

Photovoltaic Cell Cooling as a Facilitator for MPPT

N. Rocha, L. Brighenti, J. Passos, and D. Martins, *Senior Member, IEEE*

Abstract—The photovoltaic (PV) conversion efficiency is affected by PV cell temperature and solar irradiance modifications as they originate the vertical and horizontal displacement of the system Maximum Power Point (MPP), respectively. Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms are responsible for guarantee MPP operation, which can be complex depending on the climatic alterations. However, if the PV cell temperature is kept constant climatic changes will only generate vertical displacement of the MPP. Therefore, in this paper, a cooling system for PV cells is presented and its influence as a facilitator of the MPPT both experimentally and theoretically is studied. The results show that the proposed cooling system allows a steadier PV cell temperature, which leads to a steadier MPP voltage while simultaneously producing thermal energy. Due to the smaller amplitude and a slower variation of the PV system MPP voltage, provided by the cooling system, a simplification of the MPPT is possible. Simpler MPPT algorithms can be used offering a similar efficiency to the more advanced MPPT methods while creating an economically viable cogeneration system.

Index Terms—Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic, Photovoltaic cell cooling, Photovoltaic cell temperature, Solar energy.

I. INTRODUÇÃO

A quantidade de energia solar convertida em eletricidade por uma célula Fotovoltaica (FV, em inglês PV) é afetada por variações dos valores de irradiância solar e temperatura. Cada módulo FV apresenta uma curva de geração corrente (I) - tensão (V) diferente, consoante à temperatura em que se encontram as células FVs e a irradiância solar. Ou seja, para cada uma das diferentes combinações de valores de irradiância e de temperatura irá corresponder uma curva de geração distinta, como se pode observar nas Figs. 1 (a) e (b).

Independentemente da configuração que apresenta a curva de geração do módulo FV, em todas elas existe um Ponto de Máxima Potência (PMP, em inglês MPP). Nesse ponto, a potência produzida pelo módulo FV é máxima, para os valores de temperatura e irradiância solar verificados naquele instante.

Devido a essa particularidade, e de modo a garantir que a potência de saída do sistema FV corresponda à potência máxima disponível naquele instante, é necessário garantir que o ponto de operação do mesmo seja equivalente ao PMP. Para tal, são empregados algoritmos de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (SPMP, em inglês MPPT).

A localização do PMP de um sistema FV varia horizontal e verticalmente em um diagrama corrente x tensão (I-V), consoante às alterações verificadas na temperatura das células FVs e nos índices de irradiância solar, respectivamente. O aumento da temperatura da célula FV origina uma aproximação das bandas de energia do silício, diminuindo assim a energia da banda proibida. Dessa forma, a energia necessária para fazer com que os elétrons saltem para a banda de condução será também menor, originando uma diminuição na tensão de saída do módulo FV, conforme se pode observar na Fig. 1 (a).

Por sua vez, o aumento da irradiância solar origina um aumento do número de fótons, o que proporciona um maior número de elétrons livres, resultando no aumento da corrente elétrica, conforme é possível observar na Fig. 1 (b).

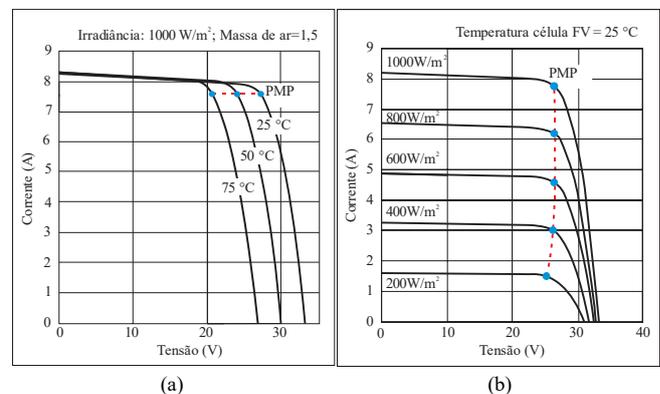


Fig. 1. Comportamento da curva de geração I-V do módulo fotovoltaico KC200GT com variação da temperatura da célula fotovoltaica (a) com variação da irradiância solar (b) [3].

Pode-se intuir pelo comportamento ilustrado nas Figs. 1 (a) e Fig. 1 (b) que o grau de complexidade do algoritmo de SPMP depende da velocidade das oscilações climáticas, excetuando-se os casos de sombreamento. Como tal, pode ser necessário recorrer a técnicas de SPMP digitais que realizam um maior número de rotinas, utilizam mais variáveis de entrada, empregam um maior número de sensores ou sensores mais caros, levando a um aumento de custos para garantir operação no PMP [1], [2].

Porém, se a temperatura das células FVs for mantida constante, a deslocação do PMP ocorre apenas verticalmente

N. Rocha, Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, nuno.ahcor@gmail.com

L. Brighenti, Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, lucasbrighenti@gmail.com.

J. Passos - Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, julio.passos@lepten.ufsc.br.

D. Martins, Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, denizar.martins@gmail.com.

contribuindo consideravelmente para a simplificação do algoritmo de SPMP. Nessa condição, a operação no PMP é garantida por meio do grampeamento da tensão de saída do módulo FV, independentemente dos níveis de irradiância verificados.

Face ao exposto, no presente artigo é apresentado um sistema de resfriamento que permite restringir o aumento da temperatura das células FVs, por meio da transformação do módulo FV em Fotovoltaico/Térmico (FV/T), visando uma tensão do PMP o mais constante possível.

A aplicação de uma técnica de resfriamento das células FVs origina uma menor amplitude da tensão do PMP, o que permite simplificar a implementação e execução do algoritmo de SPMP, possibilitando uma redução no grau de complexidade da eletrônica de potência envolvida nesse processo, excetuando-se os casos de sobreamento.

Simultaneamente, ao efetuar o resfriamento das células FVs o calor removido origina a produção de energia térmica. Dessa forma, estamos perante a um sistema de cogeração que permite simplificar o processo de SPMP, sendo essa a principal contribuição do presente artigo.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a validar as premissas teóricas, montou-se uma bancada experimental e efetuaram-se testes experimentais. Esta seção pretende esclarecer ao leitor sobre os diversos métodos e materiais utilizados.

