

# DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

**Georgia Andrade Tomaszewski** (UERGS) - g\_atomaszewski@hotmail.com

**Fernanda Haeberle** (UNISINOS) - fernandahaeberle@gmail.com

**João Batista Dias** (UNISINOS) - joaobd@unisinobr

## **Resumo:**

*A utilização de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e com conexão à rede elétrica vem crescendo em todo o mundo e um dos atributos que fomenta tal crescimento é a facilidade de inserção dos componentes desses sistemas no ambiente construído. Além disso, o crescente uso da energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica possibilita a flexibilização da matriz energética e a descentralização da geração de energia. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um protótipo de um sistema fotovoltaico conectado à rede com microinversor, que possa ser incorporado às edificações por meio de uma instalação simples. Para analisar o desempenho do sistema em condições reais de operação, o protótipo foi instalado em uma estrutura para testes em frente ao Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo. A produção de energia do sistema foi simulada para o período de um ano no programa RADIASOL a partir dos dados da estação meteorológica da UNISINOS para diferentes ângulos de inclinação do gerador fotovoltaico. O protótipo foi analisado nas condições reais de operação na inclinação de maior geração de energia elétrica simulada, sendo comparados os resultados medidos e calculados da geração de energia elétrica de maio a outubro de 2019. A maior geração de energia obtida com os dados simulados foi para o protótipo posicionado em 46° considerando as características e limitações da instalação. Durante o tempo de operação em que o protótipo foi analisado em condições reais de operação, a maior média diária de energia elétrica gerada foi obtida no mês de agosto sendo o valor medido de 833 Wh e o valor calculado de 959 Wh*

**Palavras-chave:** BIPV, Sistema fotovoltaico, Análise de desempenho, Microinversor.

**Área temática:** Arquitetura e Energia Solar

**Subárea temática:** Aspectos arquitetônicos do uso de instalações fotovoltaicas

# DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

**Georgia Andrade Tomaszewski** – g\_atomaszewski@hotmail.com

**Fernanda Haerberle** – fernandahaerberle@gmail.com

**João Batista Dias** – joaobd@unisinios.br

Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica

**Resumo.** A utilização de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e com conexão à rede elétrica vem crescendo em todo o mundo e um dos atributos que fomenta tal crescimento é a facilidade de inserção dos componentes desses sistemas no ambiente construído. Além disso, o crescente uso da energia solar fotovoltaica para geração de energia elétrica possibilita a flexibilização da matriz energética e a descentralização da geração de energia. Diante disso, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um protótipo de um sistema fotovoltaico conectado à rede com microinversor, que possa ser incorporado às edificações por meio de uma instalação simples. Para analisar o desempenho do sistema em condições reais de operação, o protótipo foi instalado em uma estrutura para testes em frente ao Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), em São Leopoldo, Rio Grande do Sul, com um desvio do ângulo azimute de 10° para leste. A produção de energia do sistema foi simulada para o período de um ano no programa RADIASOL a partir dos dados da estação meteorológica da UNISINOS para diferentes ângulos de inclinação do gerador fotovoltaico. O protótipo foi analisado nas condições reais de operação na inclinação de maior geração de energia elétrica simulada, sendo comparados os resultados medidos e calculados da geração de energia elétrica de maio a outubro de 2019. A maior geração de energia obtida com os dados simulados foi para o protótipo posicionado em 46°, em relação à horizontal, considerando as características e limitações da instalação. Durante o tempo de operação em que o protótipo foi analisado em condições reais de operação, a maior média diária de energia elétrica gerada foi obtida no mês de agosto sendo o valor medido de 833 Wh e o valor calculado de 959 Wh.

**Palavras-chave:** BIPV, Sistema fotovoltaico, Análise de desempenho, Microinversor.

## 1. INTRODUÇÃO

Em decorrência das mudanças climáticas, da escassez de matérias primas energéticas, do crescente aumento da demanda por consumo de energia e do compromisso para com as gerações futuras, o fomento às fontes de energias alternativas e renováveis vem sendo pautado cada dia mais em todo o mundo como um dos pilares para o desenvolvimento sustentável. O Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) (2019), disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente hídrica que responde por 66,6% da oferta interna. A geração de energia proveniente das hidrelétricas está sujeita à variabilidade dos ciclos de chuva, causando oscilações nos preços de energia de acordo com a disponibilidade da fonte primária. Como fonte de energia alternativa, a energia solar fotovoltaica possibilita a flexibilização da matriz energética além de descentralizar a geração de energia.

Grandes vantagens são atreladas a utilização de sistemas fotovoltaicos como, ser proveniente de uma fonte primária gratuita e disponível o ano todo, ser de grande durabilidade e de baixo custo de manutenção. Um dos atributos que fomenta o crescimento da utilização dos módulos fotovoltaicos para geração de energia é a fácil inserção dos mesmos no ambiente construído. A integração de sistemas fotovoltaicos em edificações possibilita a substituição de materiais de revestimento padrões, tornando o custo inicial do sistema compensatório devido a redução dos custos na parte civil. (Peng, Huang e Wu, 2011).

A quantidade de radiação que atinge a superfície terrestre não é constante, podendo ser influenciada por condições climáticas gerais. A radiação solar global é a soma das parcelas de radiação direta e da radiação difusa que incidem sobre uma superfície. A radiação direta é a radiação recebida do Sol sem ter sofrido interferências atmosféricas, já a radiação difusa é a parcela da radiação solar que é espalhada ou refletida por componentes atmosféricos. O albedo, radiação refletida pelas superfícies terrestres, é considerado parte da radiação difusa. (Duffie e Beckman, 2013).

A irradiância é definida como a potência radiante por unidade de área que incide sobre uma superfície e é um parâmetro importante em projetos de sistemas fotovoltaicos. O modelo de Perez estima a quantidade de radiação em superfícies arbitrariamente inclinadas, tendo como dados de entrada valores de irradiância na horizontal, que podem ser calculados ou medidos. (Perez *et al.*, 1990).

