

# Experimental Assessment and Modeling of a Floating Photovoltaic Module with Heat Bridges

Bruna O. Busson, Leticia O. Santos, Paulo C. M. Carvalho and Clodoaldo O. Carvalho, Filho

**Abstract**—Photovoltaic (PV) modules convert part of solar radiation into electrical energy. Another fraction of the incident energy causes an increase of the PV module operating temperature, leading to an electrical performance reduction. In the present paper is proposed the passive cooling of a floating PV (FPV) module using 5 fixed heat bridges to reduce the operating temperature and increase the energy conversion efficiency. The modeling developed for a FPV module operating temperature with heat bridges predicts the cooling capacity of the plant. The proposed model is nonlinear algebraic and equations require iterative numerical solution. Experimental tests allowed to compare thermal and electrical behavior of a FPV module and a rooftop (conventional) PV module, both in Fortaleza, Brazil. The FPV module temperature was 3.2°C lower than the conventional module temperature, on average. The model developed for FPV module with heat bridges may predict its operating temperature with error around 5%. According to the measurements, the FPV module productivity was 26.1% higher than conventional PV module productivity, on average. Thus, the modeling developed is in condition to predict the thermal behavior and prove the effectiveness of passive cooling.

**Index Terms**—Floating PV Module, Passive Cooling, Thermal-electrical Performance.

## I. INTRODUÇÃO

A energia é um dos propulsores do desenvolvimento e manutenção da sociedade moderna, somada a seus benefícios socioeconômicos e avanços tecnológicos [1]. Para manter o ritmo atual de desenvolvimento, o consumo de energia elétrica tem aumentado em todo o mundo. Em 2017, 64,8% da produção mundial de energia elétrica veio de fontes fósseis [2]. Em virtude dos impactos causados [3], diversos países e organizações internacionais vem tomando medidas para elevar o uso de fontes renováveis [4], [5].

Além da intermitência do recurso solar, que afeta todas as fontes renováveis de energia, a conversão fotovoltaica (FV) enfrenta barreiras como o acúmulo de sujeira na superfície dos módulos, ocupação de terrenos, redução de eficiência com o aumento da temperatura de operação do módulo e custos [6], [7], [8]. Os módulos FV convertem cerca de 10% a 20% da irradiação solar em energia elétrica; uma fração dessa irradiação (3% - 10%) é refletida pela superfície do vidro e

o restante é acumulado na forma de calor [9], elevando a temperatura de operação [10], [11].

A temperatura de operação FV é determinada por um balanço energético e tem relação com a sua eficiência de conversão elétrica [12]. A elevação na temperatura de operação afeta a geração, pois diminui a tensão de saída e o ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP) [13], [14], [15].

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo principal investigar, por meio de modelagem e testes experimentais, o ganho no desempenho térmico-elétrico pelo arrefecimento passivo de um módulo FV flutuante (FVF) com pontes de calor em contato com a água.

## II. MÓDULOS FV ARREFECIDOS COM ÁGUA

Tanto o arrefecimento passivo como ativo dos módulos FV é considerado a técnica mais barata para melhorar o desempenho FV [16]. Em [17] foi estudado o arrefecimento com água de módulos FV em regiões quentes e áridas, o estudo demonstrou que o ar diminuiu a temperatura de operação FV em cerca de 4,7°C e melhorou a eficiência em torno de 2,6%. Já a água, reduziu a temperatura em cerca de 8°C e elevou a eficiência em 3% [17].

As plantas híbridas fotovoltaicas-térmicas (FVT) geram energia elétrica e fornecem calor a ambientes [10]. Essa solução é particularmente interessante em regiões de clima frio [18]. O módulo FVT pode ser resfriado por *spray* de água, em [19] esta técnica de arrefecimento aumentou a potência de saída, em torno de 50%, e a eficiência térmica. Além disso, o fluxo de água contribuiu para um aumento na irradiação incidente para o módulo [20]. Contudo, o aumento no fluxo de água não é diretamente proporcional ao aumento da eficiência [21].

O módulo FVT pode ser ainda uma placa absorvente conectada a tubos metálicos através dos quais água flui [9]. O arrefecimento permite uma temperatura inferior do módulo, originando um valor de tensão do MPP superior [19]. As principais desvantagens são o alto custo inicial e a dificuldade de alcançar a eficiência ideal quando o fluxo é constante [7].

Outra técnica que pode ser usada consiste na submersão de módulos FV em líquido para que o fluido possa remover calor do módulo [22], [23]. Os resultados mostram que a temperatura da superfície do módulo diminui, o que consequentemente aumenta a eficiência de conversão FV [20]. A imersão é efetiva se utilizada em regiões de alta irradiação e temperatura [24]. No entanto, a irradiação diminuiu com a profundidade de imersão e, com o tempo, a exposição a um meio com água ionizada afeta a eficiência elétrica [6], [7].

Bruna O. Busson is with POSMEC at UFSC, Florianópolis, SC, Brazil e-mail: bruna.busson@yahoo.com.br

Leticia O. Santos is with PPGEM at UFC, Fortaleza, CE, Brazil, e-mail: leticia@fisica.ufc.br

Paulo C.M. Carvalho is with PPGEE at UFC, Fortaleza, CE, Brazil e-mail: carvalho@dee.ufc.br

Clodoaldo O. Carvalho Filho is with DEM at UFC, Fortaleza, CE, Brazil e-mail: clodoaldo@ufc.br

Manuscript submitted for review on April 22, 2021. This work was supported by CAPES and CNPq

A experiência adquirida com o uso de módulos submersos pode ser utilizada para construir plantas FVF sobre estruturas flutuantes [25]. As plantas FVF melhoram a eficiência, especialmente quando se trata de sistemas solares com rastreamento, em comparação com plantas FV instaladas no solo ou telhado.

