

# CENTRO DE PESQUISA E CAPACITAÇÃO EM ENERGIA SOLAR DA UFSC: INTEGRAÇÃO FOTOVOLTAICA À ARQUITETURA E SIMULAÇÕES DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

**Clarissa Debiazi Zomer** – clazomer@gmail.com

**Andrigo Filippo Antonioli** – andrigofilippo@gmail.com

**Isadora Pauli Custódio** – isadorapcustodio@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

**Júlio Boing Neto** - julioboingneto@gmail.com

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

**Ricardo Rütther** – ricardo.rutther@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

**Resumo.** O objetivo central deste artigo consiste em apresentar as soluções arquitetônicas de três sistemas fotovoltaicos (FV) que foram integrados às edificações do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC (Florianópolis – SC), bem como estimar a geração FV e os seus desempenhos energéticos com base em simulações computacionais. O estudo está dividido em três etapas: (1) Descrição das tomadas de decisão que foram necessárias para a elaboração do projeto arquitetônico, do projeto elétrico, bem como da forma de fixação dos sistemas FV do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC; (2) Simulações para estimar a geração energética dos sistemas FV propostos, utilizando dois métodos e quatro bancos de dados de irradiação; e (3) Validação das simulações, através da comparação de valores de irradiação horizontal mensais dos quatro bancos de dados com valores de irradiação medidos na mesma cidade, para cinco anos (2009 a 2013). Os resultados mostraram que, em geral, o Método 1 apresentou valores de yield (produtividade) superiores ao Método 2 e que o banco de dados Meteororm foi o que apresentou valores mais próximos aos valores de irradiação medidos na cidade de Florianópolis no período analisado. O presente estudo contribui para demonstrar diferentes possibilidades de integração FV em edificações, explorando o uso de diferentes tecnologias FV e divulgando os benefícios estéticos e energéticos de sua aplicação em meio urbano.

**Palavras-chave:** Energia solar fotovoltaica, Integração fotovoltaica à arquitetura, Simulação computacional para geração de energia fotovoltaica.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido às condições hidrológicas desfavoráveis observadas ao longo de 2014, houve redução de 5,6% na oferta de energia hidráulica neste período e, com esta redução, a participação de fontes renováveis na matriz brasileira recuou de 84,5% em 2012 para 65,2% em 2014, mesmo com um incremento de 3.177 MW de potência instalada em parques hidrelétricos. A fonte eólica, incentivada através de leilões e projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), atingiu 4.903 MW, um acréscimo de 85,6% na geração de energia elétrica através desta fonte em relação ao ano anterior (Brasil, 2015). Este crescimento demonstrou que há necessidade e um grande potencial de inserção de novas fontes renováveis para diversificar a matriz nacional. A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) tem investido em programas de P&D e na promoção de leilões para aumentar a competitividade e diversidade das fontes renováveis, focando recentemente na fonte solar (Costa, 2015).

De acordo com o BIG (Banco de Informações de Geração) da ANEEL, até outubro/2015 havia 21,23 MWp de potência instalada em usinas fotovoltaicas (FV) no Brasil, com 1.143 MWp de empreendimentos já outorgados, porém em obras não iniciadas (BIG, 2015). 13 MWp da atual potência instalada é decorrente de projetos de P&D e projetos pilotos. Apesar do crescimento exponencial ao longo dos últimos anos, a fonte solar representa apenas 0,02% da capacidade total de geração do país, que é de 138,7 GWp. O consumo final de eletricidade registrou um aumento de 2,9% em 2014, chegando a 531,1 TWh, sendo que os setores que mais contribuíram para este aumento foram o residencial (+5,7%) e o comercial (+7,4%)

Diante dos valores supracitados, pode-se dizer que o cenário de energia solar no Brasil, assim como em outros países de baixas latitudes, indica um futuro promissor para os sistemas FV conectados à rede e integrados às edificações (Martins et al., 2008; Rütther and Zilles, 2011) e um importante passo nesta direção, a regulamentação 482 da ANEEL (ANEEL, 2012), já foi dado. Integrados a edificações, os geradores FV geram energia junto ao ponto de consumo, de forma distribuída e sem ocupar área extra, já que ficam sobrepostos ou desempenham o papel de vedações na arquitetura.

