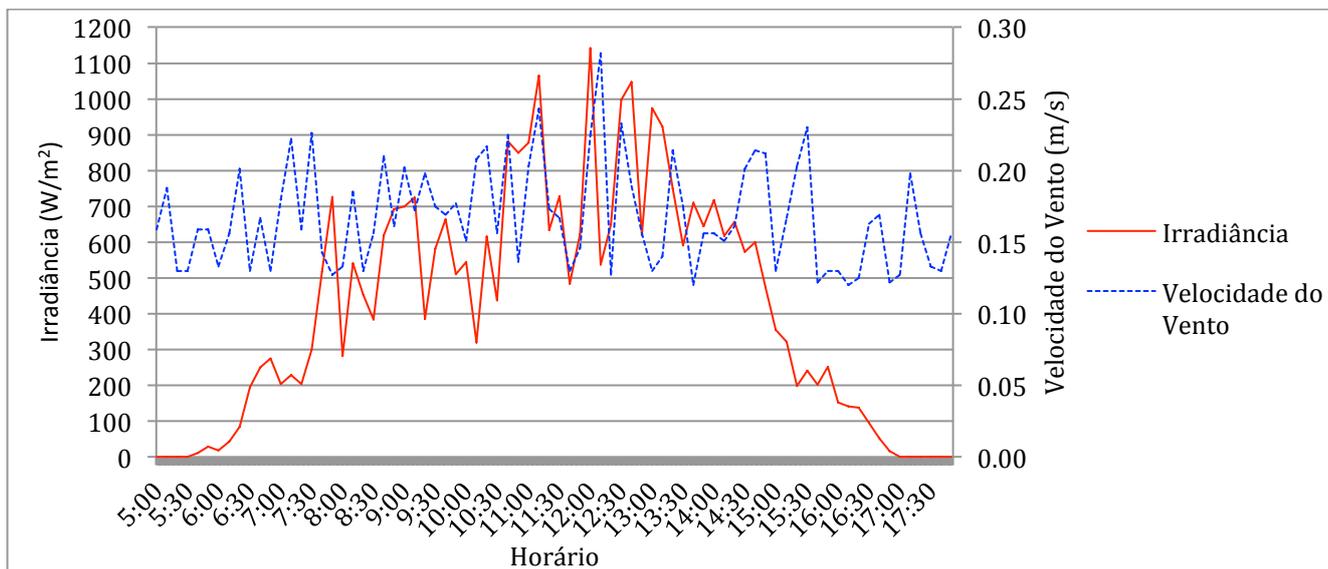


Figura 12 – Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 6 cm).