A. Bancada Experimental

A bancada experimental é composta por dois módulos FV KC200GT, sendo que a um desses módulos foi acoplado um trocador de calor na superfície traseira. No interior do trocador circula água, estabelecendo-se assim um sistema de resfriamento para as células FVs, originando um módulo FV/T. A bancada experimental é apresentada na Fig. 2 e o seu esquemático geral na Fig. 3.



Fig. 2. Bancada experimental.

As variáveis elétricas do sistema, tensão e corrente dos módulos, e temperatura e vazão da água responsável pelo resfriamento das células FVs, foram todas registradas por meio de um *data logger* Agilent 34972A (tempo de amostragem de

10 segundos). Por sua vez, os dados climáticos foram registrados por meio de uma estação meteorológica LUFFT WS501-UMB, utilizando um tempo de amostragem de 5 segundos, sendo fornecido um valor médio para cada 10 minutos.

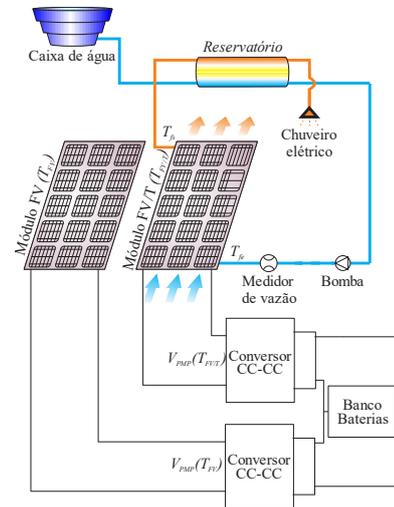


Fig. 3. Esquemático geral da bancada experimental.

As variáveis climáticas monitoradas são a irradiância solar, a temperatura ambiente e a velocidade do vento. A velocidade do vento foi monitorada devido à sua influência na temperatura da célula FV, resultante do efeito no coeficiente de transferência de calor por convecção, entre a cobertura de vidro e o ar ambiente [4]. A incerteza associada aos sistemas de medição utilizados é apresentada na Tabela I.

TABELA I
INCERTEZA DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Parâmetro	Incerteza
Tensão	$\pm 1\%$
Corrente	$\pm 2\%$
Irradiância solar	$\pm 1\%$
Temperatura ambiente	$\pm 0,2\text{ }^\circ\text{C}$
Velocidade do vento	$\pm 3\%$
Medidor vazão	$\pm 1\%$
Sonda temperatura NTC	$\pm 1\%$

1) Sistema de Resfriamento

O objetivo do sistema de resfriamento é restringir o aumento da temperatura das células FVs visando um valor de temperatura o mais constante possível. Uma bomba de água (GP-100C/CB – 55 W) é responsável por impor o fluxo de água através do trocador de calor, usando a energia elétrica da rede de alimentação comercial. A água, responsável pelo resfriamento das células FVs, ao deixar o reservatório absorve o calor desperdiçado por estas e retorna ao mesmo, permitindo assim o armazenamento de calor e a recirculação de água. Consequentemente, não há renovação de água. Portanto, o sistema opera como um sistema fechado. A bomba de água opera em modo contínuo.

Como referido anteriormente, um dos módulos KC200GT foi adaptado para módulo FV/T. Para tal, foi acoplado em sua

parte traseira um trocador de calor, desenvolvido pela empresa Soluz Energia [5]. Nas Figs. 4 (a) e (b) é possível observar a superfície traseira do módulo FV e o trocador de calor, respectivamente. A fixação do trocador de calor na superfície traseira do módulo FV – ilustrada na Figs. 5 (a) e (b) – foi efetuada utilizando barras de alumínio colocadas entre a moldura do módulo e o trocador de calor. As barras pressionam o trocador contra a parte traseira do módulo, garantindo o contato necessário à transferência de calor das células FVs para a água que circula no interior do trocador.

Para melhor entendimento, na Fig. 5 (b) destacam-se: a moldura de alumínio do módulo, com as linhas tracejadas verde; o trocador de calor, em azul; os suportes de fixação da superfície traseira do trocador de calor; com as linhas tracejadas vermelhas.

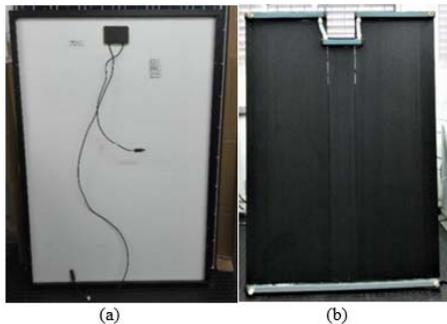


Fig. 4. Traseira do módulo FV (a) e trocador de calor (b).

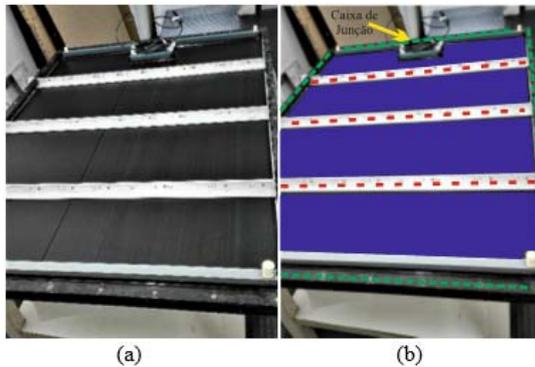


Fig. 5. Fixação do trocador de calor (a) e componentes do módulo FV/T (b).

2) Sistema Elétrico

Cada um dos módulos FVs é conectado ao seu próprio conversor CC-CC tipo Boost; estes, por sua vez, estão ligados a um banco composto por oito baterias de 12 V, associadas de forma a totalizar 48 V. Na Tabela II estão relacionados os parâmetros dos conversores CC-CC Boost utilizados, os quais diferem apenas ligeiramente pelo valor de indutância dos indutores. Portanto, não é esperada diferença significativa de desempenho entre os dois conversores.

O algoritmo de SPMP utilizado foi o temperatura (Temp) tensão de circuito aberto (Vca). No método de SPMP Temp-Vca, a temperatura da célula FV (TFV) é inferida exclusivamente a partir da Vca do módulo FV, considerando (1) [6]. A variável Vca^{STC} representa a Vca do módulo FV e TFV^{STC}, a temperatura da

célula FV, ambos em Condições Padrão de Teste (STC, do inglês Standard Test Conditions). Por sua vez μca é o coeficiente de temperatura da tensão em circuito aberto. Sendo assim, entende-se que a temperatura das células FVs depende exclusivamente dos parâmetros do módulo FV. Conhecendo a temperatura da célula FV e usando (2) [6]–[8], pode-se determinar a tensão do PMP (VPMP).