O presente trabalho visa desenvolver e analisar o desempenho de um protótipo de um sistema fotovoltaico para produção de energia em conexão com a rede elétrica, que possa ser incorporado às edificações através de uma instalação simples, em comparação com as instalações em telhados ou em solo. O projeto procura, além de atender as necessidades

de geração de energia elétrica, manter as especificações arquitetônicas das edificações e, através da utilização de componentes que facilitam sua instalação, diminuir os custos desses sistemas, impulsionando e disseminando o uso da energia fotovoltaica incorporada ao ambiente construído.

## 2. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede são constituídos de gerador fotovoltaico, inversor e rede elétrica. A potência elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico em corrente contínua (c.c.) é convertida em corrente alternada (c.a.) pelo inversor. Essa potência em corrente c.a. é entregue à rede elétrica da edificação e, em momentos onde a geração é maior que o consumo de energia, o excedente é entregue à rede da concessionária.

Os módulos fotovoltaicos são responsáveis pela captação e conversão da energia solar em energia elétrica em corrente c.c. e são fabricados com células de silício cristalino (monocristalino ou multicristalino), silício amorfo ou outros semicondutores. Eles são compostos por um conjunto de células fotovoltaicas associadas em série e distribuídas na área do módulo. O conjunto de módulos fotovoltaicos interligados, mecânica e eletricamente, é definido como arranjo fotovoltaico. A célula fotovoltaica é a parte sensível à irradiância solar e é a responsável pela produção de eletricidade no módulo.

O inversor é o responsável pela conversão da corrente c.c. gerada pelo módulo fotovoltaico em corrente c.a., em condições de tensão e frequência apropriadas para utilização pela rede elétrica. Esse equipamento possui em sua configuração circuitos responsáveis pelo seguimento do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico, circuitos de segurança para desconexão em caso de avarias, de sincronismo com a rede elétrica, dentre outros.

Os sistemas fotovoltaicos são avaliados quanto ao seu desempenho baseando-se nos índices de mérito. Tais índices são indicadores universais que permitem realizar comparações entre sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Eles relacionam de uma forma geral todo o desempenho energético de um sistema e suas perdas. Martínez-Moreno, Lorenzo, Moretón, (2011), Almeida e Zilles (2012) e Dias, Schenkel e Dias (2014) utilizaram estes índices em seus estudos como forma de avaliar o comportamento energético de sistemas instalados.

Diferentes estudos referentes a sistemas fotovoltaicos integrados às edificações de alguma forma contribuíram com ideias para a formulação do escopo do presente trabalho. Peng, Huang e Wu (2011) estudaram problemas sobre sistemas BIPV (*Building Integrated Photovoltaics*) em projetos arquitetônicos na China, apresentando uma alternativa para essas instalações, discutindo quando desenvolver esse tipo de sistema e se é necessário que os componentes do sistema fotovoltaico durem tanto quanto as edificações. O problema que guia o artigo e o componente desenvolvido pelos autores vem ao encontro do objetivo do protótipo desenvolvido no presente trabalho, ou seja, um sistema de fácil instalação, manutenção e reposição, sem fugir das exigências arquitetônicas das edificações.

Outra linha de análise quando se refere aos sistemas integrados é referente aos seus componentes. Ikkurti e Saha (2015) estudaram a utilização de microinversores em sistemas fotovoltaicos integrados a edificações. Concluíram que as vantagens da utilização desses equipamentos estão relacionadas à sua simplicidade, confiabilidade e segurança. Ainda, segundo os autores, a utilização de microinversores pode reduzir significativamente os custos com instalação e manutenção. Já Yang e Lin (2007) discutiram sobre a influência das diferentes inclinações e das características climáticas locais na geração dos sistemas integrados a edificações, desenvolvendo um modelo matemático para calcular a inclinação e o ângulo azimute ideal para a aplicação desses sistemas na cidade de Hong Kong.

## 3. METODOLOGIA

Nesta etapa são apresentados os materiais e métodos utilizados, elucidando o processo de desenvolvimento do protótipo, a construção do sistema e a metodologia empregada para a caracterização do seu desempenho.

### 3.1 Protótipo

O protótipo desenvolvido como objeto de estudo, Fig. 1, consiste em um sistema fotovoltaico para ser incorporado facilmente em edificações e conexão à rede. Ele é constituído de um módulo fotovoltaico e um microinversor acoplados a estrutura de uma janela de modelo maxiar. O sistema está sendo testado em condições reais de operação em frente ao Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica, localizado no campus da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) em São Leopoldo (Brasil). O local de instalação foi definido considerando que a incidência de sombreamento existente no local corresponderia, de certa forma, a existente em ambientes urbanos para os quais o protótipo foi idealizado.

Na idealização do protótipo buscou-se equilibrar as necessidades arquitetônicas das edificações com as premissas técnicas para alcançar geração satisfatória. O modelo de janela maxiar é utilizado com o intuito de possibilitar que o próprio usuário altere o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico para assim otimizar a geração de energia em diferentes épocas do ano e locais de instalação. A estrutura da janela é composta de alumínio branco e possui além do gerador fotovoltaico, aberturas de vidro deslizante. Optou-se pela colocação de vidros deslizantes com abertura lateral para facilitar ou impedir a entrada ou saída de calor na edificação. O vidro deslizante utilizado ainda realiza a proteção do ambiente interno contra intempéries, possibilitando usufruir da geração do sistema na inclinação desejada mesmo com a janela fechada. O microinversor está integrado à parte superior da estrutura, protegido das intempéries e em local de fácil

manutenção, sendo utilizado devido a necessidade de o produto final ser de fácil instalação, além de que as limitações dimensionais de uma janela maxiar possibilitam a utilização de apenas um módulo fotovoltaico. O sensor de radiação, instalado na parte inferior do módulo, é utilizado para a realização das medições de irradiância no local da instalação e na mesma inclinação do gerador, porém não faz parte do sistema.