Com a contínua redução dos preços de módulos FV, o sucessivo desenvolvimento da tecnologia, o aumento da eficiência de conversão energética e, conseqüentemente, a otimização do desempenho dos geradores FV, os elementos FV poderão ser previstos cada vez mais em projetos de engenharia e arquitetura, até mesmo em situações não consideradas ideais. A aplicação de módulos FV pode ser feita em fachadas, coberturas e até mesmo em brises, que além de gerarem energia, servem de proteção solar. Segundo Prasad e Snow (2002), um dos atributos mais positivos da tecnologia FV é sua aparência; remete à frieza sofisticada do “*high-tech*” com a responsabilidade social de mitigar a depredação ambiental e, quando integrada de uma maneira elegante e esteticamente agradável a uma edificação, esta se torna um exemplo que pode ser utilizado para convencer clientes, arquitetos e o público quanto ao papel que um sistema FV pode desempenhar, tanto em termos de geração energética quanto como elemento construtivo de um edifício. Além disso, projetos que demonstram a utilização de sistemas FV como elementos de composição arquitetônica são muito importantes para que os custos da eletricidade FV continuem caindo (Ropp et al., 1997).

Um sistema FV pode ser considerado um elemento de destaque em uma edificação; pode estar integrado de forma sutil, sem que seja percebido; ou ainda pode comprometer negativamente todo o conjunto, quando estiver aplicado de forma inadequada. Sistemas FV integrados a edificações de forma harmônica e com bons resultados de desempenho energético são fundamentais para que haja maior aceitação e difusão de utilização desta tecnologia. Este trabalho busca aproximar arquitetos e engenheiros da tecnologia FV integrada a edificações inseridas em meio urbano através das diferentes aplicações demonstradas no Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (Fig. 1), localizado no parque tecnológico Sapiens Parque, na cidade de Florianópolis (27.59° S, 48.54° O), um centro de pesquisa cujos objetivos incluem a disseminação de conhecimentos sobre a aplicação desta tecnologia no meio urbano. Portanto, esta edificação foi projetada para ser uma vitrine para a tecnologia FV, demonstrando diferentes formas de integração de módulos à arquitetura.



Figura 1- Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC.

O Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar está inserido no projeto de P&D “Implantação de usina solar fotovoltaica (FV) de 3 MWp e avaliação do desempenho técnico e econômico da geração FV em diferentes condições climáticas na matriz elétrica brasileira”, firmado entre UFSC e Tractebel Energia S/A, RGE - Rio Grande Energia, Enercan - Campos Novos Energia S. A., Baesa - Energética Barra Grande S.A., CDSA – Centrais Elétricas Cachoeira Dourada S.A., Ceran - Companhia Energética Rio das Antas S.A., Cgtf - Central Geradora Termoelétrica Fortaleza S. A., CPFL - Companhia Piratininga de Força e Luz, CpfL - Companhia Paulista de Força e Luz, Light Energia S. A., Copel – Copel Geração e Transmissão S/A, Fce - Foz do Chapecó Energia S/A, tendo a Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina (FEESC) como interveniente administrativa das entidades promotoras da P&D.

## 2. OBJETIVO

O objetivo central deste artigo consiste em apresentar as soluções arquitetônicas de três sistemas FV que foram integrados às edificações do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC, bem como estimar a geração FV e os seus desempenhos energéticos baseado em simulações computacionais.

## 3. MÉTODO

O estudo está dividido em três etapas. A primeira etapa trata da descrição das tomadas de decisão que foram necessárias para a elaboração do projeto arquitetônico, do projeto elétrico, bem como da forma de fixação aos telhados dos sistemas FV do Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC.

Na segunda etapa, foram realizadas simulações para se estimar a geração energética dos sistemas FV propostos, utilizando dois métodos diferentes. O Método 1 baseou-se na Eq. (1):

$$E = H_{INC} \times P_{cc} \times PR \quad (1)$$

Onde:

E = Geração solar FV diária(kWh).