TABELA II
PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DOS CONVERSORES CC-CC BOOST

Conversor	Boost FV/T	Boost FV
Parâmetro		Valor
Indutor (L)	311,3 μH	309,6 μH
Capacitor de entrada (Ci)		220 μF
Capacitor de saída (Co)		2200 μF
Frequência de comutação		50 kHz
Algoritmo SPMP		Temp - Vca

Uma vez determinada a tensão do PMP, usando a tensão de saída (Vcarga), medida no sensor, a razão cíclica (D) do conversor, é calculada usando a equação de ganho correspondente. O algoritmo de SPMP empregado pode ser considerado mais simples do aqueles frequentemente utilizados, uma vez que requer o uso de apenas dois sensores de tensão [6], um para medir a tensão de saída do módulo FV (Vmódulo) e outro para medir a tensão de carga (Vcarga). Além disso, apesar de ser um algoritmo SPMP baseado em temperatura, descarta o uso de sensores de temperatura, podendo a implementação prática dos sensores de tensão ser realizada por meio de um divisor de tensão [6].

O fluxograma do algoritmo SPMP Temp - Vca é apresentado na Fig. 6. Primeiro a D do conversor é ajustada para zero (Interrupt = 1), de modo que a variação da temperatura da célula FV (ΔTFV) possa ser inferida por meio da aquisição de Vca e dos parâmetros do módulo FV. No final da interrupção, a D que garante a operação do módulo FV no PMP (DPMP) é calculada [6]. Os parâmetros do módulo FV KC200GT são apresentados na Tabela III.

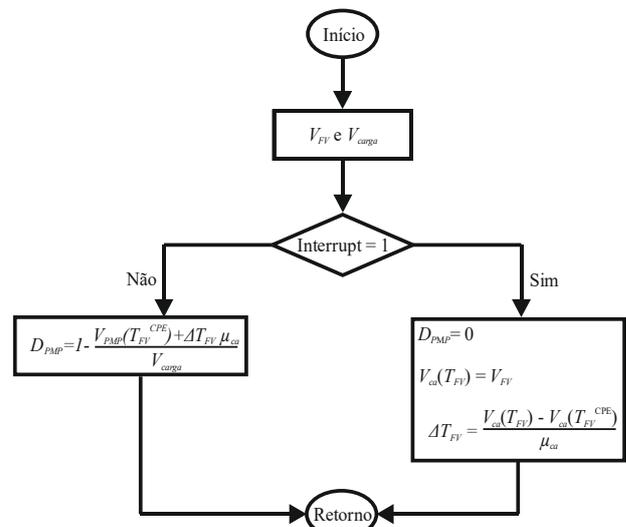


Fig. 6. Fluxograma do algoritmo SPMP Temp-Vca.

TABELA III
PARÂMETROS DO MÓDULO FV Kc200GT

Parâmetro	Valor
Fabricante	Kyocera
Potência máxima	200 W
μ_{ca}	-0,123 V/°C
T_{FV}^{STC}	25 °C
$V_{ca}(T_{FV}^{STC})$	32,9 V
$V_{PMP}(T_{FV}^{STC})$	26,3 V

Para inferir a temperatura das células FVs é necessário assegurar que o sistema permaneça em circuito aberto por um tempo mínimo, necessário para que o capacitor de entrada, colocado em paralelo com o módulo FV, atinja a carga total [6]. No caso em estudo, a D do conversor é mantida em zero por um período de 0,375 segundos. Como as mudanças de temperatura não são tão dinâmicas como as da irradiância solar, as interrupções para determinar o PMP foram definidas para ocorrerem com 30 segundos de intervalo.

As variáveis elétricas registradas são a V_{ca} do módulo FV, para cálculo da temperatura da célula, e a tensão do PMP, obtidas por meio de (1) e (2), respectivamente.

$$T_{FV} = \frac{V_{ca} - V_{ca}^{STC}}{\mu_{ca}} + T_{FV}^{STC} \quad (1)$$

$$V_{PMP}(T_{FV}) = V_{PMP}(T_{FV}^{STC}) + (T_{FV} - T_{FV}^{STC})\mu_{ca} \quad (2)$$

III. COLETA DE DADOS EXPERIMENTAIS

No dia 22/09/2017 foi realizado um experimento com os módulos FV/T e PV, a fim de analisar e comparar seus desempenhos. Esse experimento realizou-se entre as 10 h e as 14 h por ser esse o período de insolação disponível no local do teste, devido aos problemas de sombreamento causados por edifícios próximos.

A. Condições Climáticas

Na Fig.7 apresentam-se as curvas de irradiância solar (Irrad) e temperatura ambiente (T_a) verificadas no dia de realização do experimento, e na Fig. 8, a curva referente à velocidade do vento.

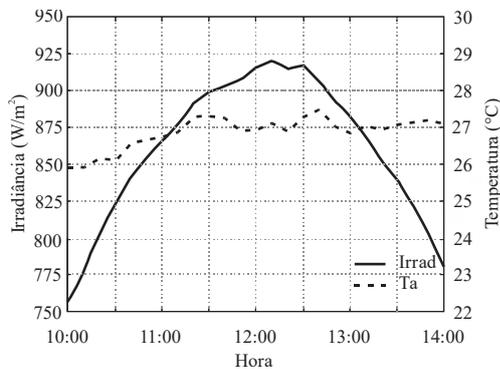


Fig. 7. Irradiância solar e temperatura ambiente no dia 22/09/2017.

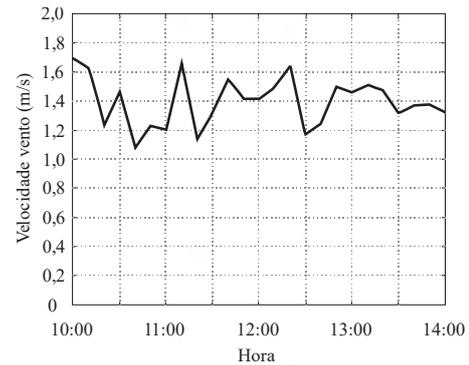


Fig. 8. Variação da velocidade do vento no dia 22/09/2017.