Os módulos FVF podem ser posicionados com inclinação arbitrária, enquanto toda a sua estrutura de suporte pode girar em torno de um eixo por um sistema de rastreamento solar [26]. A melhor localização para a instalação do arranjo FVF depende de aspectos como: restrições ambientais, econômicas e técnicas. Vários trabalhos na literatura apontam vantagens e desvantagens da aplicação de módulos FVF [25], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33]. Arranjos FVF estão sendo estudados em diferentes ambientes [29]. Os desafios envolvem a otimização de plataformas flutuantes e sistemas de ancoragem para suportar ambientes mais severos [25]. A maioria dos projetos é realizada em instalações baseadas em estruturas flutuantes do tipo pontão estabelecidas em corpos d'água usados principalmente para irrigação [34].

Galdino e Olivieri [35] compararam as instalações de módulos FVF existentes no Japão, Coréia do Sul e Estados Unidos com dois projetos-piloto instalados em barragens hidrelétricas, nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Considerando o contexto brasileiro, a maior vantagem das usinas FVF é o compartilhamento da infraestrutura de transmissão existente em reservatórios hidrelétricos.

Alencar Filho [36] determinou o comportamento térmico-elétrico de um módulo FVF instalado no semiárido brasileiro baseado no modelo de [37] para o cálculo da eficiência instantânea de conversão FV em função da temperatura de operação FV.

Dados coletados de um sistema FVF instalado na Coréia ao longo de um ano foram analisados em [38]. O *software* MATLAB foi usado para derivar os coeficientes ambientais da equação para, assim, desenvolver o modelo de temperatura de operação. Ao comparar a previsão teórica com a temperatura real do módulo FVF, os erros do modelo variaram entre 2% e 4%, dependendo do número de coeficientes incorporados à equação.

O presente artigo apresenta uma proposta inovadora para elevar o desempenho térmico-elétrico de módulos FVF através do arrefecimento passivo com o uso de pontes de calor em contato com água, considerando as condições climáticas específicas do semiárido brasileiro. A modelagem do módulo FVF com pontes de calor utiliza coeficientes que advêm de medições das características físico-ambientais encontradas experimentalmente.

### III. BALANÇO DE ENERGIA

A metodologia proposta faz uso de aletas de alumínio de seção retangular em formato de "L" fixas como pontes de calor, estabelecendo o contato direto entre a superfície posterior aquecida do módulo FVF e a água, sem a intermediação do ar que apresenta baixo coeficiente convectivo. As aletas são superfícies estendidas que aumentam a taxa de transferência de calor entre um sólido e um fluido adjacente. Com a remoção de calor, espera-se uma redução na temperatura de operação do

módulo. A Fig. 1 apresenta o esquema do módulo FVF com as pontes de calor no *software* PVSyst que é comumente utilizado para dimensionamento e desenvolvimento de projetos. No presente artigo, o PVSyst foi utilizado apenas para fazer o desenho 3D do módulo com pontes de calor.

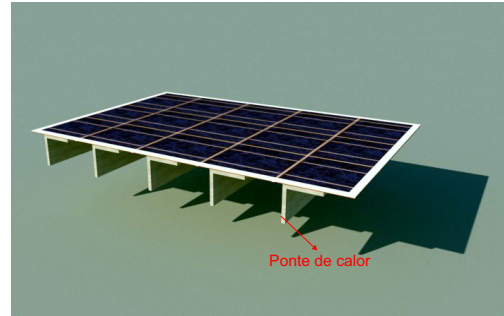


Fig. 1. Módulo FVF com pontes de calor no *software* PVSyst.

Na presente proposta, as pontes de calor estão imersas em dois fluidos que possuem uma interface de contato entre eles. Para a modelagem das trocas de calor nas duas abas, a transferência de calor para a aba vertical é considerada compatível com a troca de calor de uma placa vertical, enquanto a aba horizontal tem o comportamento térmico próximo a uma placa horizontal.

#### A. Balanço de Energia do Módulo FVF com Pontes de Calor Imersas em Dois Fluidos

Um módulo FVF na horizontal (ângulo de inclinação nulo) com pontes metálicas flutuando com o apoio de um flutuador em um reservatório com água, é considerado na presente análise. Como o objetivo é analisar os ganhos no desempenho térmico-elétrico através do arrefecimento passivo do módulo FVF, inicia-se a modelagem do comportamento térmico pelo balanço de energia. A Fig. 2 apresenta os mecanismos de perda de calor, a potência de saída e a irradiação incidente. A Tabela I mostra a lista de parâmetros que fazem parte das Equações da Seção III.

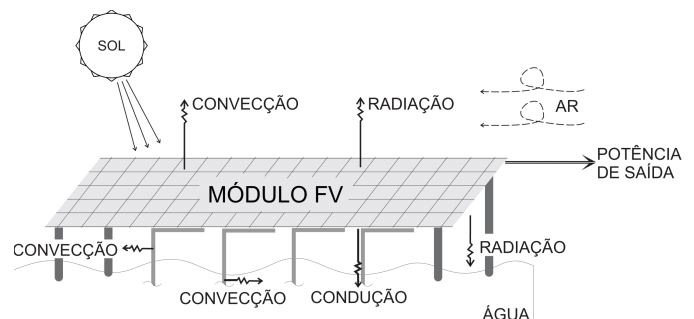


Fig. 2. Balanço de energia de um módulo FVF com pontes de calor em contato com a água.

A irradiação incidente no módulo FV produz corrente elétrica e calor. Na superfície superior, as perdas ocorrem por radiação e convecção: a radiação é devida à emissividade para o céu e a convecção é devida ao movimento do ar. Na