$H_{INC}$  = Irradiação diária recebida no plano dos módulos FV (kWh/m<sup>2</sup>), dividida pela irradiância de referência de 1 kW/m<sup>2</sup>, expressa em números de horas (h) por dia.

$P_{cc}$  = Potência do sistema em corrente contínua (kW)

PR = Rendimento do sistema (inversor e conexões).

O valor de irradiação inclinada ( $H_{INC}$ ) foi obtido através do software Radiasol (UFRGS, 2001), utilizando o modelo de transposição de Perez e valores obtidos em quatro bancos de dados de irradiação global horizontal: INPE, NASA, NREL e Meteonorm.

Tipicamente, considera-se valores de PR entre 70 e 80% para sistemas FV instalados em regiões tropicais e subtropicais (Decker and Jahn, 1997; Marion et al., 2005; Mondol et al., 2006; Reich et al., 2010; Rütther et al., 2010). No decorrer dos anos, tem se observado um aumento significativo no desempenho dos sistemas recentemente instalados, indicando menores perdas energéticas (Clavadetscher and Nordmann, 2007; Reich et al., 2012), demonstrando tanto que os geradores FV tem sido projetados com mais cautela, quanto que os equipamentos têm melhorado significativamente suas eficiências. Atualmente, valores de PR acima de 90% já são realidade em geradores que utilizam módulos e inversores comercialmente disponíveis e a tendência é este percentual aumentar ainda mais em um futuro próximo (Reich et al., 2012). Por tratarem-se de sistemas FV recém-instalados e ainda manter uma margem de segurança, na simulação pelo Método 1, o valor de PR utilizado foi de 80%.

Como o Método 1 não leva em consideração as perdas por sombreamento na sua estimativa de geração energética, aplicou-se o método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas FV, descrito em Zomer (2014) para se estimá-las. A análise de sombreamento deste método é realizada através do *software* Ecotect, com geração de máscaras de sombreamento e quantificação do percentual de sombreamento anual das superfícies analisadas. O percentual de sombreamento anual é então aplicado à Eq. (1) para correção da geração energética prevista, bem como para a estimativa do *yield* (produtividade do sistema FV), conforme Eq. (2).

$$Y = \frac{E \times (1-IS)}{P_{cc}} \quad (2)$$

Onde:

Y = *Yield* anual (kWh/kW = h).

E = Geração solar FV diária (kWh).

IS = Índice de Sombreamento anual (%), que é o percentual de sombreamento anual de uma superfície obtido através de simulações no *software* Ecotect.

$P_{cc}$  = Potência do sistema em corrente contínua (kW).

O Método 2 foi baseado em simulações utilizando o *software* PVsyst (PVsyst, 2013), levando-se em consideração a configuração elétrica proposta com a inserção das características inerentes a cada sistema, tais como: módulo FV; inversor; divisão das *strings* e dos subsistemas; inserção de parâmetros de perdas por sujeira, por descasamento entre módulos, por temperatura e por indisponibilidade do sistema. Os três sistemas foram modelados no *software* para se estimar também as perdas por sombreamento. A fim de comparação, foram utilizados os mesmos bancos de dados: INPE, NASA, NREL e Meteonorm. Em seguida, os valores de *yield* obtidos pelo PVsyst foram comparados com os valores de *yield* obtidos no Método 1.

A fim de validar as simulações, na terceira etapa deste estudo, os valores de irradiação horizontal mensais dos quatro bancos de dados analisados foram comparados com valores de irradiação medidos na cidade de Florianópolis, para cinco anos (2009 a 2013), a fim de propor um fator de correção em relação aos dados obtidos nas simulações computacionais. Foram obtidos valores de irradiância com resolução temporal de quatro minutos, através de um piranômetro instalado na cobertura do edifício de Engenharia Mecânica da UFSC, estação solarimétrica do Grupo Fotovoltaica UFSC. Os valores foram convertidos em irradiação mensal (kWh/m<sup>2</sup>). É importante ressaltar que enquanto os dados medidos sofrem influência do entorno (morros, edificações, vegetação), os dados obtidos nos bancos de dados analisados consideram o horizonte livre.