Figura 1 - Protótipo de um sistema fotovoltaico conectado à rede

É utilizado um módulo fotovoltaico com potência nominal de 265 W<sub>p</sub>, na condição padrão (STC), com tecnologia *dual glass*. O modelo é revestido por camadas de vidro tanto na superfície frontal - onde o vidro de revestimento possui tecnologia antirreflexo - quanto na superfície traseira e é composto por 60 células de silício multicristalino associadas em série. Para a escolha do módulo foi crucial o equilíbrio entre os valores comerciais do produto e suas características técnicas, respeitando os limites de operação de microinversores. O módulo com tecnologia *dual glass* não possui moldura em alumínio, o que facilita sua incorporação na estrutura da janela.

Após definir o gerador adequado às delimitações da estrutura, buscou-se o microinversor mais adequado para as especificações técnicas do gerador fotovoltaico. Para isso, foi utilizado como parâmetro o cálculo do Fator de Dimensionamento do Inversor (*FDI*), Eq. (1), que relaciona a potência de saída nominal no microinversor ( $P_{inv}$ ), de 250 W, com a potência do módulo fotovoltaico na STC ( $P_{FV,STC}$ ), resultando em um *FDI* de aproximadamente 0,94. Tal fator indica que a capacidade do inversor corresponde a 94% da potência máxima do módulo fotovoltaico.

$$FDI = \frac{P_{inv}}{P_{FV,STC}} \quad (1)$$

O protótipo foi construído inicialmente para operar em uma rede elétrica monofásica. Para medir a corrente elétrica injetada na rede é utilizado um *shunt* de 60 mV em 1 A. Desta forma, utiliza-se a Eq. (2) para a obtenção da corrente injetada na rede  $I_{shunt}$  em (A), a partir da medição da tensão no *shunt*  $V_{shunt}$  em (V).

$$I_{shunt} = 16,67V_{shunt} \quad (2)$$

O diagrama simplificado do sistema elétrico e de aquisição de dados está demonstrado na Fig. 2. Para o monitoramento do sistema são utilizados seis canais do multímetro Agilent 34970A. O multímetro mede ininterruptamente a temperatura do módulo fotovoltaico ( $T_m$ ), em (°C); a irradiância ( $G$ ), em (W/m<sup>2</sup>), na mesma inclinação de operação do gerador; a tensão da rede ( $V_{rede}$ ); e a tensão do *shunt* ( $V_{shunt}$ ), ambas em (V). É necessária a utilização de sensores apenas para as medições de irradiância e temperatura do módulo, as outras grandezas são medidas diretamente pelo multímetro. O software *Agilent Bencklink Data Logger* é responsável por processar e armazenar os dados em arquivos com formato CSV (Comma-Separated Values). Os dados são coletados pelo software de minuto a minuto e utilizados posteriormente para as análises.

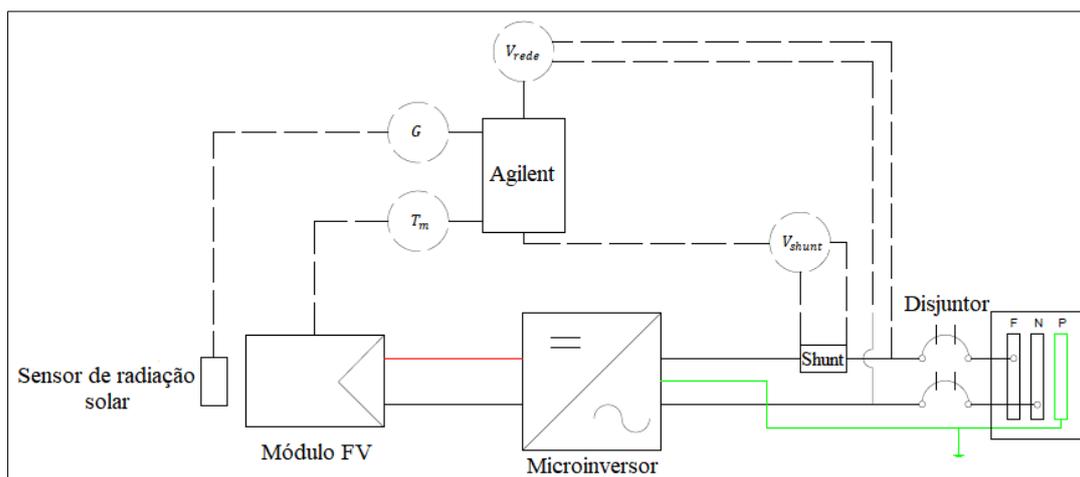


Figura 2 - Diagrama simplificado do sistema elétrico e de aquisição de dados

### 3.2 Simulação

Para avaliar o comportamento do protótipo em algumas possíveis inclinações dentro de suas limitações construtivas, variação de inclinação do plano vertical do protótipo de  $46^\circ$  até  $90^\circ$ , foram realizadas simulações de geração de energia com dados do ano de 2018 (energia elétrica gerada pelo módulo e energia elétrica entregue à rede) para os ângulos de inclinação de  $46^\circ$ ,  $57^\circ$ ,  $68^\circ$ ,  $79^\circ$  e  $90^\circ$  em relação ao plano horizontal. A Tab. 1 apresenta as principais equações utilizadas para a caracterização do sistema.

Tabela 1 - Equacionamento utilizado para caracterização do sistema.