B. Evolução da Temperatura das Células FVs

Na Fig. 9 apresentam-se as curvas da Temperatura (T), observadas nas células FVs para os sistemas FV e FV/T, assim como a velocidade do vento (V_v), no dia de realização do experimento.

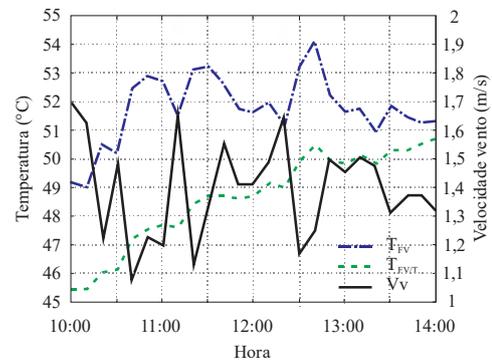


Fig. 9. Temperatura das células FVs e velocidade do vento no dia 22/09/2017.

C. Temperatura e Tensão do Ponto de Máxima Potência

Na Fig. 10 apresentam-se os valores da temperatura das células FVs e da tensão do PMP para o dia do experimento. É notório que a utilização do sistema de resfriamento permite uma temperatura inferior, originando um valor de tensão do PMP superior. Além disso, as variações da tensão do PMP não são tão acentuadas no caso do módulo FV/T. Isso leva a crer que o sistema de resfriamento pode ajudar a simplificar o algoritmo SPMP, permitindo o uso de uma dinâmica mais lenta, principalmente em regiões nas quais se verifiquem ventos fortes e intermitentes.

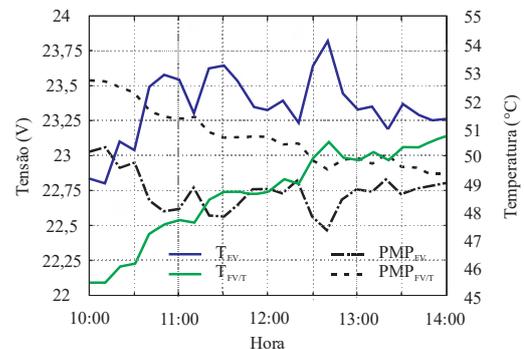


Fig. 10. Tensão do PMP e temperatura das células FVs para os módulos FV e FV/T no dia 22/09/2017.

D. Potência Elétrica Gerada

Na fig. 11 são apresentadas as curvas da Potência Elétrica (Pe) e Potência Elétrica Global (PeG) de saída para o sistema FV e sistema FV/T. Devido à menor temperatura operacional das células FVs, a potência elétrica fornecida pelo sistema FV/T é maior. No entanto, como o sistema FV/T utiliza uma bomba de água para efetuar a circulação da água, efetuando o balanço energético verifica-se que o uso da bomba de água origina um déficit na PeG de saída e, como tal, o sistema FV/T sai prejudicado do ponto de vista elétrico com a aplicação do sistema de resfriamento.

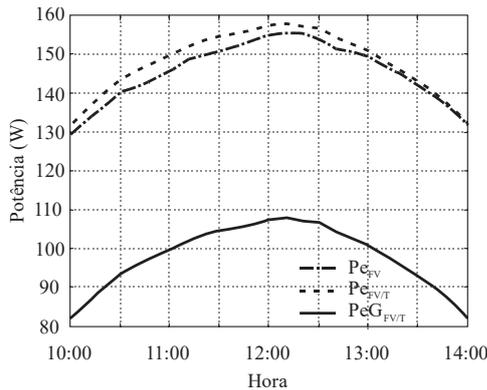


Fig. 11. Potência elétrica dos sistemas FV e FV/T no dia 22/09/2017.

E. Potência Térmica Gerada

Como mencionado anteriormente, um módulo FV/T produz energia elétrica e térmica simultaneamente. Na Fig. 12 são apresentadas as curvas da evolução da produção de potência térmica pelo sistema FV/T ($Q_{FV/T}$) e da temperatura da água (T_{ag}) no interior do reservatório, fluido responsável por resfriar das células FVs.

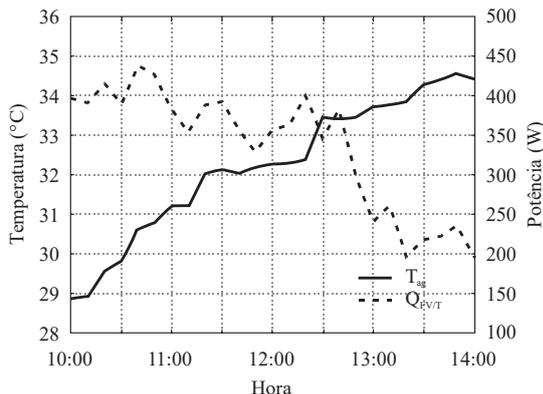


Fig. 12. Potência térmica do sistema FV/T e temperatura da água de resfriamento no dia 22/09/2017.

A potência térmica transferida do módulo FV/T para a água circulante ($Q_{FV/T}$) foi obtida através de (3) onde \dot{m} é a vazão mássica, Cp o calor específico da água, T_{fe} e T_{fs} é a temperatura de entrada e saída do fluido, respetivamente.

$$Q_{FV/T} = \dot{m} \times Cp \times (T_{fs} - T_{fe}) \tag{3}$$

Perante os resultados obtidos entende-se que à medida que a energia térmica é coletada a temperatura da água sobe, confirmando a produção de energia térmica. É notório que a produção de energia térmica vai diminuindo ao longo do dia. Isso deve-se ao aumento da temperatura da água e à diminuição dos níveis de irradiação solar.

F. Potência Global Gerada

A Fig. 13 apresenta as curvas de geração referentes à Potência Global (PG) dos sistemas FV e FV/T. Para o cálculo da PG sistema FV/T, o consumo de energia da bomba de água foi considerado e retirado da potência produzida.