#### 4. CENTRO DE PESQUISA E CAPACITAÇÃO EM ENERGIA SOLAR DA UFSC

O Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC é constituído por dois blocos: A e B. O Bloco A foi planejado para abrigar duas salas de aula — que podem ser integradas e virar uma grande sala — para capacitação e treinamento de profissionais que irão trabalhar ou desenvolver pesquisa na área de energia solar FV; um auditório que possibilita a realização de eventos, como congressos e encontros institucionais, com capacidade para 80 pessoas; e salas exclusivas para professores e alunos da UFSC desenvolverem seus projetos de pesquisa.

O Bloco B é destinado à realização de atividades práticas relacionadas com os projetos desenvolvidos no Bloco A, além da capacitação prática de pessoas. O Bloco B possui um laboratório de monitoramento de usinas FV, para avaliação em tempo real dos sistemas FV monitorados pelo grupo em diferentes localidades, bem como um laboratório de prototipagem, onde há desenvolvimento e testes de equipamentos relacionados ao uso da energia solar FV. Fazendo a ligação entre os laboratórios, uma oficina equipada com ferramentas e aparelhos mecânicos dá suporte para os

mesmos. O Bloco B possui ainda um mezanino, ocupado por pesquisadores e um terraço com uma estação solarimétrica completa.

As coberturas dos blocos possuem integração de módulos FV, instalados de modo a possibilitar a sua visualização pelos visitantes do local e, portanto, divulgar esta tecnologia. Além das edificações, o Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar possui um estacionamento coberto por módulos FV. Além de gerar energia limpa para suprir a necessidade energética das edificações, os geradores solares foram projetados para alimentar veículos elétricos e injetar a energia excedente na rede elétrica em horários específicos.

O gerador FV do centro é composto por 3 sistemas: Sistema A, Sistema B e Sistema C. O Bloco A possui um sistema FV integrado à sua cobertura curva (Sistema A). O Bloco B possui um sistema FV integrado à sua cobertura inclinada (Sistema B). O estacionamento é coberto com módulos FV sendo utilizados como próprio material de vedação (Sistema C). A localização e forma dos subsistemas estão representadas na Fig. 2.



Figura 2- Localização e forma dos sistemas FV instalados no Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Descrição dos Sistemas FV

O Sistema A é composto por 270 módulos de silício policristalino (p-Si), com 245 Wp de potência nominal, instalados de forma a seguir a curvatura da cobertura existente, com inclinação dos módulos variando de fileira a fileira e potência total instalada de 66,15 kWp. Dois terços do sistema é orientado ao norte e um terço, está na horizontal ou levemente inclinado ao sul. A fim de valorizar a curvatura original do projeto e demonstrar a aplicabilidade de módulos FV rígidos nesta situação, a integração arquitetônica do Sistema A deu-se através da fixação dos módulos em posição paisagem, de modo que a menor dimensão fizesse a composição da curva. Os módulos foram fixados em perfis metálicos, com 10 cm de espaçamento até a cobertura existente, favorecendo a ventilação sob os mesmos. O sistema de cobertura adotado neste projeto possui os arremates clipados e a junção das lâminas metálicas é feita por zipagem em obra, com perfiladeira portátil. A telha escolhida possui duas faces em aço com núcleo em lã de rocha, para contribuir com o conforto térmico e acústico da edificação, além de possuir um sistema automático de calandragem em obra, permitindo a aplicação côncava ou convexa, ideal para superfícies curvas.

O Sistema B é composto por 95 módulos de silício microamorfo ( $\mu$ Si), de 142 Wp de potência nominal, orientados ao norte, com inclinação de  $6^\circ$  (cobertura inclinada) e 13,5 kWp de potência instalada. Parte deste sistema (8 módulos FV) foi destinado à alimentação de bombas que movimentam a água dos espelhos d'água, sendo conectados diretamente a elas. Sendo assim, 87 módulos desta cobertura fazem parte do Sistema B conectado à rede, ou seja, 12,35 kWp. Assim como o Sistema A, o Sistema B foi instalado sobre telha sanduíche metálica (neste caso plana) com núcleo em lã de rocha, com afastamento de 10 cm entre a superfície metálica e os módulos FV.