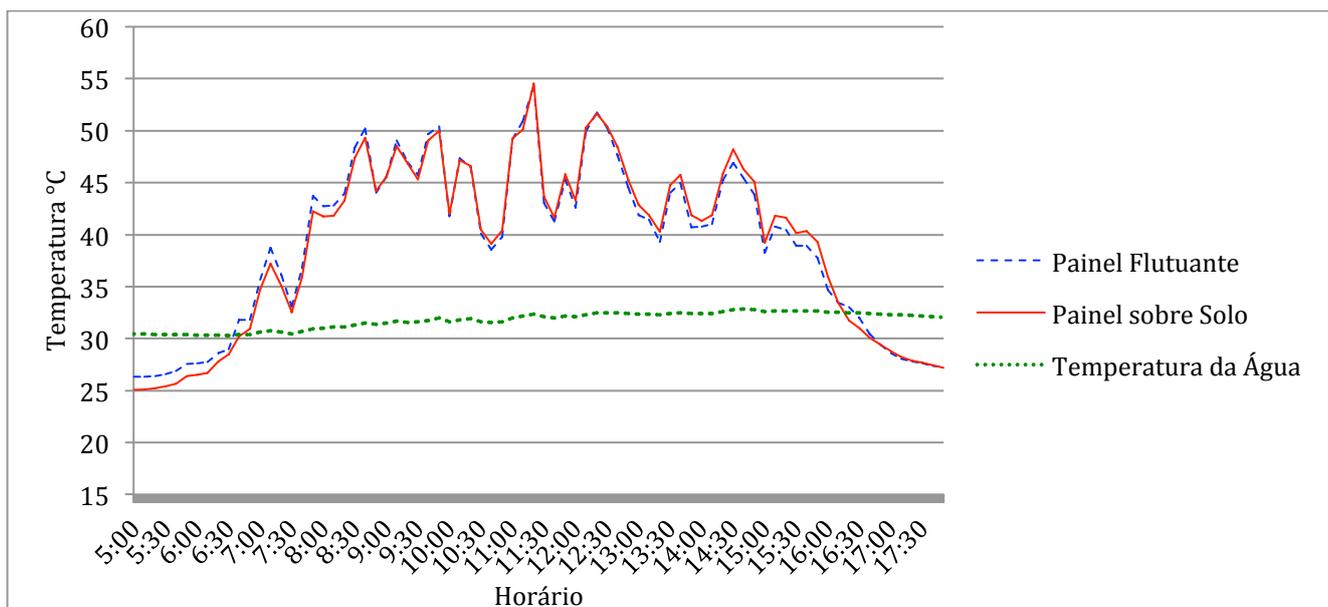


Figura 13 – Temperatura dos painéis FV (flutuante: 4,5 cm).

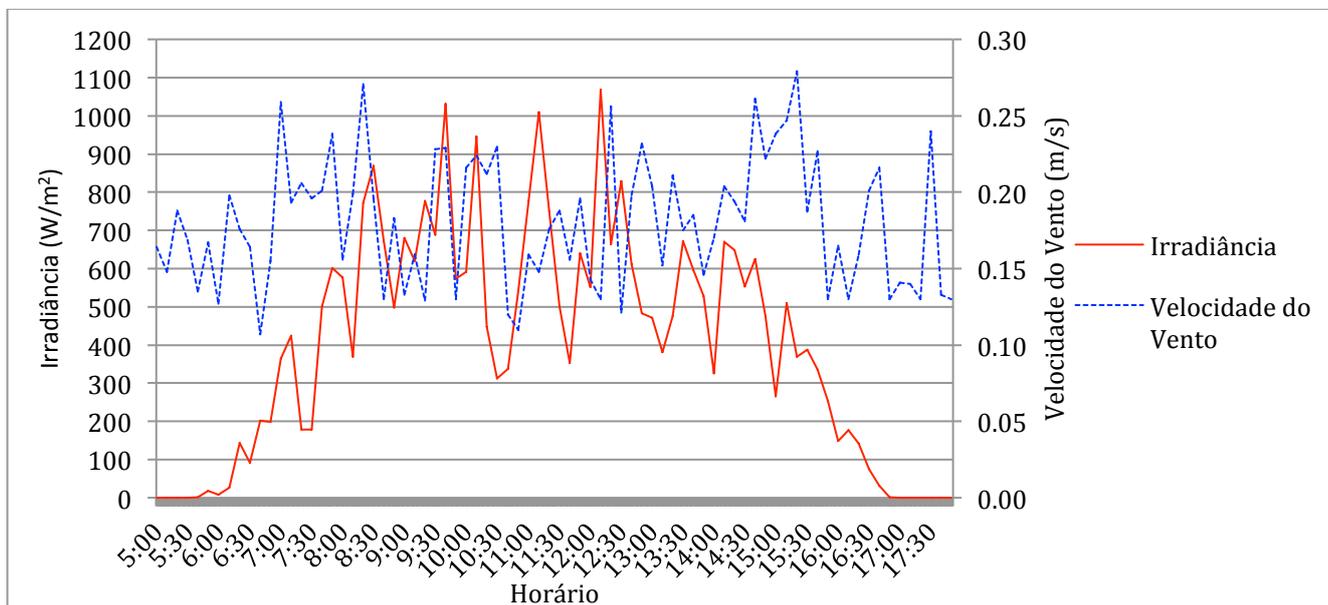


Figura 14 - Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 4,5 cm).