$T_m = T_a + ((G/G_{NOCT})(T_{NOCT} - T_{STC}))$	Temperatura do módulo	(3)
$P_{CC} = P_{FV,STC}(G/G_{STC})(1 + \gamma_{mp} \times (T_m - T_{STC}))$	Potência elétrica contínua	(4)
$P_{CA} = P_{CC}\eta_{inv}$	Potência elétrica alternada	(5)
$E_{CC} = (1/\tau) \int P_{CC} dt$	Energia elétrica contínua	(6)
$E_{CA} = (1/\tau) \int P_{CA} dt$	Energia elétrica alternada	(7)

Utilizou-se o software RADIASOL, que aplica internamente modelos matemáticos para realizar o cálculo da intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas. Dentro do programa é possível determinar alguns critérios para a simulação, como o modelo matemático que se deseja utilizar - neste caso foi utilizado o modelo de Perez, o ângulo de inclinação da superfície e o desvio do ângulo azimute - que no caso da instalação do gerador é de  $10^\circ$  para o leste. O programa permite ainda inserir os dados da radiação solar em uma superfície horizontal na localidade onde se deseja analisar o comportamento da variável, caso não esteja disponível no software.

Os dados utilizados durante a simulação, tanto de irradiância solar global horizontal, quanto de temperatura ambiente ( $T_a$ ), são oriundos da estação meteorológica da Unisinos e correspondem ao ano de 2018. É importante ressaltar que as simulações foram realizadas com dados de radiação que não possuíam a interferência de sombreamentos, com o objetivo apenas de definir o posicionamento do protótipo para a realização da análise experimental. Através dos valores de irradiância ( $G$ ) para cada ângulo simulado, considerando a temperatura ( $T_a$ ) média diária para os mesmos horários que a irradiância é disponibilizada pelo software, e ainda, sendo  $G_{NOCT}$  igual a  $800 \text{ W/m}^2$  e  $T_{NOCT}$  igual a  $45^\circ \text{C}$ , por meio da Eq. (3), foi determinada a temperatura do gerador fotovoltaico ( $T_m$ ) em ( $^\circ \text{C}$ ).

Considerando a temperatura da célula como sendo a temperatura média do módulo fotovoltaico, utilizou-se a Eq. (4) para o cálculo da potência em corrente c.c. ( $P_{CC}$ ) gerada pelo módulo nas condições simuladas. Foram empregados a potência do módulo ( $P_{FV,STC}$ ) e o coeficiente térmico da potência ( $\gamma_{mp}$ ) na STC, obtidos na folha de dados do respectivo módulo fotovoltaico. Com os valores de  $P_{CC}$  encontrados, e através da Eq. (5), considerando eficiência do inversor ( $\eta_{inv}$ ) igual a 0,965 - valor disponibilizado pelo fabricante - calculou-se a potência estimada em corrente c.a. ( $P_{CA}$ ) entregue à rede pelo microinversor utilizado. A partir da inclinação que resultou em melhor geração de energia elétrica em corrente contínua ( $E_{CC}$ ) e, conseqüentemente em corrente alternada ( $E_{CA}$ ), considerando as limitações de abertura da janela, foi definido o ângulo para a realização dos ensaios experimentais.

### 3.3 Ensaios experimentais

A partir da simulação realizada foram obtidos os resultados de geração de energia do protótipo para as diferentes inclinações estudadas. Com base nos resultados obtidos, optou-se por realizar a análise de desempenho do sistema na inclinação de maior geração de energia elétrica simulada. Para o cálculo dos índices de mérito que avaliam o desempenho

do sistema, é necessário o monitoramento da temperatura do módulo fotovoltaico e da irradiância incidente no local. Para isto, foram utilizados sensores de temperatura e radiação. Além disso, foram obtidas as incertezas das medições de potência elétrica entregue à rede. A potência c.a calculada carrega a incerteza propagada das medições de temperatura e irradiância, dados que são utilizados inicialmente para obtenção da potência c.c e posterior cálculo da potência c.a.

**Calibração de sensores.** Para o monitoramento da temperatura do módulo fotovoltaico foram utilizados três termistores NTC (*Negative temperature coefficient*), os quais encontram-se instalados em posição diagonal na superfície posterior do módulo. Na literatura, são propostos diversos modelos matemáticos que descrevem a relação entre a resistência elétrica e a temperatura em sensores semicondutores. Uma expressão que descreve tal relação, muito utilizada na prática, é representada na Eq. (8), onde  $R$  é a resistência elétrica do NTC, em ( $\Omega$ ), a uma dada temperatura  $T$  em (K),  $R_0$  é a resistência elétrica na temperatura de referência  $T_0$  de 298 K, sendo igual a 1000  $\Omega$ . O coeficiente de variação da resistência com a temperatura  $\lambda$  depende do material do NTC e possui valor entre ( $2000 < \lambda < 6000$ ). (Liu *et al.*, 2018).

$$R = R_0 e^{-\lambda \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (8)$$

Antes de utilizar os sensores para medição de temperatura foi necessário realizar o procedimento de calibração. Para determinar o valor experimental de  $\lambda$ , para cada sensor, os termistores foram colocados em uma unidade de banho térmico utilizado como meio de variação de temperatura, ao mesmo tempo em que o multímetro *Agilent* realizava as medições de resistência elétrica. Um termômetro de referência foi utilizado em conjunto para verificação da temperatura do banho. Para obter  $R_0$ , a primeira medição foi realizada na temperatura de 298 K. O coeficiente foi calculado para cada par de pontos, isolando  $\lambda$  na Eq. (8). Através dos valores obtidos realizou-se uma média, obtendo então um coeficiente de decaimento para cada sensor NTC, determinando assim as equações de temperatura de cada sensor em função da resistência elétrica. Com as expressões encontradas, foram calculadas as temperaturas dos sensores com os mesmos dados de resistências para assim obter as curvas de calibração.