O Sistema C é composto por 112 módulos de disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), com inclinação de  $5^\circ$ , orientados a oeste e potência nominal de 13,44 kWp. O Sistema C cobre 8 vagas de estacionamento e um bicicletário para 6 bicicletas, sendo que os módulos FV fazem a vedação da cobertura. A instalação dos mesmos foi feita sobre uma estrutura metálica com calhas para direcionar a água da chuva e, ao mesmo tempo, garantir a estanqueidade da cobertura. Uma das características do módulo adotado foi ressaltada nesta solução: sua face posterior espelhada, que reflete o estacionamento e os jardins, agregando valor estético ao conjunto.

A Fig. 3 apresenta alguns dos detalhes construtivos supracitados. Pode-se notar que os módulos FV do Sistema A, apesar de rígidos, integram-se à curvatura da cobertura de forma a parecerem curvos também. No Sistema B, destaca-se a distância entre os módulos e a telha metálica, bem como o sistema de zipamento e clipagem desta solução de cobertura. No Sistema C, destaca-se o lado posterior espelhado dos módulos e a estrutura metálica que direciona a água da chuva e a Tab. 1 apresenta um resumo das características de cada sistema presente no Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC.



Figura 3- Detalhes construtivos dos Sistemas A, B e C.

Tabela 1 - Características dos sistemas FV instalados no Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC.

SISTEMA	TECNOLOGIA	SUBSISTEMA	DESVIO AZIMUTAL	INCLINAÇÃO	POTÊNCIA INSTALADA (kWp)
A	p-Si	A1	0°	20,7°	4,41
			0°	19,1°	4,41
			0°	16,2°	4,41
			0°	14,2°	4,41
			0°	12,1°	4,41
				22,05	
		A2	0°	9,7°	4,41
			0°	7,3°	4,41
			0°	5,6°	4,41
			0°	3,2°	4,41
			0°	1,2°	4,41
				22,05	
		A3	180°	0,4°	4,41
			180°	1,8°	4,41
			180°	3,4°	4,41
			180°	5,1°	4,41
			180°	8,9°	4,41
				22,05	
Potência instalada total (kWp)					<b>66,15</b>
B	μ-Si	B	0°	6°	12,35
		Potência instalada total (kWp)			
C	CIGS	C	270°	5°	13,44
		Potência instalada total (kWp)			

## 5.2 Simulações: Estimativa de geração FV

As estimativas de geração FV realizadas a partir do Método 1 e do Método 2, já considerando as perdas por sombreamento e utilizando como dado de entrada quatro bancos de dados, podem ser visualizadas na **Tabela 2**. No Método 1, todas as inclinações presentes no Sistema A foram consideradas na obtenção da irradiação inclinada. No Método 2, a curva foi dividida em três planos, um para cada subsistema (inversor), e a inclinação média de cada um foi inserida no software PVsyst. Em ambos os casos, a estimativa de geração do sistema completo foi a soma dos três subsistemas. Pode-se observar que, enquanto o percentual de sombreamento anual permanece estável para os quatro bancos de dados no Método 1, ele varia quando se utiliza o Método 2. Ao contrário do que ocorre no Método 2, a estimativa de sombreamento anual do Método 1 não leva em consideração os dados de irradiação do banco de dados, pois baseia-se apenas na geometria da superfície analisada e sua posição cartográfica (latitude e longitude). Apesar da diferença de metodologias na obtenção dos percentuais de sombreamento, ambos os métodos apresentaram valores bem próximos na estimativa de sombreamento anual. A Tab. 2 também demonstra que o PR calculado pelo *software* PVsyst é de aproximadamente 80%, tal qual o PR padrão adotado no Método 1.

A partir da geração energética calculada com base nos dois métodos apresentados, pode-se estimar o *yield* para os três sistemas e comparar a influência da escolha do banco de dados nesta estimativa. Os *yields* referentes a cada simulação estão apresentados na Fig. 4.

Tabela 2 - Estimativa de geração energética pelos Métodos 1 e 2.