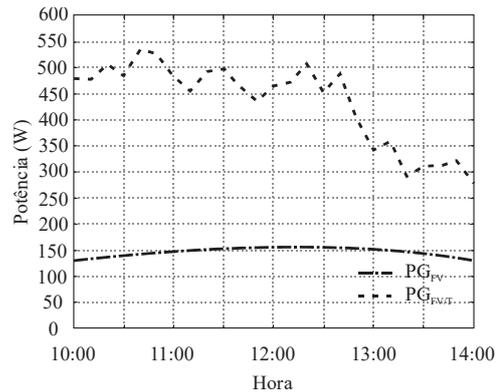


Fig. 13. Potência global dos sistemas FV e FV/T no dia 22/09/2017.

Observando os resultados referentes à PG dos sistemas FV e FV/T é manifesto que, apesar do consumo da bomba de água, o sistema FV/T fornece uma PG maior quando comparado ao sistema FV. Ou seja, o sistema FV/T é vantajoso caso haja a necessidade de produção de energia térmica localmente. Se a energia térmica for aplicada para reduzir o consumo de energia elétrica, por exemplo, de um chuveiro elétrico ou caldeira, a mesma pode ser contabilizada como um ganho de energia elétrica, verificando-se dessa forma uma melhoria no desempenho elétrico.

G. Energia e Economia

Na Fig. 14 é ilustrada a curva da energia produzida (E) e a correspondente Economia (Ec) para o sistema FV/T e FV, considerando a PG.

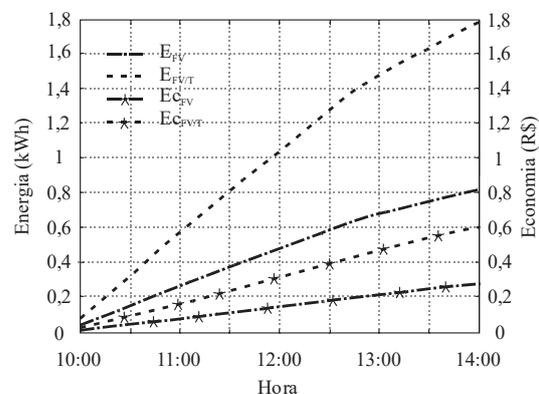


Fig. 14. Energia produzida pelos sistemas FV e FV/T, e economia no dia 22/09/2017.

A E_c foi calculada considerando o valor de R\$ 0,4598500 kWh, valor sem impostos, da resolução homologatória nº 2.286, de 15 de agosto de 2017, conforme informado pela Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC) para o consumidor residencial normal para a cidade de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. No cálculo da E_c considerou-se que toda a energia produzida foi consumida. Por exemplo, a energia térmica seria usada para reduzir a carga de um ou chuveiro elétrico, frequentemente usado no Brasil.

Verifica-se que o sistema FV/T possui uma produção energética superior à do módulo FV, conseqüentemente originando uma maior economia. Contudo, na análise da economia devem ser considerados os custos inerentes ao sistema de resfriamento o que deve analisado a longo prazo, por exemplo para um cenário de 20 anos de operação.

IV. MODELO MATEMÁTICO DE SISTEMAS FV/T

Assim como no módulo FV tradicional, também o comportamento do módulo FV/T é influenciado por mudanças de temperatura das células FVs e irradiância solar. Como tal, uma análise de desempenho do sistema pode ser realizada conhecendo as informações climáticas locais. O modelo térmico do módulo FV fornece dados sobre a temperatura das células FVs para as condições de operação, e o modelo elétrico, o PMP do mesmo.

A. Modelo Térmico de um Módulo FV/T

O modelo térmico de um módulo FV/T, apresentado em seguida, foi desenvolvido por Tiwari e Sodha [4] e permite determinar a temperatura das células FVs [9]. O circuito térmico do módulo FV/T está representado na Fig. 15.

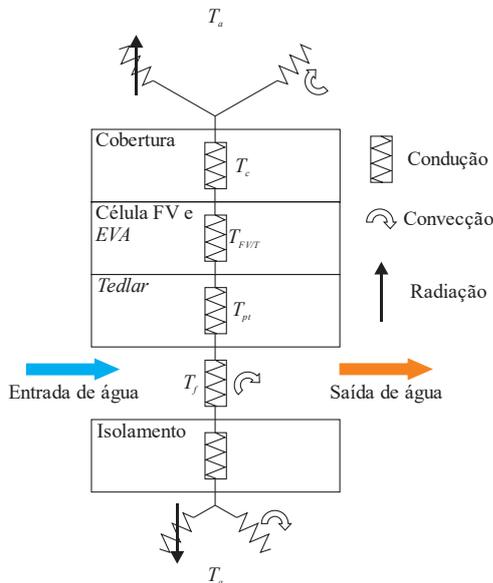


Fig. 15. Circuito térmico equivalente de um módulo FV/T a água [4].

A partir da Fig. 15 e escrevendo o balanço energético para os diversos integrantes do circuito presente na mesma, obtêm-

se as equações que permitem determinar a temperatura das células FVs do módulo FV/T.

O modelo utilizado possui as seguintes considerações [4], [9]:

- a transmissividade do EVA é de aproximadamente 100%;
- não existe estratificação de temperatura no reservatório;
- a resistência térmica dos vários componentes é independente da temperatura e radiação solar;
- as capacidades térmicas dos diversos materiais são desprezadas;
- o sistema é considerado quase estático;
- são desprezadas as perdas nas tubulações;
- a transferência de calor é considerada unidimensional;
- é considerada a temperatura média e uniforme para cada camada do módulo FV/T;
- o fluxo de água incidente no Tedlar é uniforme.