TABELA I

 PARÂMETROS QUE COMPÕEM AS EQUAÇÕES DA  
 MODELAGEM DO MÓDULO FVF COM PONTES DE CALOR

Parâmetro	Símbolo	Unidade
Absortividade	$\alpha$	-
Área da seção transversal	$A_{st}$	m <sup>2</sup>
Área do módulo FV	$A_p$	m <sup>2</sup>
Área posterior do módulo sem pontes de calor	$A_n$	m <sup>2</sup>
Coefficiente convectivo do ar	$h_{Car}$	W/m <sup>2</sup> K
Condutividade térmica do alumínio	$k$	W/mK
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma$	W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
Eficiência de conversão do módulo FV	$\eta_{el}$	-
Emissividade	$\epsilon$	-
Espessura da aleta	$t$	m
Fator de forma	$F_{s-ceu}$	-
Irradiância solar incidente	$G$	W/m <sup>2</sup>
Potência elétrica de saída	$W_{el}$	W
Quantidade	$N$	-
Resistência térmica de contato	$R''_{TC}$	m <sup>2</sup> K/W
Subíndice para aba horizontal	$h$	-
Subíndice para aba vertical	$v$	-
Subíndice para ponte de calor	$pc$	-
Subíndice para superfície inferior	$i$	-
Subíndice para superfície superior	$s$	-
Taxa de calor dissipado	$q$	W
Temperatura ambiente	$T_{ar}$	°C
Temperatura da água	$T_{H2O}$	°C
Temperatura de operação do módulo FV	$T_p$	°C
Temperatura do céu	$T_{ceu}$	K
Temperatura na base da aba	$T_b$	°C

superfície inferior, ocorrem perdas por radiação, convecção e condução: a perda por radiação é devida à emissividade para a água, a condução ocorre através da ponte de calor e a convecção é devida às trocas de calor entre a ponte e ar/água. Portanto, o balanço energético do módulo FVF é o seguinte:

$$\alpha G A_p - q_s - q_i - W_{el} = 0, \quad (1)$$

onde  $\alpha$  é a absortividade na superfície superior do módulo FV,  $G$  é a irradiância solar incidente,  $A_p$  é a área e  $W_{el}$  é a potência elétrica.

O termo  $q_s$  da equação (1) é a combinação de perdas convectivas para o ar e radiativas para o céu:

$$q_s = h_{Car} A_p (T_p - T_{ar}) + F_{s-ceu} \epsilon_s \sigma A_p [(T_p + 273, 15)^4 - T_{ceu}^4], \quad (2)$$

onde  $h_{Car}$  é o coeficiente convectivo do ar que é uma combinação das convecções natural e forçada sobre placa horizontal,  $T_p$  a temperatura de operação,  $T_{ar}$  a temperatura ambiente,  $F_{s-ceu}$  o fator de forma,  $\epsilon$  a emissividade e  $\sigma$  é igual a  $5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>. A temperatura do céu ( $T_{ceu}$ ) é calculada de acordo com [39] baseada na temperatura de orvalho que, por sua vez, é obtida de cálculos térmicos no *software* Coolprop.

O termo  $q_i$  da equação (1) inclui a taxa de dissipação de calor através de cada ponte de calor ( $q_{pc}$ ) e na superfície inferior sem pontes de calor fixadas ( $q_n$ ):

$$q_i = q_n + N_{pc} q_{pc}, \quad (3)$$

onde  $N_{pc}$  é a quantidade de pontes de calor que é limitada pela relação entre o comprimento do módulo FV e o comprimento da aba horizontal da ponte de calor.

A combinação das perdas de calor por radiação para a superfície da água e por convecção para o ar é:

$$q_n = A_n \left\{ \epsilon_i \sigma [(T_p + 273, 15)^4 - T_{H2O}^4] + h_{Car} (T_p - T_{ar}) \right\}, \quad (4)$$

onde  $A_n$  é a área posterior do módulo sem pontes e  $T_{H2O}$  é a temperatura da água.

A  $W_{el}$  depende da relação entre  $G$  e a eficiência ( $\eta_{el}$ ):

$$W_{el} = \eta_{el} G A_p, \quad (5)$$

neste caso,  $\eta_{el}$  varia com  $T_p$  de acordo com o modelo apresentado em [37]. Tal modelo leva em consideração a eficiência do módulo FV na condição de temperatura de operação nominal da célula (*Nominal Operating Cell Temperature* - NOCT), a constante de redução da eficiência e  $T_p$ .

### B. Modelagem Unidimensional da Dissipação de Calor na Ponte de Calor

As camadas do módulo FV, o alumínio da ponte de calor, a água, o ar e a junta de contato são considerados homogêneos e com propriedades termofísicas contantes que levam a uma transferência de calor por condução unidimensional no estado estacionário. A modelagem da transferência de calor na aleta  $q_{pc}$  é dividida em seções horizontal e vertical e segue as dimensões apresentadas na Fig. 3.

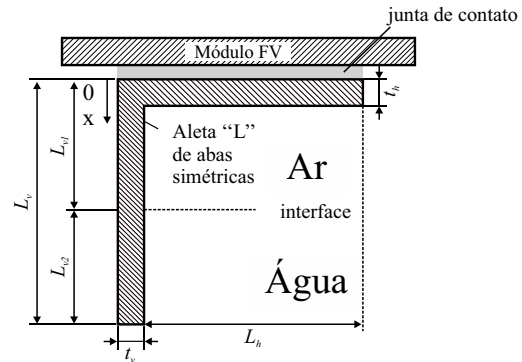


Fig. 3. Geometria da ponte de calor "L" fixada sob o módulo FV imersa em ar e água.

A transferência de calor na aba horizontal da ponte de calor ( $q_{pch}$ ) envolve a condução de calor através da seção transversal de uma placa horizontal ( $A_{sth}$ ), a convecção devido ao contato com o ar e a resistência térmica de contato ( $R''_{TC}$ ) na junta de contato.

$$q_{pch} = \frac{(T_p - T_{ar}) A_{sth}}{R''_{TC} + \frac{t_h}{k} + \frac{1}{h_{Car}}}, \quad (6)$$

onde  $k$  é a condutividade térmica. Já a transferência de calor na aba vertical da ponte de calor ( $q_{pcv}$ ) envolve a  $R''_{TC}$ , a transferência de calor por condução ao longo do alumínio e as trocas de calor por convecção com o ar e com a água, ver Fig. 3.

Para simplificar as equações, a transferência de calor na ponta da aba vertical foi aproximada para a situação de uma ponta adiabática de maior comprimento. Após realizar todos



Fig. 4. Módulo FV modelo KS20T de 20 Wp flutuante com pontes de calor apoiado em suporte.