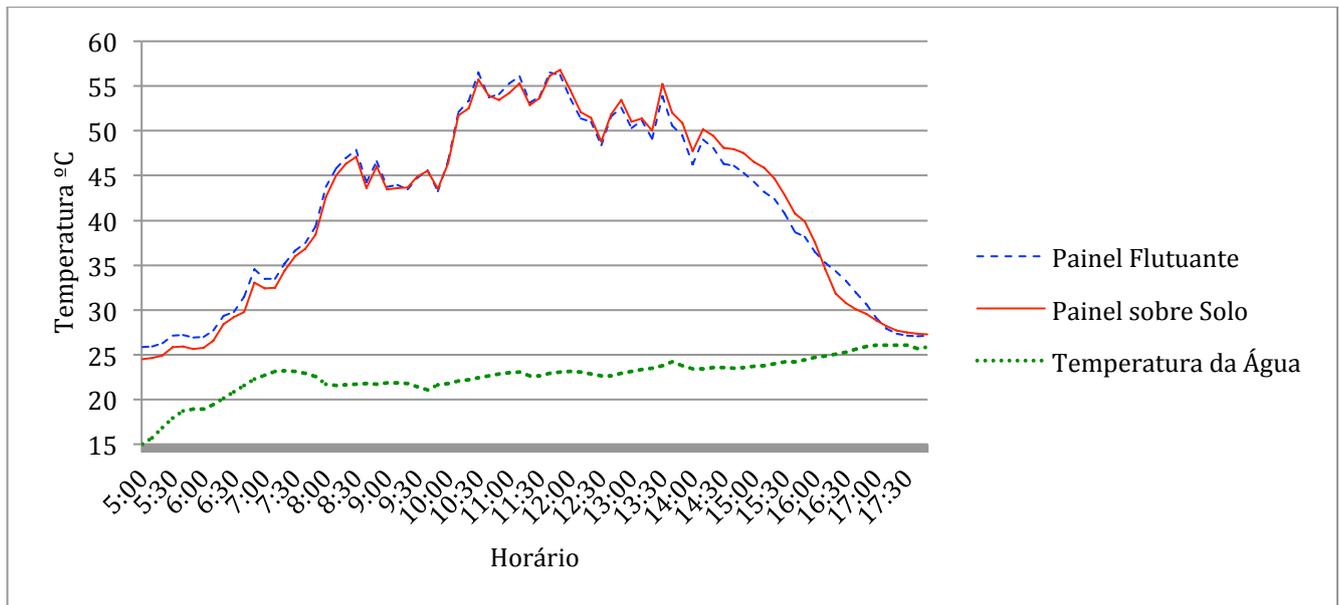


Figura 15 - Temperatura dos painéis FV (flutuante: 3 cm).

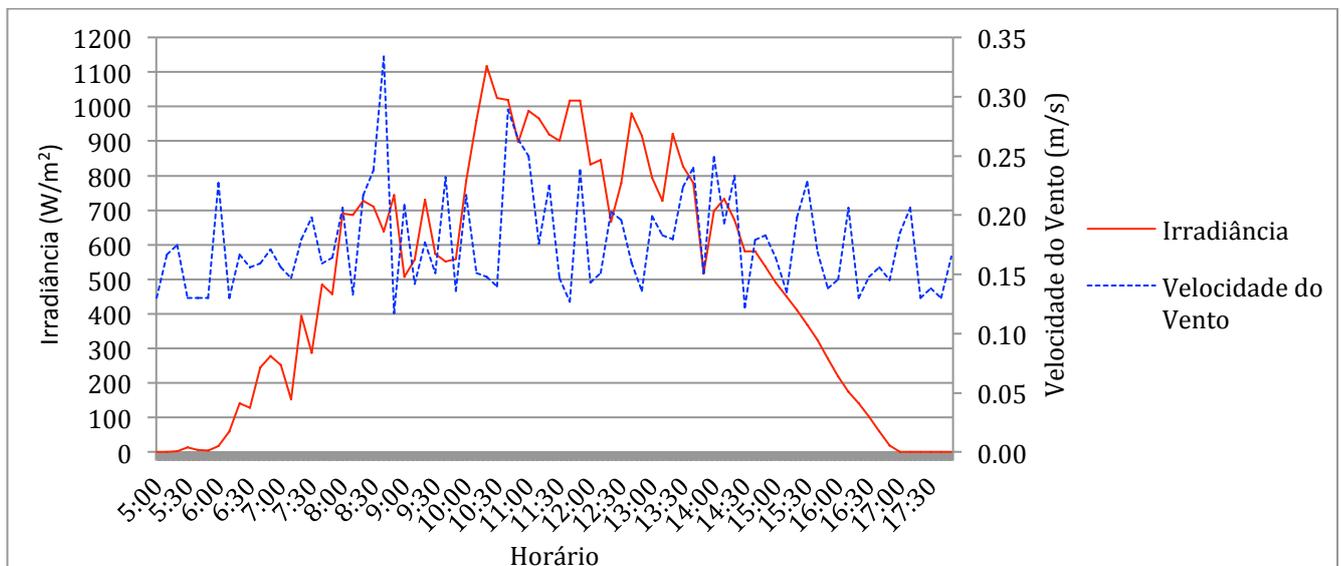


Figura 16 - Dados de irradiância e velocidade do vento (flutuante: 3 cm).