Por meio de (4) obtém-se a temperatura das células FVs do módulo FV/T ($T_{FV/T}$), na qual: $\tau\alpha$ representa o produto efetivo da transmissibilidade (τ) pela absorvidade (α); G irradiância solar; T_a é a temperatura ambiente; U_c é o coeficiente global de transferência de calor da célula FV para o ambiente, através da cobertura; U_T é o coeficiente global de transferência de calor da cobertura para o Tedlar, através da célula FV; T_{pi} é a temperatura da superfície traseira do módulo FV/T (Tedlar).

$$T_{FV/T} = \frac{(\alpha\tau) \cdot G(t) + U_c T_a + U_T T_{pi}}{U_c + U_T} \quad (4)$$

O valor de ($\tau\alpha$) é obtido por (5), em que τ_c corresponde à transmissibilidade da cobertura; α_{FV} e α_T correspondem à absorvidade da célula FV e do Tedlar, respectivamente; β_{FV} é o fator de preenchimento do módulo FV; e $\eta_e(T_{FV})$ é o rendimento elétrico para a temperatura da célula FV (T_{FV}).

$$(\alpha\tau) = \tau_c \{ \alpha_{FV} \beta_{FV} + \alpha_T (1 - \beta_{FV}) - \eta_e(T_{FV}) \beta_{FV} \} \quad (5)$$

O rendimento elétrico é calculado por meio de (6), na qual β representa o coeficiente de temperatura da célula FV.

$$\eta_e(T_{FV}) = \eta_e^{STC} \left[1 - \beta (T_{FV} - T^{STC}) \right] \quad (6)$$

O U_c depende de vários fatores, tais como espessura (L_C), condutividade térmica (K_C) da cobertura e velocidade do vento incidente. O valor de U_C é obtido pela equação (7) [4].

$$U_C = \left[\frac{L_C}{K_C} + \frac{1}{h_0} \right]^{-1} \quad (7)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção da cobertura para o ambiente (h_0) é obtido pela equação(8), na qual V representa a velocidade do vento.

$$h_0 = 5,7 + 3,8V \quad (8)$$

Por meio de (9) é determinada a temperatura da superfície traseira (*Tedlar*) do módulo FV/T. Na equação, FP_1 é o fator de penalização devido à presença de célula FV, *Tedlar* e EVA; U_cT representa o coeficiente global de transferência de calor da cobertura para o *Tedlar*, através da célula FV; h_f é o coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície traseira para o fluido; T_f é a temperatura média do fluido que circula no interior do trocador.

$$T_{pt} = \frac{FP_1(\alpha\tau) \cdot G(t) + U_cT T_a + h_f T_f}{U_cT + h_f} \quad (9)$$

A T_f é calculada utilizando (10) [4], [9], na qual FP_2 é o fator de penalização devido à interface entre o *Tedlar* e o fluido de trabalho; F' é o rendimento do trocador; \dot{m} é a vazão mássica; C_p é o calor específico da água; U_L é o coeficiente global de perda de calor do módulo FV/T para o ambiente; T_{fe} é a temperatura de entrada do fluido.

$$T_f = \left(T_a + \frac{FP_1 \cdot FP_2 \cdot (\alpha\tau) \cdot G(t)}{U_L} \right) \cdot \left(1 - \frac{1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot A_{FV/T} \cdot U_L}{\dot{m} C_p}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot A_{FV/T} \cdot U_L}{\dot{m} C_p}\right)} \right) + T_{fe} \left(\frac{1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot A_{FV/T} \cdot U_L}{\dot{m} C_p}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-F' \cdot A_{FV/T} \cdot U_L}{\dot{m} C_p}\right)} \right) \quad (10)$$

B. Modelo Elétrico de um Módulo FV

O circuito elétrico equivalente de um módulo FV é o mesmo de um módulo FV/T, o qual se encontra ilustrado na Fig. 16.

O comportamento da corrente de saída um módulo FV/T, em função de sua tensão de saída, é obtido por (11) [6]. Na equação, R_s , R_p e R_{sh} representam a resistência série, paralelo e shunt, respectivamente, do módulo FV; A , E_g , I , I_{ph} , I_0 , k , q , β_{cc} e V são o fator de idealidade do diodo, a energia de banda proibida, a corrente do módulo, a corrente fotogerada, a constante de Boltzman, a carga elementar do elétron, o coeficiente de temperatura de curto circuito e a tensão do módulo, nessa ordem.

Uma vez conhecidos os parâmetros do módulo, é possível desenvolver a partir de (11) um modelo que permite obter as curvas características I-V e potência (P) – tensão (V) para as diferentes combinações de temperatura e irradiância solar [6] e o respectivo PMP.

Face ao exposto, entende-se que utilizando (4) a (11), conhecendo a vazão mássica de água fornecida pela bomba, os

dados climáticos relativos à irradiância solar, temperatura ambiente, velocidade do vento, e os diversos parâmetros do módulo FV/T é possível reproduzir o desempenho do mesmo.

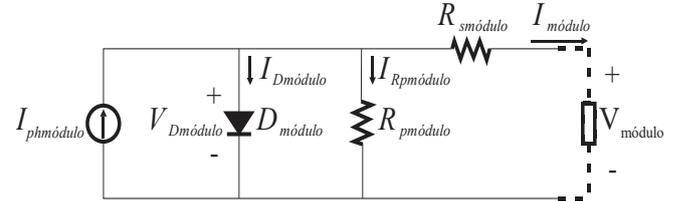


Fig. 16. Circuito elétrico equivalente de um módulo FV [6].

$$I = \frac{G}{G^{REF}} \cdot I_{ph}^{REF} + \beta_{cc} (T_{FV} - T_{FV}^{REF}) - \frac{R_s \cdot I + V_{FV}}{R_p} - \left(I_0^{REF} \left(\frac{T_{FV}}{T^{REF}} \right)^3 \cdot e^{\frac{q \cdot E_g}{A \cdot k} \left(\frac{1}{T^{REF}} - \frac{1}{T_{FV}} \right)} \cdot \left(e^{\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A \cdot k \cdot (T_{FV})} - 1} \right) \right) \quad (11)$$

C. Validação do Modelo Numérico

Para efetuar a validação dos modelos, foi determinado o coeficiente de correlação (r) e o erro quadrático médio (e), obtido por (12) [9], entre os valores experimentais (X_{exp}) e os obtidos pelo modelo numérico (X_{num}) para cada leitura (i).

$$e = \sqrt{\frac{\sum [100 \times (X_{num,i} - X_{exp,i}) / X_{num,i}]^2}{n}} \quad (12)$$

No processo de validação do modelo térmico foram utilizados os parâmetros presentes na Tabela IV, sendo que o valor de U_L e U_T foram determinados por meio de processos iterativos, recorrendo às equações que definem o modelo térmico do módulo FV/T e conhecendo os valores experimentais. O valor de h_f foi retirado de [10], uma vez que o trocador de calor usado apresenta características semelhantes. Os restantes valores foram retirados de [4].

O modelo numérico elétrico do módulo FV foi previamente validado em [11], nas condições de referência (REF): 36,1 °C e irradiância 929 W/m². Os parâmetros utilizados são indicados na Tabela V.