Fig. 5. Módulo FV modelo KS20T de 20 Wp instalado no telhado.

os ajustes na modelagem da aba vertical,  $q_{pcv}$  fica em função da temperatura na base da aba vertical ( $T_{bv}$ ):

$$q_{pcv} = \frac{(T_p - T_{bv})A_{stv}}{R''_{TC}}. \quad (7)$$

#### IV. METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em duas etapas. Na Primeira Etapa, ocorreu a modelagem do módulo FVF com pontes de calor para verificar a validade do modelo desenvolvido e prever a viabilidade da solução proposta. Essa modelagem é flexível e adaptável para módulos FV de diversas potências e dimensões. Na Segunda Etapa, foi realizada a avaliação do ganho no desempenho térmico-elétrico de um módulo FVF com pontes em relação a um módulo convencional (instalado no telhado). A saída de cada um dos módulos FV, por sua vez, estava conectada a uma carga de 8 W.

Nas duas etapas, dados meteorológicos de irradiância, temperatura ambiente, temperatura da água e velocidade do vento foram colhidos a cada 1 minuto para avaliação das condições ambientais que influenciam no comportamento térmico e, conseqüentemente, no desempenho do módulo FV. Além das informações meteorológicas foram monitorados os valores de temperatura de operação dos módulos FV e tensão e corrente. Essas medições foram feitas com o auxílio de sensores (como o PT100 para aferição das temperaturas) e de um Sistema de Aquisição de Dados (SAD) desenvolvido no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA/UFC) em [40].

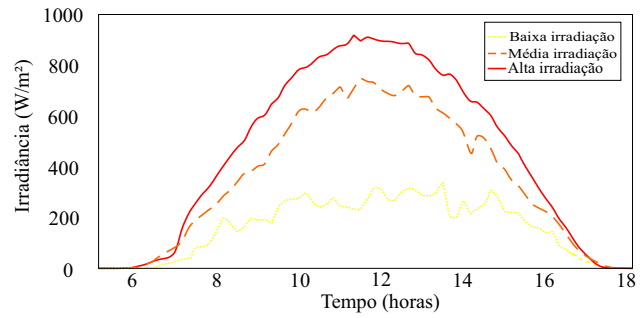


Fig. 6. Curvas de irradiância diária para os dias em análise.

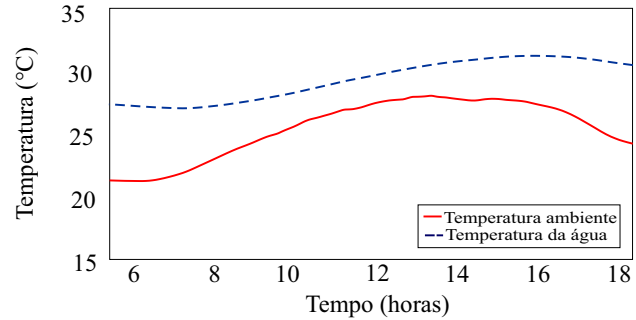


Fig. 7. Temperaturas médias do ambiente e da água para o período considerado.

O período em estudo corresponde de 09/02/2019 a 07/07/2019, no qual um módulo FVF num tanque de 310 L (Fig. 4) e um módulo FV convencional (Fig. 5) foram monitorados. Apenas os dados coletados entre 6:00 e 18:00 horas interessam, pois fora desse intervalo de tempo  $G$  é considerado nulo. Deve-se ressaltar que os meses de fevereiro, março, abril, maio, junho e julho de 2019 foram chuvosos em Fortaleza, Ceará, Brasil, com precipitação mensal de 362, 520, 517, 341, 218 e 79 milímetros, respectivamente [41].

Tanto na Primeira como na Segunda Etapa, os dados obtidos foram classificados segundo a categorização proposta na Tabela II, que propõe uma divisão dos dias de acordo com o nível de irradiância. Essa categorização visa avaliar de forma mais detalhada a representatividade do modelo sob diferentes níveis de irradiância, o que não acontece na literatura. É baseada no cálculo da integral das curvas de irradiância incidente (Fig. 6) pela Regra Trapezoidal da integração numérica. As curvas da Fig. 6 correspondem às medições instantâneas da irradiância solar incidente no plano horizontal.

Para continuar a avaliação dos dados meteorológicos, traça-se o gráfico com as curvas de temperatura média do ambiente

TABELA II  
CLASSIFICAÇÃO E FREQUÊNCIA DOS DIAS DE ACORDO  
COM O NÍVEL DE IRRADIAÇÃO

Classificação da irradiância diária	Faixa de irradiância diária	Frequência dos dias
Baixa irradiância	0 a 2.500 Wh/m <sup>2</sup>	14,4%
Média irradiância	2.501 a 5.000 Wh/m <sup>2</sup>	48,8%
Alta irradiância	5.001 Wh/m <sup>2</sup> ou mais	36,8%
Total		100%

e da água no tanque durante o período em estudo (Fig. 7). Os gráficos das Fig. 6 e 7 e da Seção V são curvas cujos pontos representam a raiz do valor quadrático médio (*root mean square* - RMS) de 10 minutos.

**A. Metodologia da Primeira Etapa**

O objetivo na Primeira Etapa é determinar a adequação da modelagem desenvolvida na Seção III através da implementação em uma planilha eletrônica de cálculo do *software* LibreOffice Calc que é de código aberto e uso livre. O solucionador não-linear (*Differential Evolution and Particle Swarm* - DEPS) permite resolver problemas de otimização no qual o valor ideal de uma célula específica da planilha deve ser calculado com base nas restrições previstas em outras células [42].

As equações representativas do modelo são não-lineares e as incógnitas presentes nessas equações são implícitas, portanto, a solução das equações requer o procedimento numérico iterativo para encontrar o zero da função. Para o procedimento iterativo alcançar uma solução razoável definiu-se um valor de tolerância para o resíduo da ordem de  $10^{-6}$ .

Os parâmetros envolvidos na simulação do módulo FVF foram absorvibilidade, velocidade do vento, coeficiente convectivo, emissividade e temperatura do céu. Os valores assumidos para esses parâmetros estão representados na Tabela III.