Através dos resultados obtidos das temperaturas calculadas com as expressões de cada sensor em comparação às temperaturas do termômetro de referência, foram plotadas as respectivas curvas de tendência. Ainda, a partir das curvas de calibração, foi possível determinar a equação de ajuste dos valores de temperatura. Por fim, foram obtidas as Eq. (9), (10) e (11) que calculam as temperaturas dos sensores, em função das resistências elétricas medidas, considerando o coeficiente  $\lambda$  médio determinado experimentalmente para cada sensor, com valores obtidos de 3542,67 K, 3552,10 K e 3572,41 K, respectivamente para os sensores 1, 2 e 3. A temperatura do módulo utilizada para os cálculos de potência em corrente c.c. é o valor médio das temperaturas dos três sensores utilizados.

$$T_{s,1} = ((0,9983(1/((\ln(R_1/1068,67)/3542,67 + (1/298))) + 0,5254) - 273 \quad (9)$$

$$T_{s,2} = ((1,0009(1/((\ln(R_2/1103,98)/3552,10 + (1/298))) - 0,3151) - 273 \quad (10)$$

$$T_{s,3} = ((1,0024(1/((\ln(R_3/1106,44)/3572,41 + (1/298))) - 0,7891) - 273 \quad (11)$$

Já para a realização das medições de irradiância solar incidente no plano do gerador utilizou-se como sensor um módulo de silício multicristalino, de 5 W<sub>p</sub>. Quando a temperatura do módulo é igual a 25 °C e a irradiância solar de 1000 W/m<sup>2</sup> sabe-se que a sua corrente de saída é igual à corrente de curto-circuito especificada no catálogo do fabricante. Porém, para a utilização de módulos como sensores de irradiância, a informação do valor da corrente de curto-circuito precisa ser de grande confiabilidade. Desta forma, o módulo foi calibrado com base em dados da estação meteorológica da UNISINOS, com o intuito de encontrar a corrente de curto-circuito real do módulo para que o mesmo possa ser utilizado como sensor.

O procedimento de calibração do sensor de radiação consistiu basicamente em posicionar o módulo na horizontal, mesmo posicionamento de medição da estação meteorológica, e com o uso de um pirômetro e de um amperímetro de precisão, foram monitoradas a temperatura e a corrente elétrica, respectivamente. Quando a estação meteorológica mediu 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância, foram coletados dados de temperatura e corrente de saída do módulo.

A corrente de curto-circuito das células fotovoltaicas é proporcional à irradiância e aumenta ligeiramente com as variações de temperatura, podendo ser descrita conforme a Eq. (12), onde  $I_{SC}$  é a corrente na saída do módulo em (A), medida pelo amperímetro no momento em que a irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup> foi medida pela estação,  $\alpha$  é o coeficiente de temperatura de  $I_{SC}$  do sensor, igual à 0,05%/°C disponibilizado pelo fabricante, e  $I_{SC,STC}$  é a corrente de curto-circuito na STC, igual à 0,31 A, também disponibilizada pelo mesmo fabricante. Com essas informações, foi possível determinar a corrente de curto-circuito do sensor, a qual resultou em um valor de aproximadamente 0,34169 A.

$$I_{SC} = I_{SC,STC} [1 + \alpha(T_m - 25)] \quad (12)$$

A partir da corrente de curto-circuito real do sensor para uma irradiância de 1000 W/m<sup>2</sup>, é possível descrever a equação que calcula a irradiância incidente em função da corrente medida na saída dos terminais do módulo, conforme apresentado na Eq. (13).

$$G = 2926,6I_{sc} \quad (13)$$

**Análise de desempenho.** Após os sensores devidamente calibrados e instalados e o sistema posicionado na inclinação definida através da simulação, iniciou-se a realização das medições a cada minuto. Durante a análise de desempenho do gerador buscou-se comparar os resultados das medições com os resultados calculados, para assim, comparar os valores encontrados.

Desta forma, através do mesmo equacionamento utilizado para a simulação da geração de energia em cada um dos possíveis ângulos do sistema, agora com os dados de temperatura e irradiância medidos através dos sensores instalados no protótipo, foram obtidos os resultados da geração de energia do sistema. Tais resultados calculados podem ser comparados com os resultados medidos e assim quantificar a interferência das características do local de instalação e melhor caracterizar o desempenho do sistema.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Simulação

Os resultados das simulações realizadas através do software RADIASOL, em comparação com os valores da radiação solar incidente na superfície horizontal coletados da estação meteorológica da UNISINOS, estão demonstrados na Fig. 3. Nota-se que para a localização da instalação do protótipo, dentre as inclinações do gerador disponíveis e simuladas, o ângulo de 46° é o que tem uma maior incidência de radiação em todos os meses do ano.

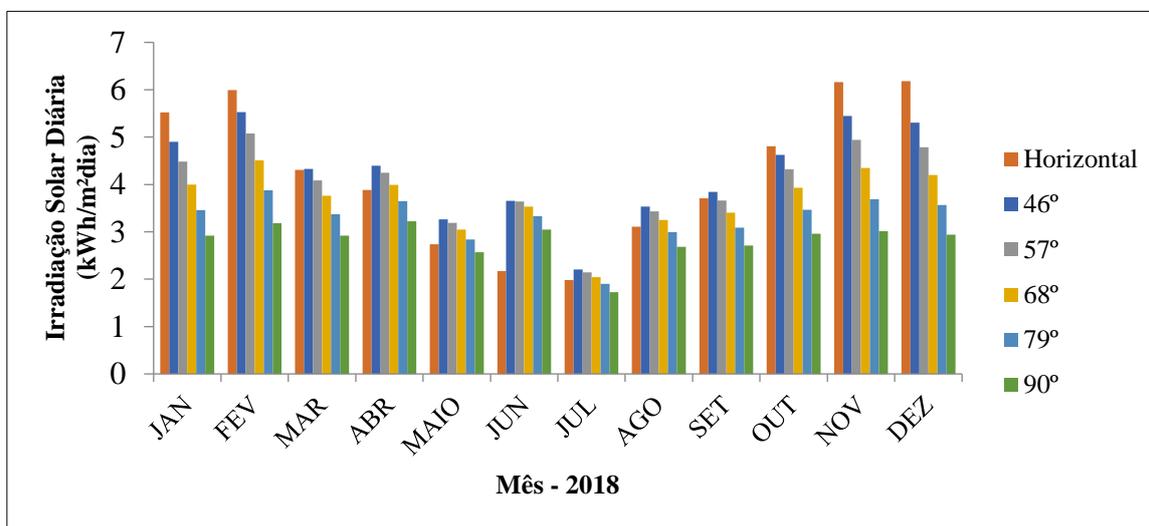


Figura 3 – Simulação da incidência da radiação solar em diferentes inclinações.