SISTEMA	BANCO DE DADOS	MÉTODO 1			MÉTODO 2		
		PERCENTUAL DE SOMBREAMENTO ANUAL (Ecotect)	PR	GERAÇÃO DE ENERGIA (kWh/ano)	PERCENTUAL DE SOMBREAMENTO ANUAL (PVsyst)	PR	GERAÇÃO DE ENERGIA (kWh/ano)
SISTEMA A	INPE	0,9%	80%	88.515	0,2%	75,9%	85.110
	NASA	0,9%	80%	88.877	0,2%	75,2%	84.790
	NREL	0,9%	80%	88.205	0,2%	75,8%	84.780
	Meteonorm	0,9%	80%	84.789	0,3%	76,0%	81.640
SISTEMA B	INPE	0,0%	80%	16.756	0,1%	75,7%	15.990
	NASA	0,0%	80%	16.825	0,1%	75,1%	15.940
	NREL	0,0%	80%	16.698	0,1%	75,5%	15.890
	Meteonorm	0,0%	80%	16.046	0,1%	75,9%	15.340
SISTEMA C	INPE	2,9%	80%	17.322	2,5%	78,3%	17.360
	NASA	2,9%	80%	17.403	2,4%	77,4%	17.260
	NREL	2,9%	80%	17.260	2,5%	78,4%	17.330
	Meteonorm	2,9%	80%	16.618	2,6%	77,4%	16.470

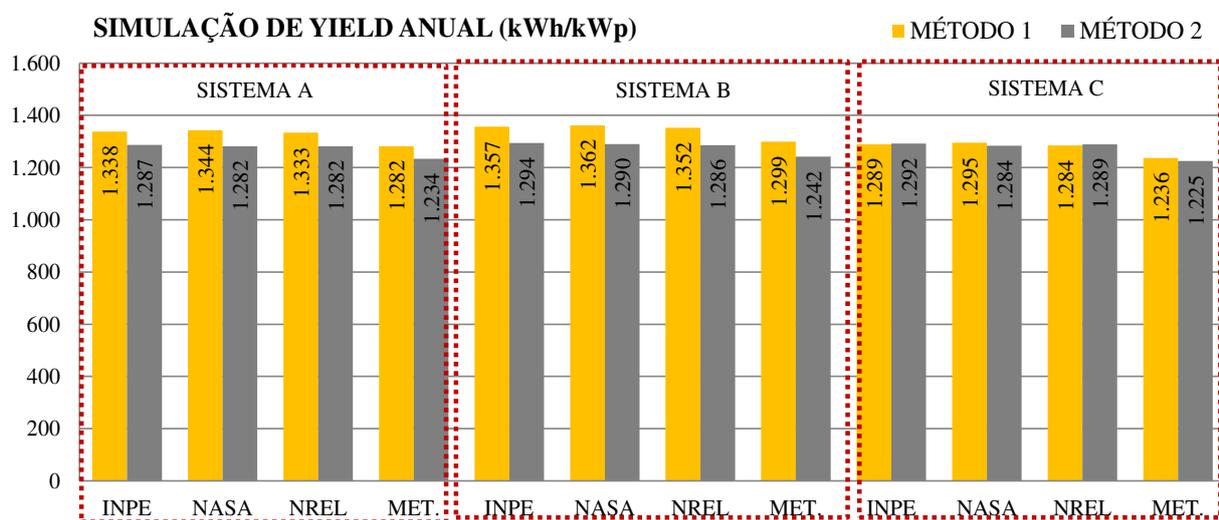


Figura 4 – Simulação do *yield* anual com base em quatro bancos de dados, comparando os Métodos 1 e 2 para cada sistema FV.