1) Resultados da validação dos modelos térmico e elétrico

Na Fig. 17 são apresentadas as curvas experimentais relativas à temperatura das células FVs e tensão do PMP, obtidas durante a realização do experimento (exp) no dia 22/09/2017, e as obtidas por meio dos modelos numéricos (num) para as condições climáticas registradas nesse dia.

Verificou-se uma grande concordância entre os valores obtidos pelo modelo numérico e os verificados experimentalmente. A correlação entre os valores foi superior a 94,46% e o erro quadrático médio inferior a 4,26%. Como tal, entende-se que o modelo numérico pode ser utilizado para reproduzir o desempenho do módulo FV/T estudado, sendo considerados como validados os modelos numéricos.

TABELA IV
PARÂMETROS TÉRMICOS DO MÓDULO FV/T

Parâmetro	Valor
$A_{FV/T}$	1,31 m ²
C_p	4179 J/kg K
F'	0,895
FP_1	0,8772
FP_2	0,9925
h_f	1077 W/m ² K
h_o	5,7 + 3,8V W/m ² K
L_C	0,003 m
K_C	1 W/m K
U_{cT}	8,1028 W/m ² K
U_L	15 W/m ² K
U_T	25 W/m ² K
α_{FV}	0,775
α_T	0,50
β	0,00426 1/K
β_{FV}	0,90
η^{STC}	0,1538
τ_c	0,95

TABELA V
PARÂMETROS DO MÓDULO FV KC200GT

Parâmetro	Valor
A	1,3065
E_g	1,21 eV
I_0^{REF}	3,47941 x 10 ⁻⁷ A
$I_{ph}^{REF, módulo}$	7,51309 A
k	1,38064852 x 10 ⁻²³
$R_{pmódulo}$	701,8172 Ω
$R_{smódulo}$	0,28881 Ω
G^{REF}	929 W/m ²
T_{FV}^{REF}	36,1 °C
β_{cc}	3,18 x 10 ⁻³

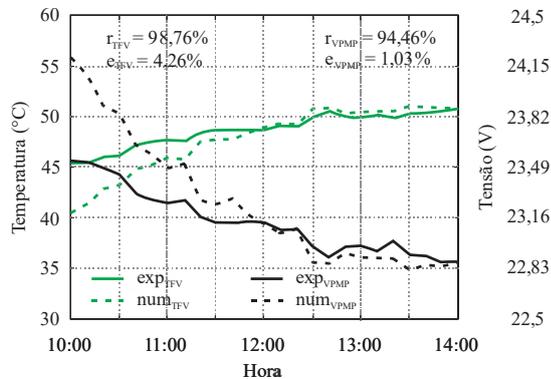


Fig. 17. Temperatura das células FVs e tensão do PMP no dia 22/09/2017, experimental e numérico.

V. ANÁLISE DO DESEMPENHO ANUAL FV E FV/T

O comportamento de um módulo FV é afetado, principalmente, por mudanças de temperatura das células FVs e níveis de irradiância solar. Como tal, uma análise de desempenho anual do mesmo pode ser realizada a partir do conhecimento das informações climáticas locais. O modelo térmico fornece dados sobre a temperatura das células FVs para as condições de operação e o modelo elétrico, a potência elétrica gerada pelo mesmo.

Utilizando os dados referentes às condições climáticas típicas para a cidade de Florianópolis, SC, nomeadamente irradiância solar, temperatura ambiente e velocidade do vento, e conhecendo os parâmetros térmicos dos módulos, foi

determinada a temperatura média das células FVs. Uma vez conhecida essa temperatura foi determinada a curva I-V por meio do modelo elétrico e encontrado o PMP.

Os dados utilizados relativos à irradiância solar foram obtidos a partir do programa RadiaSol 2, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e dizem respeito à radiação direta inclinada considerando uma inclinação de 41° (recomendado pelo programa) e um azimute de 0°. Os dados relativos à temperatura ambiente foram os obtidos consultando o Typical Meteorological Year (TMY) adquiridos pela Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) e para a velocidade do vento foram utilizados dados Test Reference Year (TRY) disponibilizados pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (Labeec) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A. Energia Produzida Anualmente

A energia global produzida pelos sistemas FV e FV/T ao longo de um ano é apresentada na Fig. 18. Essa energia corresponde ao total de energia térmica e elétrica produzida, retirando o consumo da bomba. Observando a Fig. 18 é clara a vantagem do sistema FV/T em relação ao FV.

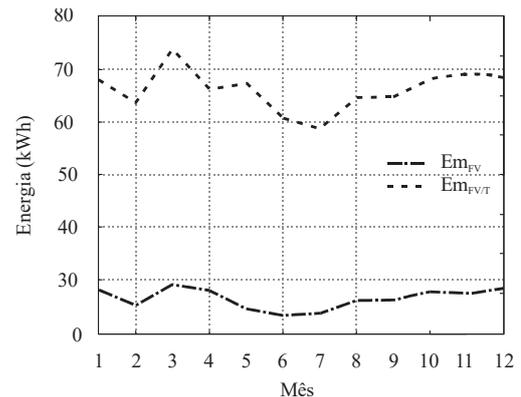


Fig. 18. Energia produzida mensalmente pelo sistema FV e sistema FV/T.

B. Análise Econômica dos Sistemas FV e FV/T

Na realização da análise econômica foi considerada a energia produzida durante 20 anos, o investimento inicial no sistema FV/T (aproximadamente R\$ 6300) e os seus custos de operação e manutenção (O&M) anuais (1,25 % do custo total do investimento inicial do sistema) tendo como base [12]. O sistema FV foi considerado como sendo isento de manutenção.

Como o módulo FV/T resulta da adaptação de um módulo FV tradicional, foi considerado que o custo do sistema FV/T engloba apenas os componentes do sistema de resfriamento e que o sistema FV não terá custo inicial, uma vez que é comum aos dois sistemas. Para ambos os sistemas foi admitido que toda a energia produzida foi consumida.