Além disso, através da análise gráfica, se pode observar que de março até setembro a irradiância solar média incidente na superfície inclinada em 46° é maior do que na horizontal. No mês de junho, todas as inclinações tiveram uma maior incidência de radiação solar do que a superfície horizontal.

A partir dos resultados da simulação, foram feitos os cálculos para estimar a geração de energia em cada uma das possíveis inclinações, Fig. 4. Pode-se observar que o ângulo de 46° obteve a maior geração de energia para as condições e limitações de instalação do protótipo. Sendo assim, os resultados da simulação justificam o posicionamento do sistema na inclinação de 46° para a realização das análises experimentais posteriores.

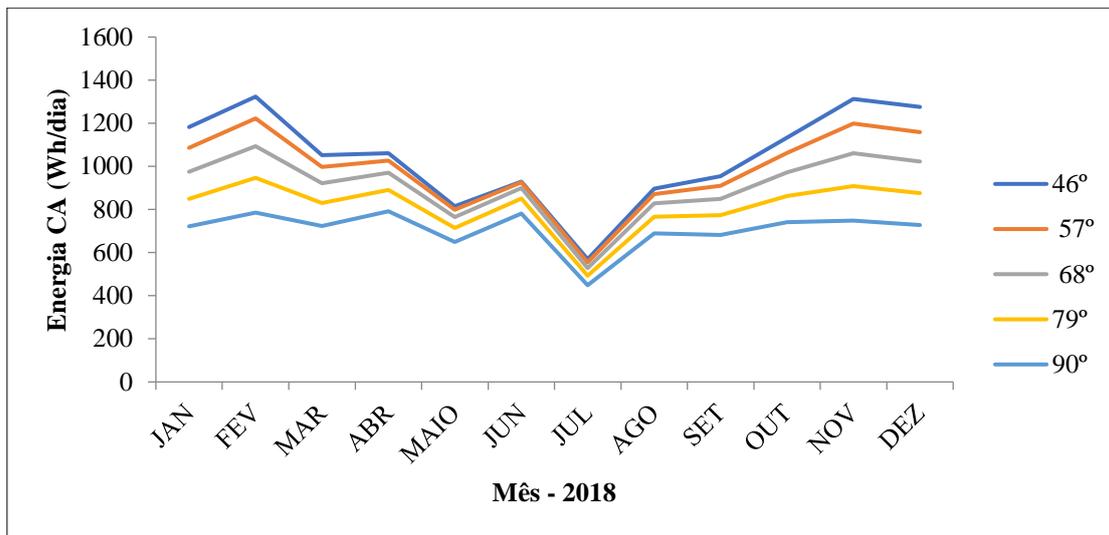


Figura 4 – Geração de energia calculada através dos dados de simulação para diferentes inclinações.

#### 4.2 Análise experimental de desempenho

A Fig. 5 mostra a comparação entre os valores medidos e calculados de potência média diária em corrente c.a. para os meses de maio a outubro de 2019. Pode-se observar que, os valores ficaram semelhantes, sendo a variação máxima encontrada de 15% para o mês de setembro. Dentre os meses analisados, maio e outubro apresentaram os menores valores de potência elétrica entregue à rede, já que estes foram meses atipicamente chuvosos. Agosto apresentou a maior potência para as duas análises, resultando nos valores de  $59,4 \pm 2,8$  W e  $67,7 \pm 5,5$  W para potência elétrica em corrente c.a. medida e calculada, respectivamente. As diferenças encontradas entre as análises podem ter sido ocasionadas por características do local de instalação, visto que há ocorrência de sombreamento sobre o gerador fotovoltaico.

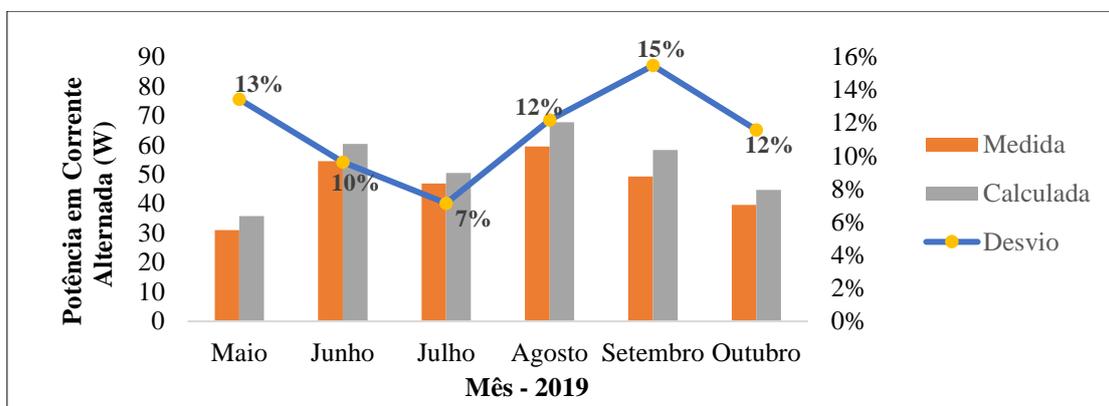


Figura 5 – Comparação entre os resultados dos cálculos e medições de potência c.a. média diária.