**B. Metodologia da Segunda Etapa**

Na Segunda Etapa, comparou-se o efeito do arrefecimento das pontes de calor em um módulo FVF (Fig. 4) em comparação a um módulo convencional (Fig. 5). Outro objetivo dessa Etapa foi avaliar os ganhos no desempenho elétrico do módulo FVF em comparação ao convencional.

A dimensão da ponte de alumínio de abas simétricas de 5 cm com 40% da aba vertical submersa em água levou em consideração a largura do módulo FV e as opções de cantoneiras disponíveis comercialmente a nível local. A distância existente entre a superfície inferior do módulo FVF e o espelho d'água impede o contato direto da água com o módulo FV, o que poderia prejudicar o mesmo a longo prazo.

Após uma análise da sensibilidade do modelo de acordo com a profundidade de imersão, foi possível constatar que se a imersão for de 5 mm a temperatura do módulo FV será 3,4°C acima da temperatura de um módulo com 30 mm de imersão. Para 20 mm de imersão, a temperatura do módulo fica 0,7°C

acima da situação com imersão de 30 mm. Decidiu-se pela imersão de 20 mm da ponte de calor em água.

**V. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A partir dos parâmetros da Tabela III, é analisado o comportamento térmico que o módulo FVF apresenta quando utiliza pontes de calor para realizar seu arrefecimento. Para tal é preciso começar definindo a quantidade de pontes de calor a serem fixadas na parte posterior do módulo FVF para que ocorra redução na temperatura de operação e, conseqüentemente, aumento da eficiência. A Fig. 8 mostra a relação teórica para a eficiência de conversão baseada no modelo de [37].

Para viabilizar as análises, considera-se como referência o módulo FVF de 20 Wp não-aletado com temperatura de operação de 64,0°C e eficiência de 11,3% quando a irradiância é de 1.014 W/m<sup>2</sup>. Conforme demonstra a Fig. 8, quando a quantidade de pontes de calor fixadas aumenta, diminui a temperatura de operação e aumenta a eficiência de conversão FV. Todavia, há um comportamento assintótico tanto da temperatura como da eficiência elétrica. Ademais, a partir de 5 pontes de calor o incremento na eficiência de conversão FV é menor do que 1%. Portanto, a escolha é por 5 pontes de calor fixadas sob o módulo FVF.

A Fig. 7 demonstra que quanto maior a irradiação, maior a temperatura ambiente, com pico de temperatura às 13:00 horas. Após às 15:00 horas, a curva da temperatura ambiente descende. A temperatura da água eleva-se com o aumento da irradiação incidente e após cerca de 15:00 horas começa a reduzir. A inércia térmica da água do tanque é maior do que a inércia do ar ambiente, como pode ser observado ao comparar as duas curvas.

Nas condições de operação mais críticas do período em estudo, o módulo FVF de 20 Wp com pontes de calor conectado a uma carga dissipa para o tanque d'água cerca de 306 kJ de calor durante o período de 1 hora. Extrapolando os cálculos para o módulo operando por 12 horas, haveria uma elevação na temperatura da água de cerca de 2,9°C. Portanto, segundo os cálculos do presente artigo a presença de pontes dissipando calor para um reservatório de água não afetaria significativamente a sua temperatura ao ponto de prejudicar o bioma aquático.

**TABELA III**  
PARÂMETROS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO NO LIBREOFFICE CALC

Parâmetro	Valor
Emissividade da superfície superior	0,95
Emissividade da superfície inferior	0,90
Resistência térmica na junta de contato	$5 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$
Fator de forma	1
Temperatura do céu	292 a 296 K (19°C a 23°C)
Velocidade do vento local	0,5 m/s
Coefficiente convectivo	6,31 a 6,60 W/m <sup>2</sup> K
Absortividade	0,95

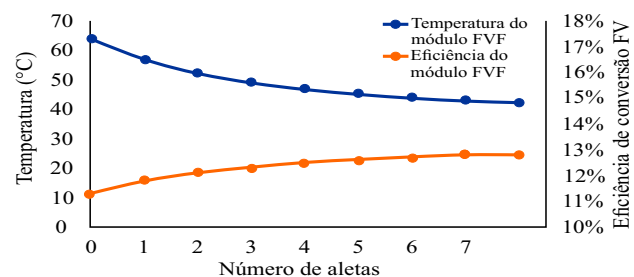


Fig. 8. Temperatura e eficiência do módulo FVF versus número de pontes de calor.

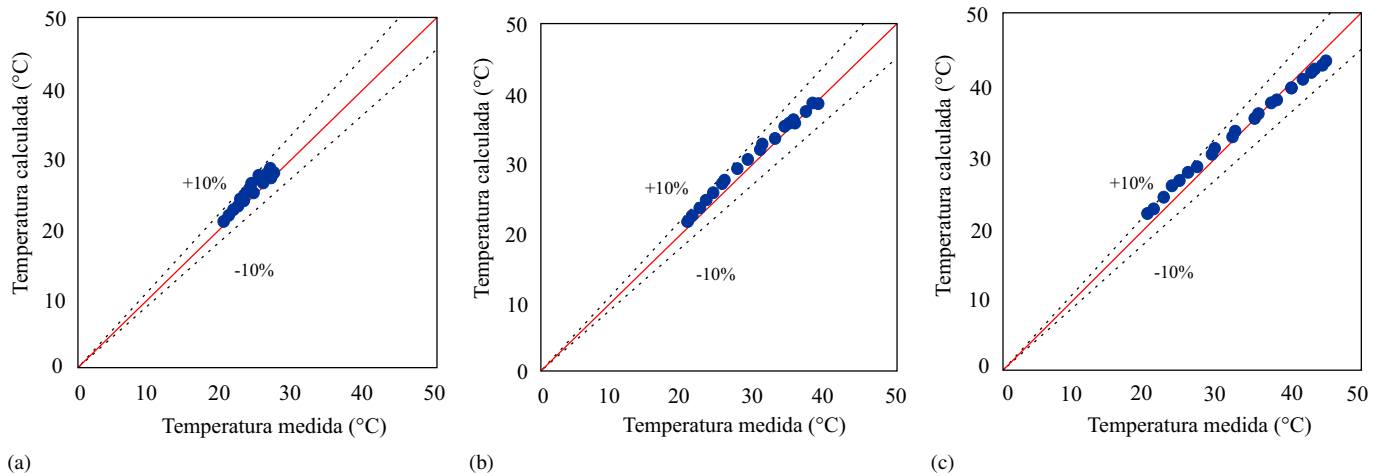


Fig. 9. Comparação entre as temperaturas de operação do módulo medidas e calculadas para dias de (a) baixa, (b) média e (c) alta irradiação diária.