Os resultados das simulações mostraram que a tendência é o Método 1 estimar valores de *yield* superiores ao Método 2, mesmo utilizando o mesmo banco de dados. Na média, no Sistema A e no Sistema B, as estimativas utilizando o Método 1 superaram em 4 e 5% as estimativas obtidas pelo Método 2, respectivamente. Já o Sistema C, teve, na média, a mesma estimativa de produtividade. Este resultado mais próximo pode ser observado em detalhe na Tab. 2 e está diretamente relacionado ao PR. Nos Sistemas A e B, o *software* PVsyst, que considera todo o arranjo elétrico para sua estimativa, apresentou valores de entre 75% e 76% para ambos os sistemas. Já para o Sistema C, o PVsyst apresentou um valor de 77% a 78%, portanto, mais próximos ao valor adotado como padrão na estimativa pelo Método 1. Um dos fatores que mais pesou na estimativa de PR do PVsyst foi o comportamento de cada tecnologia quando elevada a temperaturas superiores a 25°C, sendo que os módulos utilizados no Sistema C são os que sofrem menores perdas (tecnologia CIGS). Em relação aos bancos de dados, pode-se perceber que nos três sistemas, A, B e C, a escolha pelo banco de dados Meteonorm resulta em menores valores de *yield* do que pelos três outros bancos de dados, os quais apresentaram valores bem semelhantes entre eles, cerca de 5% acima dos valores obtidos pelo Meteonorm.

### 5.3 Validação das simulações: Bancos de dados X dados medidos

A fim de selecionar o banco de dados mais adequado para a estimativa de geração energética e *yield*, os valores de irradiação horizontal dos quatro bancos de dados foram comparados com valores mensais de irradiação medidos na cidade de Florianópolis em um período de cinco anos (2009 a 2013), como demonstra a Fig. 5.

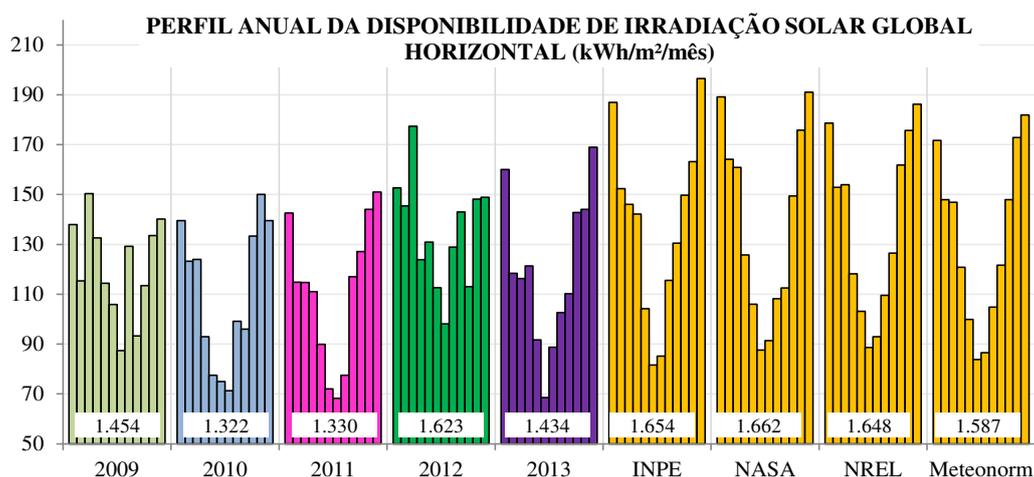


Figura 5 – Perfil anual da disponibilidade de irradiação solar global horizontal (kWh/m<sup>2</sup>/mês) para cinco anos de medições (2009 a 2013) e quatro bancos de dados.

Os valores medidos ao longo de cinco anos foram tratados a partir de filtros que diagnosticaram falhas na aquisição de dados. No caso de buracos de medição da irradiação, os valores faltantes foram substituídos pela média entre os valores antes e depois da falha.

A irradiação global horizontal medida na cidade de Florianópolis em 2013 (1.434 kWh/m<sup>2</sup>/ano) foi equivalente à média dos quatro anos medidos anteriormente (1.432 kWh/m<sup>2</sup>/ano) e, dentro do período medido, os dados de irradiação revelam que 2012 foi um ano mais ensolarado que os demais. Através da Fig. 5, pode-se notar que os bancos de dados apresentam valores superestimados em relação aos valores medidos anuais para o período em questão, sendo que o banco de dados que mais se aproxima da média dos valores medidos é o Meteonorm, sendo, ainda assim, superestimado em 10%. Considerando-se um panorama de 15 anos (1999 a 2013), a média anual de irradiação global horizontal em Florianópolis é de 1.430 kWh/m<sup>2</sup> (Zomer, 2014), ou seja, a média dos últimos cinco anos é representativa.