A Fig. 6 mostra as potências em corrente c.c. e corrente c.a. em função da irradiância incidente, bem como a influência da irradiância nestas potências elétricas para o mês de setembro, onde se obteve uma maior variação. Nota-se que, os dados de potência (c.a.) apresentam uma maior dispersão do que os dados de potência (c.c.). Esse comportamento pode ser justificado pelo sombreamento parcial de apenas um dos equipamentos, módulo da janela ou sensor de radiação, causando diferenças entre os valores das potências medidas e calculadas. Os valores de potência em corrente c.a. dispersos abaixo da linha de tendência, que representam considerável irradiância e uma baixa potência se justificam em momentos onde o módulo fotovoltaico possuía sombreamento parcial e o sensor de radiação não. Como a potência em corrente c.c. responde linearmente ao comportamento da irradiância, nota-se que, mesmo quando apenas o sensor está sombreado, esse fator não apresentou influência nos valores de potência c.a. Entretanto, pode-se observar que, os pontos de elevada potência em corrente c.a. e baixa irradiância, posicionados muito acima da linha de tendência, podem corresponder a momentos em que o módulo não possuía sombreamento, somente o sensor. Também é sabido que esta dispersão é ocasionada pelo atraso entre as medições de um canal para o outro da unidade de aquisição, principalmente para medidas em corrente alternada, e isto ocasiona em alguns momentos valores de irradiância que não correspondem aos valores de corrente ou vice-versa, como já foi observado em Dias, *et. al.*, (2014).

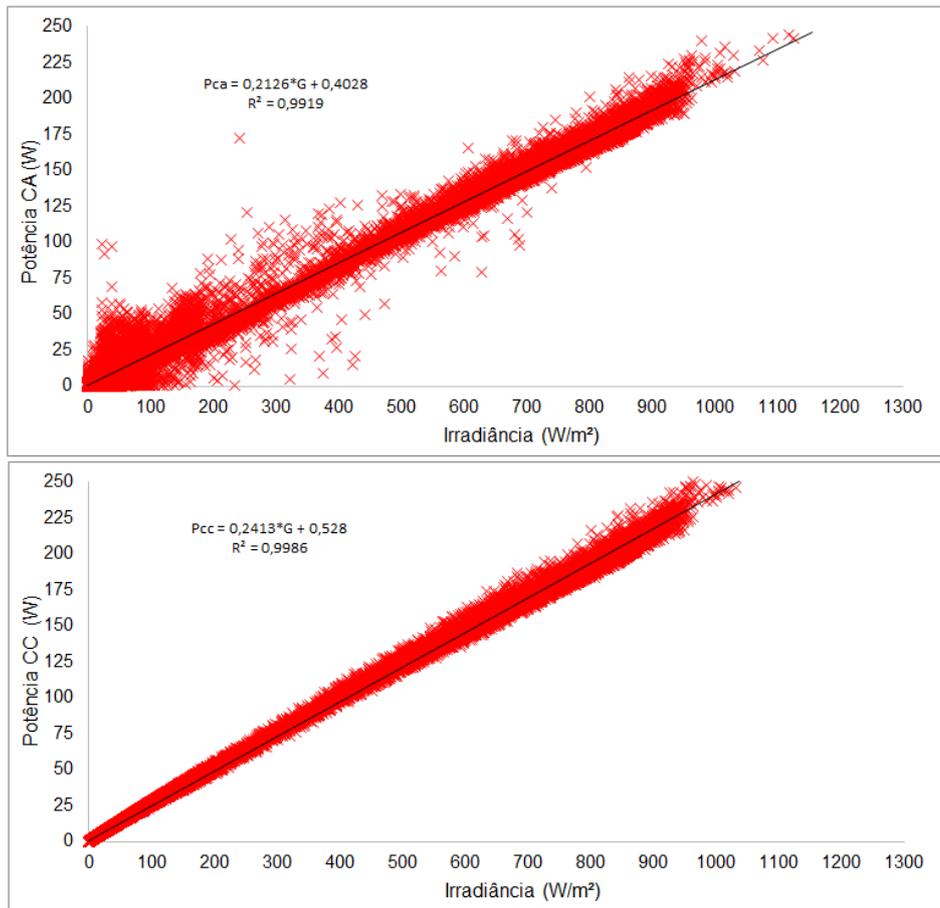


Figura 6 – Análise do comportamento das potências c.a. e c.c. em relação à irradiância para o mês de setembro de 2019.

Na Fig. 7 é possível comparar os resultados das medições e dos cálculos de análise de desempenho referentes a geração média diária do protótipo para cada um dos meses analisados. A geração de energia do sistema em operação apresentou valores distintos dos obtidos através da simulação inicial, encontrados na Fig. 4. Tal diferença ocorre devido ao fato de os dados simulados serem correspondentes ao ano de 2018, que apresentam comportamento climático distinto aos dados aferidos em 2019, ano cujas análises experimentais foram realizadas. Ainda vale ressaltar que, a estação meteorológica se encontra em um local livre de obstáculos o que não é o caso do protótipo.