#### A. Validação da Modelagem do Módulo FVF com Pontes de Calor

Os três gráficos da Fig. 9 apresentam a temperatura do módulo FVF calculada pela simulação em função da temperatura medida levando em conta uma margem de tolerância de  $\pm 10\%$ .

A Fig. 9a apresenta o comportamento térmico calculado pela simulação do módulo FVF com pontes de calor para os dias com baixo nível de irradiação segundo uma  $T_{ceu}$  igual a 292 K (19°C). Nenhum ponto encontra-se fora da faixa de tolerância e a média do erro relativo entre as temperaturas medida e calculada é de 6%. A maior diferença ocorre quando a temperatura calculada está 2,2°C acima da medida, às 8:00 horas.

A Fig. 9b apresenta o comportamento térmico calculado pela simulação do módulo FVF com pontes de calor para os dias com médio nível de irradiação segundo uma  $T_{ceu}$  de 296 K (23°C). Nenhum ponto encontra-se fora da faixa de tolerância estipulada, o erro relativo médio entre as temperaturas medida e calculada é de 4%. A maior diferença entre as temperaturas medida e calculada ocorre quando a temperatura calculada está 1,9°C acima da medida, às 18:00 horas.

A Fig. 9c apresenta o comportamento térmico calculado pela simulação do módulo FVF com pontes de calor para os dias com máximo nível de irradiação segundo uma  $T_{ceu}$  igual a 296 K (23°C). Nenhum ponto encontra-se fora da faixa de tolerância e o erro relativo médio entre as temperaturas medida e calculada é de 5%. Por sua vez, a maior diferença entre as temperaturas medida e estimada ocorre quando a temperatura calculada está 2,2°C acima da medida, às 18:00 horas.

A Fig. 10 compara as curvas de temperatura de operação dos módulos FVF com pontes de calor e convencional em teste para diferentes níveis de irradiação diária. Durante cerca de 90% do horário com irradiação incidente a temperatura do módulo FVF esteve abaixo da temperatura do convencional. Nos dias com baixo nível de irradiação diário, a média da diferença máxima entre as temperaturas dos dois módulos é de 2,5°C às 12:00 horas. Quando a irradiação está no nível classificado como médio, o efeito do arrefecimento causa uma

diferença máxima de temperatura de 3,3°C às 11:50 horas. Já nos dias com alta irradiação diária, a maior diferença é de 3,9°C às 13:10 horas. Assim, a efetividade na redução da temperatura de operação pela aplicação de pontes de calor é atestada. Diferentemente dos resultados obtidos por [43] que verificaram um aumento na temperatura de operação tanto no método FVF como no arrefecimento passivo.

#### B. Desempenho Térmico-Elétrico do Módulo FVF com Pontes de Calor

Para avaliar a melhora no desempenho do módulo FVF com pontes de calor em relação ao módulo convencional é apresentado o gráfico da Fig. 11 com a produtividade em Wh/Wp dos módulos de 20 Wp nos dias de baixa, média e alta irradiação diária. Como pode ser observado, a produtividade dos módulos cresce com o aumento do nível de irradiação solar incidente.

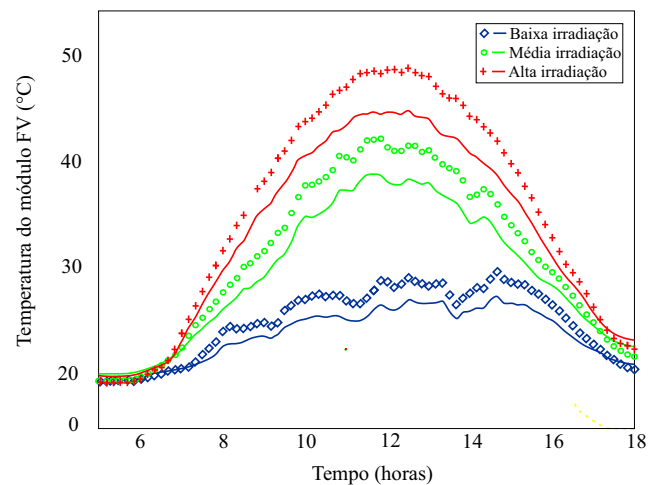


Fig. 10. Temperatura de operação medida do módulo convencional (linhas pontilhadas) versus do módulo FVF com pontes de calor (linhas contínuas) em diferentes níveis de irradiação diária.

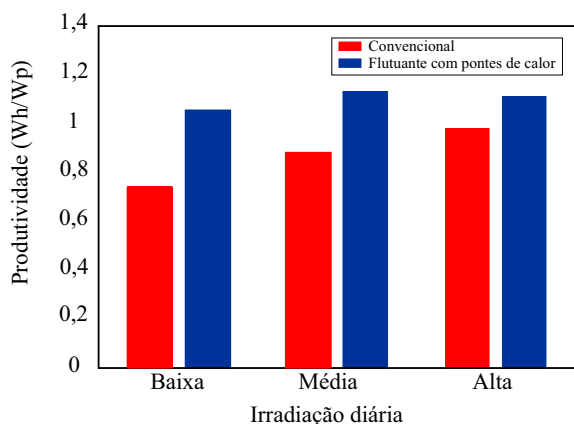


Fig. 11. Produtividade dos módulos FV conectados a uma carga nos dias de baixa, média e alta irradiação diária.