Na Fig. 19 é apresentada a energia produzida ao longo de 20 anos (E_a) e fluxo de caixa (F_c) proveniente do investimento nos sistemas FV E FV/T analisados. Foi considerada a tarifa definida pela resolução homologatória nº 2.286, de 15 de agosto de 2017 da CELESC. Foi considerada uma taxa de atualização de 8,73%, correspondente à média da evolução do efeito médio

tarifário para o consumidor. Observando a Fig. 19 verifica-se que o sistema FV/T apresenta uma produção energética global claramente superior ao sistema FV o que apesar do investimento inicial resulta num ligeiro superávit.

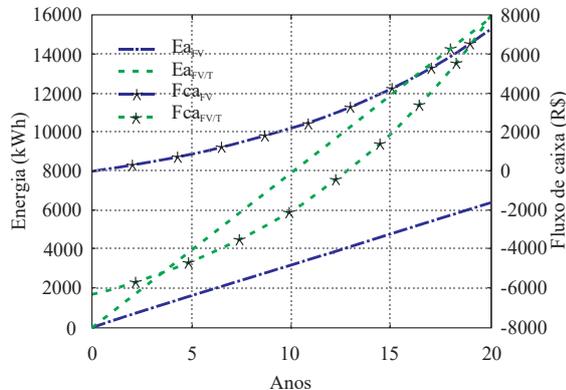


Fig. 19. Energia produzida e retorno financeiro dos sistemas analisados.

VI. CONCLUSÃO

O presente artigo estudou o desempenho de um sistema de resfriamento de células FVs como facilitador do algoritmo de SPMP. Por meio de resultados experimentais, verificou-se que a utilização de tal sistema permite uma temperatura mais constante, levando a uma tensão do PMP com menos oscilações. Além de diminuir a temperatura das células FVs, o sistema de resfriamento faz com que elas fiquem menos vulneráveis às mudanças repentinas da velocidade do vento, característica desejável em locais nos quais ocorre essa situação. No entanto, no final do dia, a massa de água atua como um entrave ao resfriamento natural das células, podendo ser prejudicial para o rendimento do sistema FV.

Verificou-se também, que a energia térmica proveniente do resfriamento das células FVs permite o aumento da produção energética global e que apesar do investimento inicial, o sistema FV/T é economicamente viável apresentando a vantagem de proporcionar cogeração, uma vez que permite a produção de energia térmica e elétrica.

Face aos resultados obtidos, entende-se que a utilização de um sistema de resfriamento das células FVs possibilita a redução do grau de complexidade da eletrônica de potência envolvida no processo de SPMP, devido à menor amplitude da tensão do PMP, permitindo a aplicação de métodos mais simples, excetuando-se os casos de sombreamento, simultaneamente criando um sistema de cogeração economicamente viável, sendo essa a principal contribuição do presente artigo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPq e à FINEP pelo apoio financeiro que possibilitou a realização deste artigo.

REFERÊNCIAS

[1] M. A. M. Caporal, J. R. Magdaleno, I. C. Vega, and R. M. Caporal, "Improved Grid-Photovoltaic System Based on Variable-Step MPPT,

Predictive Control, and Active/Reactive Control," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 11, Nov-2017.
 [2] O. Ezinwanne, F. Zhongwen, and L. Zhijun, "Energy Performance and Cost Comparison of MPPT Techniques for Photovoltaics and other Applications," *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 297–303, Feb. 2017.
 [3] Kyocera, "KC200GT." [Online]. Available: <https://www.kyocerasolar.com>. [Accessed: 22-Feb-2018].
 [4] A. Tiwari and M. S. Sodha, "Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation," *Solar Energy*, vol. 80, no. 7, pp. 751–759, Jul. 2006.
 [5] Soluz Energia, "Painel Solar Híbrido." [Online]. Available: <https://www.soluzenergia.com/>. [Accessed: 27-Aug-2018].
 [6] D. L. Suarez Solano, "Sistema de supervisão e controle de geração solar fotovoltaica para aplicação em microrredes inteligentes," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil.
 [7] R. F. Coelho, F. M. Concer, and D. C. Martins, "A MPPT approach based on temperature measurements applied in PV systems," in *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, 2010, pp. 1–6.
 [8] M. A. G. de Brito, L. P. Sampaio, G. A. e Melo, and C. A. Canesin, "Contribuição ao Estudo dos Principais Algoritmos de Extração da Máxima Potência dos Painéis Fotovoltaicos," *Eletrônica de Potência-SOBRAEP*, vol. 17, no. 3, pp. 592–600, Aug. 2012.
 [9] H. Bahaidarah, A. Subhan, P. Gandhidasan, and S. Rehman, "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions," *Energy*, vol. 59, pp. 445–453, Setembro 2013.
 [10] V. H. B. Longen, "Caracterização térmica de sistema Solar híbrido: Fotovoltaico e térmico," Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2017.
 [11] G. C. Knabben, "Micro Inversor Fotovoltaico Não Isolado de Dois Estágios," Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2017.
 [12] M. S. Buker, B. Mempouo, and S. B. Riffat, "Performance evaluation and techno-economic analysis of a novel building integrated PV/T roof collector: An experimental validation," *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 164–175, Jun. 2014.

N. Rocha Possui graduação em Engenharia Mecânica (2010) e Mestrado em Energias Sustentáveis (2012) ambos pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto, e doutorado pela Universidade Federal de Santa Catarina (2018). As suas áreas de interesse são fontes de energia renováveis e sustentáveis, com ênfase na eficiência energética.

L. Brighenti Possui graduação e mestrado pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2011 e 2014). Atualmente é aluno de doutorado na Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolvendo as atividades no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Áreas de interesse: fontes renováveis de energia, microrredes, redes inteligentes e acoplamento magnético.

J. Passos Engenheiro mecânico pela Escola Politécnica da UFRJ-Universidade Federal do Rio de Janeiro (1980), mestre em engenharia mecânica pela COPPE-UFRJ (1984) e doutor pela Universidade Paris VI (Pierre et Marie Curie) (1989). É pesquisador 1-D do CNPq, professor titular no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. e membro titular do Conselho Curador da Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU).

D. Martins Possui graduação em Licenciatura com ênfase em Eletricidade (1978), graduação em Engenharia Elétrica (1978), mestrado em Engenharia Elétrica (1981), todos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e doutorado em Engenharia Elétrica pelo Institut National Polytechnique de Toulouse, França (1986). Atualmente é Supervisor do INEP (Instituto de Eletrônica de Potência), professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC e membro das Sociedades: SOBRAEP, SBA e IEEE.