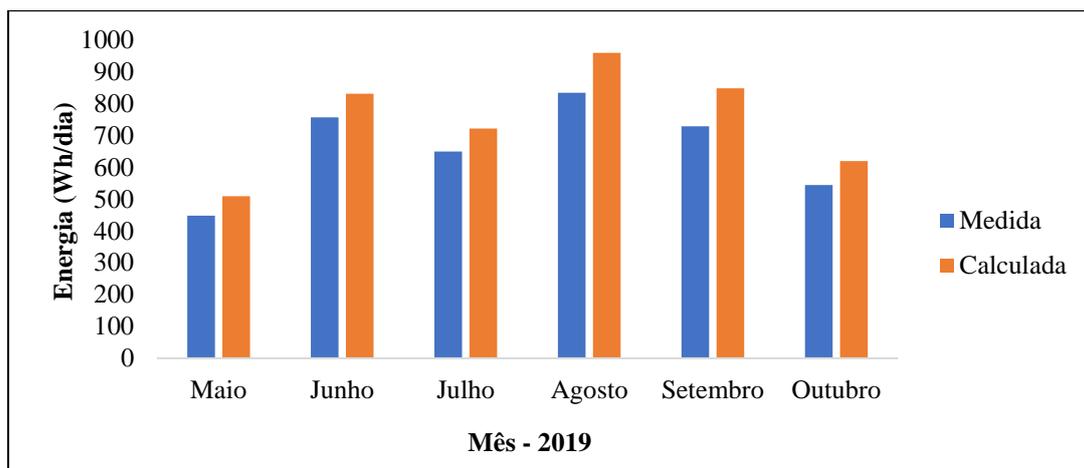


Figura 7 – Comparação entre os resultados de geração de energia calculados e medidos.

Ainda na Fig. 7, é possível observar que a energia calculada, usando as medições de irradiância e temperatura do módulo obtidas no local da instalação, é sempre maior do que a energia medida por meio da unidade de aquisição. Este comportamento é justificado pelas características da instalação, como a presença de sombreamentos no protótipo, sendo

esse fator um obstáculo para que o sistema possa alcançar o seu ponto máximo de geração. A maior média diária de energia gerada foi encontrada no mês de agosto sendo o valor medido de 833 Wh e o valor calculado de 959 Wh.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo do trabalho foi alcançado através do desenvolvimento de um protótipo de sistema fotovoltaico para produção de energia em conexão com a rede elétrica, que pode ser incorporado às edificações através de uma instalação simples. O sistema se manteve fiel as características arquitetônicas utilizadas como premissas para a sua idealização, ou seja, ao modelo de janela proposto.

As simulações realizadas foram importantes para guiar os ensaios experimentais, apresentando resultados com comportamento semelhante aos encontrados experimentalmente. Os dados utilizados na simulação são referentes ao ano de 2018, o que de certa forma serviu como um indicativo para caracterizar o funcionamento do sistema.

Nota-se, através da análise experimental de desempenho do sistema, a necessidade de um período maior de análises para caracterizar seu potencial de geração ou até mesmo seu impacto econômico. A maior média diária de energia gerada foi encontrada no mês de agosto sendo o valor medido de 833 Wh e o valor calculado de 959 Wh. Para uma melhor caracterização do sistema, necessita-se de uma análise de desempenho para os meses de verão. Porém, os meses analisados são suficientes para observar o impacto das características da localização da instalação no desempenho do sistema, visto que, a energia calculada, a qual não sofre a influência da incidência de sombreamentos, em todos os meses analisados apresentou valores maiores do que os obtidos das medições. Além disso, para uma análise mais completa do sistema, incluindo a parte de trocas térmicas e iluminação do ambiente, é importante futuramente incorporar o protótipo em uma edificação.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e a Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) pelo suporte acadêmico.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, M.P., Zilles, R., 2012. Cálculo de parâmetros de desempenho para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Revista Brasileira de Energia Solar, vol. 3, p. 70-77.
- Dias, R. M., Schenkel, G., Dias, J. B., 2014. Avaliação de um sistema fotovoltaico conectado à rede com uso de um microinversor. V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife, 31 a 03 de abril de 2014.
- Duffie, J., Beckman, W., 2013. Solar engineering of thermal processes. Tradução Hoboken: Wiley.
- Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019. Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018. Brasília, DF: EPE.
- Ikkurti, P, H., Saha, S., 2015. A comprehensive techno-economic review of microinverters for Building Integrated Photovoltaics (BIPV), Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 47, pp. 997-1006.
- Liu, G. *et al.*, 2018. Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement, Measurement, vol. 120, pp. 21-27.
- Martínez-Moreno, F., Lorenzo, E., Muñoz, J., Moretón, R., 2011. On the testing of large PV arrays, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Published online in Wiley Online Library.
- Peng, C., Huang, Y., Wu, Z., 2011. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China, Energy and Buildings, vol. 43, pp. 3592-3598.
- Perez, R. *et al.*, 1990. Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, Solar Energy, vol. 44, n° 5, pp. 271-289.
- Yang, H, Lin, L., 2007. The Optimum Tilt Angles and Orientations of PV Claddings for Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Applications, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 129, pp. 253-255.

## DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM PROTOTYPE

**Abstract.** *The use of building-integrated photovoltaic grid-connected systems is growing all over the world and one of the reasons is the easiness of inserting systems components in built environments. Besides that, the growing photovoltaic energy utilization to generate electrical energy enables the flexibilization of energy matrix and the decentralization of energy production. Hence, this study aimed to develop and evaluate the performance of a grid-connected photovoltaic system prototype with microinverter that is capable of being added to buildings via fast installation. To analyze the system performance on operational conditions, the prototype was installed on a test structure in front of Photovoltaic Solar*

*Energy Laboratory of Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), in São Leopoldo, Rio Grande do Sul, with azimuth angle deviation of 10 degrees to east. The system energy production data was simulated by RADIASOL software, from the data provided by UNISINOS weather station, for different photovoltaic system tilt angles. The prototype was analyzed on operational conditions for the higher energy production tilt angle simulated, comparing calculated and measured electrical power generation from May to October 2019. The highest power generation value with the simulated data was reached at prototype tilt angle of 46°, relative to the horizontal, considering installations characteristics and limitations. During operation time of prototype real conditions analysis, the highest daily energy generation average was achieved in August, reaching 833 Wh and 959 Wh for measured and calculated values, respectively.*

**Key words:** *BIPV, Photovoltaic System, Performance Analysis.*