Houve diferença sensível entre a produtividade dos módulos FV. Nos dias com baixo nível de irradiação diário, a produtividade do módulo convencional é de 0,74 Wh/Wp enquanto a do módulo FVF é de 1,05 Wh/Wp, ou seja, há um aumento de 42,1% na produtividade do módulo com pontes em relação ao convencional. Nos dias de média irradiação, a produtividade do módulo convencional é de 0,89 Wh/Wp e do FVF é de 1,13 Wh/Wp, ou seja, há um ganho de 27,4% na produtividade do módulo com pontes em relação ao convencional. Nos dias com alta irradiação, o ganho de produtividade do módulo FVF com pontes de calor em relação ao convencional é de 13,1%. Fica assim atestada a efetividade do uso das pontes de calor no aumento do desempenho elétrico.

Essas diferenças foram, portanto, mais acentuadas para baixa irradiação solar e atribuídas às menores temperaturas de operação – e, conseqüentemente, maiores eficiências de conversão - neste nível de irradiação. Merece atenção também a menor variação da produtividade com o nível de irradiação solar quando se trata do módulo FVF com pontes (+5,7%) em relação ao convencional (+32,4%), sugerindo uma condição de operação mais estável daquele, principalmente em regiões com maior amplitude de irradiação solar ao longo do ano.

## VI. CONCLUSÃO

Uma modelagem para predição da temperatura de um módulo FVF com 5 pontes de calor foi desenvolvida. Independentemente do nível de irradiação solar diário, o modelo para módulo FVF flutuante com pontes não forneceu pontos de temperatura de operação fora da faixa de tolerância estipulada de  $\pm 10\%$ . O erro relativo médio entre as temperaturas medida e calculada é de 6% para nível de irradiação baixo, 4% para o nível médio e 5% para o nível alto. O modelo para módulo FVF com pontes superestimou a maioria dos pontos de temperatura de operação calculados.

A temperatura medida de operação do módulo convencional esteve acima da temperatura do FVF com pontes de calor por cerca de 90% do horário com irradiação incidente. A diferença máxima alcançada entre a temperatura dos dois módulos foi de 2,5°C, 3,3°C e 3,9°C para os níveis baixo, médio e alto de irradiação solar, respectivamente. As maiores diferenças

de temperatura ocorreram no período de maior incidência de irradiação, entre 11:00 e 13:00 horas. O módulo com pontes fixadas conseguiu reduzir sua temperatura de operação em relação ao módulo convencional por conduzir calor da superfície posterior até a água. Como esperado, a produtividade do módulo FVF com pontes de calor foi superior à produtividade do convencional, alcançando até 42% de ganho em relação a este último. Fica assim atestada a efetividade do arrefecimento passivo proposto.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pelas bolsas de estudos de mestrado da primeira e segunda autoras. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa para o terceiro autor. E ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFC.

## REFERÊNCIAS

- [1] L. C. Lima, L. A. Ferreira, and F. H. B. L. Morais, "Performance analysis of a grid connected photovoltaic system in northeastern Brazil," *Energy for Sustainable Development*, vol. 37, pp. 79–85, 2017.
- [2] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics 2019*. Paris, France: IEA, 2019.
- [3] Oil Change International, "Numerous heads of state, ministers, and other prominent figures have spoke out on the need to phase out fossil fuel subsidies. a small sampling is found below..." [priceofoil.org](http://priceofoil.org). [priceofoil.org/fossil-fuel-subsidies/international/key-quotes/](http://priceofoil.org/fossil-fuel-subsidies/international/key-quotes/) (accessed Jul. 28, 2020).
- [4] D. Araujo, N. Batista, P. Carvalho, J. Reges, D. Costa, R. Dias, D. Freitas, S. Lima, K. Ramos, S. Ribeiro, and F. Soares, "Renewable hybrid systems: Characterization and tendencies," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 01, pp. 102–112, 2020.
- [5] H. Villarroel-Gutiérrez, "The Argentine electrical sector and its trends toward renewable energies," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 10, pp. 1625–1636, 2019.
- [6] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. Tina, and C. Ventura, "Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1730–1741, 2018.
- [7] J. Siecker, K. Kusakana, and B. Numbi, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 192–203, 2017.
- [8] P. Benalcázar, J. Lara, and M. Samper, "Distributed Photovoltaic Generation in Ecuador: Economic Analysis and Incentives Mechanisms," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 03, pp. 564–572, 2020.
- [9] S. Preet, "Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 791–807, 2018.
- [10] F. Huide, Z. Xuxin, M. Lei, Z. Tao, W. Qixing, and S. Hongyuan, "A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 140, pp. 1–13, 2017.
- [11] N. Dimri, A. Tiwari, and G. Tiwari, "Thermal modelling of semitransparent photovoltaic thermal (PVT) with thermoelectric cooler (TEC) collector," *Energy Conversion and Management*, vol. 146, pp. 68–77, 2017.
- [12] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, "Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 23–29, 2009.
- [13] J. T. Pinho and M. A. Galdino, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*. (2014). Rio de Janeiro, RJ, Brasil, vol. 1, pp. 47–499.
- [14] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Ed.*, vol. 10. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, doi, 2013.
- [15] V. J. Fesharaki, M. Dehghani, J. J. Fesharaki, and H. Tavasoli, "The effect of temperature on photovoltaic cell efficiency," in *Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation-ETEC*, (Tehran, Iran), pp. 20–21, 2011.
- [16] S. Odeh and M. Behnia, "Improving photovoltaic module efficiency using water cooling," *Heat Transfer Engineering Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 499–505, 2009.