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos experimentos realizados, foi verificado que não houve redução significativa de temperatura do módulo FV flutuante, comparado com um módulo equivalente instalado sobre o solo, para causar aumento da eficiência da conversão energética. Foi verificado que a diferença de temperatura entre o módulo flutuante e o sobre o solo chegou a um máximo de 5,72°C para 6 cm de altura do painel em relação à água. Em comparação aos experimentos realizados por Do Sacramento *et al.*, 2015, quando o mesmo módulo FV foi posto em contato com a água, não foram constatados ganhos de eficiência significativos, mesmo mantendo a distância entre o painel e a superfície da água entre 3 cm e 7,5 cm.

Visando a obtenção de ganhos significativos de eficiência, podem ser tentadas estratégias, tais como:

- Instalação dos módulos FV em grandes espelhos d'água, com circulação de água;
- Uso de painéis FV de maiores potências, para produzir uma área sombreada maior;
- Uso de estruturas alternativas de suporte ao painel, para que a troca de calor seja maior e que por consequência haja maior redução de temperatura.

## Agradecimentos

Ao corpo discente e docente do LEA – UFC pelo suporte técnico e intelectual para a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Centro de Referência para e Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014
- Choi, Y. A study on power generation analysis of floating PV system considering environmental impact. *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, 2014, v. 8, n. 1, p. 75-84.
- Do Sacramento, E. M.; Carvalho, P. C. M.; De Araújo, J. C.; Riffel, D. B.; Da Cruz Corrêa, R. M.; & Pinheiro Neto, J. S. Scenarios for use of floating photovoltaic plants in Brazilian reservoirs. *IET Renewable Power Generation*, 2015, v. 9, p. 1019-1024.
- Dubey, S.; Sarvaiya, J. N.; Seshadri, B. Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review, In *Energy Procedia*, Volume 33, 2013, Pages 311-321, ISSN 1876-6102.
- Dupont, I. M. Sistema embarcado linux para monitoramento em nuvem aplicado a bombeamento fotovoltaico. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2017.
- Galdino, M. A.; Olivieri, M. M. A. Considerações sobre a Implantação de Sistemas Fotovoltaicos Flutuantes no Brasil. In: VI CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016, Belo Horizonte. Anais do VI CBENS, 2016.
- Kyocera Solar, disponível em: <https://www.kyocerasolar.com/dealers/product-center/archives/spec-sheets/Solartec-KS20.pdf>, Acesso em 03 de outubro de 2017.
- Mohring, H.D., Stellbogen, D., Schäffler, R., Oelting, S., Gegenwart, R., Kontinen, P., Carlsson, T., Cendagorta, M., Hermann, W., 2004. Outdoor performance of polycrystalline thin film PV modules in different European climates. In: *Proceedings of 19th EC Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France 2011.
- Novus. Transmissor TxRail 4-20 mA. n. 51, p. 19–21, 2016.
- Sahu, A.; Yadav, N.; Sudhakar, K. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, v. 66, p. 815-824.
- Trapani, K; Santafé, M. R. A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2015, v. 23, n. 4, p. 524-532.
- Yamaguchi, T.; Okamoto, Y.; Taberi, M. Investigation on abundant photovoltaic power generated by 40kW PV system in Wakayama National College of Technology, In *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 75, Issues 3–4, 2003, Pages 597-601, ISSN 0927-0248.

## INFLUENCE OF THE DISTANCE OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN RELATION TO WATER ON ENERGY EFFICIENCY

**Abstract.** *Solar energy is considered one of the most promising alternative energy sources, and its application in photovoltaic (PV) systems is the most common for electric power generation. High operating temperatures of PV panels cause a reduction in energy efficiency. For this reason, the present paper aims, through experiments with floating panels, to verify the influence of the distance between the floating PV panel and the water mirror on the temperature of the panels, changing this distance and collecting the temperature data through a programmable logic controller (PLC), with the use of PT-100 temperature sensors. Data were collected for distances between water and PV module of 7.5 cm, 6 cm, 4.5 cm and 3 cm. After acquisition of data and use of mathematical model no significant efficiency gains were found for the described conditions of the present research.*

**Key words:** *Floating photovoltaic panel, Photovoltaic panel Temperature, Photovoltaic panel efficiency.*