- [17] K. A. Moharram, M. Abd-Elhady, H. Kandil, and H. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013.
- [18] I. Guarracino, A. Mellor, N. J. Ekins-Daukes, and C. N. Markides, "Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 101, pp. 778–795, 2016.
- [19] N. M. Martins da Rocha, L. Lapolli Brighenti, J. César Passos, and D. Cruz Martins, "Photovoltaic Cell Cooling as a Facilitator for MPPT," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 10, pp. 1569–1577, 2019.
- [20] D. Sato and N. Yamada, "Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 151–166, 2019.
- [21] A. M. Ahmed and S. Hassan Danook, "Efficiency improvement for solar cells panels by cooling," in *2018 2nd International Conference for Engineering, Technology and Sciences of Al-Kitab (ICETS)*, pp. 39–42, 2018.
- [22] M. K. Yeşilyurt, M. Nasiri, and A. N. Ozakin, "Techniques for enhancing and maintaining electrical efficiency of photovoltaic systems," *International Journal of New Technology and Research*, vol. 4, no. 4, 2018.
- [23] P. K. Enaganti, S. Nambi, H. K. Behera, P. K. Dwivedi, S. Kundu, M. Imamuddin, A. K. Srivastava, and S. Goel, "Performance analysis of submerged polycrystalline photovoltaic cell in varying water conditions," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 2, pp. 531–538, 2020.
- [24] E. M. Sacramento, *Modelo elétrico-térmico para representar o comportamento de módulos fotovoltaicos flutuantes em água a partir das condições climáticas do semiárido brasileiro*. Ph.D. dissertation, Eng. Dept., Univ. Fed. CE, Fortaleza, CE, Brazil, 2015.
- [25] H. Liu, A. Kumar, and T. Reindl, "The dawn of floating solar — technology, benefits, and challenges," in *Wang C., Lim S., Tay Z. (eds) WCFS2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 41, pp. 373–383, Singapore: Springer Singapore, 2020.
- [26] P. M. Connor, "Performance and prospects of a lightweight water-borne pv concentrator, including virtual storage via hydroelectric-dams," in *ISES Solar World Congress. Renewable Energy Shaping Our Future.*, (South Africa: Johannesburg), 2009.
- [27] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, "Floating photovoltaic power plant: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 815–824, 2016.
- [28] M. Rosa-Clot and G. M. Tina, "Chapter 5 - The floating PV plant," in *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, pp. 89 – 136, Academic Press, 2018.
- [29] D. Mittal, B. K. Saxena, and K. Rao, "Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility at Kota in Rajasthan," in *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 1–7, IEEE, 2017.
- [30] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, *et al.*, "Power generation efficiency and prospects of floating photovoltaic systems," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1136–1142, 2017.
- [31] H. M. Pouran, "From collapsed coal mines to floating solar farms, why China's new power stations matter," *Energy Policy*, vol. 123, pp. 414–420, 2018.
- [32] Y.-K. Choi, "A study on power generation analysis of floating pv system considering environmental impact," *International Journal of Software Engineering and its Applications*, vol. 8, no. 1, pp. 75–84, 2014.
- [33] R. A. Borba and L. H. Novak, "Sistemas fotovoltaicos flutuantes: Aspectos positivos e desafios," in *Anais VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, p. 7, 2018.
- [34] K. Trapani and M. Redón-Santafé, "A review of floating photovoltaic installations: 2007–2013," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 23, no. 4, pp. 524–532, 2015.
- [35] M. A. E. Galdino and M. M. d. A. Olivieri, "Some remarks about the deployment of floating PV systems in Brazil," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 10–19, 2017.
- [36] A. A. R. Alencar Filho, *Avaliação da influência da temperatura na eficiência de módulo fotovoltaico sobre estrutura flutuante*. M.S. thesis, Dept. Mec. Eng., Univ. Fed. CE, Fortaleza, CE, Brazil, 2018.
- [37] H. Mohring, D. Stellbogen, R. Schäffler, *et al.*, "Outdoor performance of polycrystalline thin film pv modules in different european climates," in *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 2098–2101, 2004.
- [38] W. C. L. Kamuyu, J. R. Lim, C. S. Won, and H. K. Ahn, "Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating PVs," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 447, 2018. doi:10.3390/en11020447.
- [39] A. C. Andrade, *Análise e simulação da distribuição de temperaturas em módulos fotovoltaicos*. Ph.D. dissertation, PPG Eng. Mec., Univ. Fed. RS., RS, Brazil, 2008.
- [40] S. C. S. Jucá, R. I. S. Pereira, and P. C. M. Carvalho, "Wifi data acquisition system applied to a photovoltaic powered water pumping plant," *Sensors & Transducers*, vol. 185, no. 2, pp. 113–120, 2015.
- [41] Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, "Gráfico de chuvas dos postos pluviométricos." FUNCEME.br. <http://www.funceme.br/index.php/areas/23-monitoramento/meteorol/C3%B3gico/548-gr%C3%A1fico-de-chuvas-dos-postos-pluviom/C3%A9tricos> (accessed Jul. 20, 2020).
- [42] LibreOffice, "Libreoffice calc. 2018." libreoffice.org <https://pt-br.libreoffice.org/descubra/calc/> (accessed Nov. 19, 2018).
- [43] C. H. B. Aribowo and A. Habibie, "Experimental method for improving efficiency on photovoltaic cell using passive cooling and floating method," in *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, pp. 272–275, 2019.



**Bruna de Oliveira Busson** is graduated in Mechanical Engineering at UnB, Brasília, DF, Brazil (2016). MSc. in Mechanical Engineering at UFC, Fortaleza, CE, Brazil (2019). She is currently pursuing the Ph.D. degree in Mechanical Engineering at UFSC, Florianópolis, SC, Brazil.



**Leticia de Oliveira Santos** Master's student in Mechanical Engineering at UFC, Fortaleza, CE, Brazil. She completed her Physics degree at UFC (2017). She is currently part of the UFC's Laboratory of Alternative Energies (Laboratório de Energias Alternativas - LEA), working with computer modelling of photovoltaic panels.



**Paulo Cesar Marques de Carvalho** is graduated in Electrical Engineering at UFC, Fortaleza, CE, Brazil (1989); MSc. in Electrical Engineering at UFPA, Campina Grande, PB, Brazil (1992); Ph.D. in Electrical Engineering at University of Paderborn, Paderborn, Germany (1997). Currently, he is full professor at Electrical Engineering Department at UFC and receives a CNPq research productivity grant.



**Clodoaldo de Oliveira Carvalho Filho** is graduated in Mechanical Engineering at UFC, Fortaleza, Ceará, Brazil (1995); MSc. in Mechanical Engineering at UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brazil (1998); Ph.D. in Petroleum Sciences and Engineering at UNICAMP, Campinas, SP, Brazil (2004). At present, he is professor at Mechanical Engineering Department at UFC.