Portanto, para o período analisado, indica-se adotar o banco de dados do Meteonorm para as simulações de geração energética, sabendo que a irradiação anual medida em Florianópolis tende a ser, aproximadamente, 10% inferior. Pelo estudo apresentado, pode-se afirmar que se a estimativa for realizada através do Método 1, tenderá a estar até 5% acima do que se realizada através do Método 2. A fim de se determinar qual dos dois métodos apresenta melhor correspondência com a realidade, será necessário comparar os valores estimados com valores de pelo menos um ano de medição dos três sistemas analisados. Com a previsão de início de coleta de dados a partir de 2016, ao final de um ano, este resultado poderá ser obtido.

## 6 CONCLUSÕES

No presente artigo, três sistemas FV integrados ao Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC, na cidade de Florianópolis – SC, foram apresentados em detalhe, demonstrando sua forma de integração à arquitetura de modo a dialogar com a estética das edificações, as decisões tomadas em relação ao projeto elétrico a fim de otimizar o desempenho energético dos geradores, bem como apresentar as soluções utilizadas para fixação dos módulos FV aos telhados.

Além disso, estimativas de geração FV foram simuladas utilizando ferramentas computacionais baseadas em diferentes bancos de dados e dois métodos de estimativa: 1 e 2. O Método 1, em geral, apresentou valores superiores de geração energética e *yield* anual. Os valores de irradiação de cada banco de dados foram comparados com valores de irradiação global horizontal coletados durante cinco anos na cidade de Florianópolis. O banco de dados Meteonorm foi o que apresentou valores mais próximos aos valores reais para o período avaliado, mas ainda assim, 10% superior à média dos anos analisados. Com a previsão de interligação à rede dos sistemas FV para os próximos meses, bem como o início da coleta de dados, os valores estimados serão então comparados com valores reais, adquiridos ao longo dos próximos anos.

Através deste artigo, demonstra-se a importância de estudos relacionados à integração de sistemas FV a edificações, apresentando diferentes possibilidades e formas de integração FV ao envelope construído, além de explorar o uso de diferentes tecnologias de células FV para que possam ser inseridas desde a concepção de novos projetos arquitetônicos.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Projeto P&D firmado entre a UFSC e a Tractebel Energia no contexto do programa de P&D

ANEEL (chamada 013/2011). Os autores agradecem a todos os integrantes da equipe Fotovoltaica UFSC que participaram indiretamente para a elaboração deste estudo, principalmente no fornecimento de dados de irradiação coletados na estação solarimétrica do grupo de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL, 2012. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. A. N. d. E. Elétrica482.
- BIG, 2015. Capacidade de Geração do Brasil. Acessado em 14/10/2015, <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
- Brasil, Empresa de Pesquisa Energética, 2015. Balanço Energético Nacional 2015 - Ano Base 2014: Relatório Síntese, EPE.
- Clavadetscher, Luzi and Thomas Nordmann, 2007. Cost and Performance Trends in Grid-Connected Photovoltaic Systems and Case Studies, IEA PVPS Task 2, vol. T2-06:2007, n. pp.
- Costa, Machado, 2015. Aneel quer repetir sucesso das eólicas com energia solar. Acessado em 14/10/2015, <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/08/1673822-aneel-quer-repetir-sucesso-das-eolicas-com-energia-solar.shtml>.
- Decker, B. and U. Jahn, 1997. Performance of 170 grid connected PV plants in Northern Germany: Analysis of yields and optimization potentials, Solar Energy, vol. 59, n. 46, pp. 127-133.
- Marion, B., J. Adelstein, K. Boyle, H. Hayden, B. Hammond, T. Fletcher, B. Canada, D. Narang, D. Shugar, H. Wenger, A. Kimber, L. Mitchell, G. Rich and T. Townsend, 2005. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems, 31<sup>st</sup> IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, Lake Buena Vista, Florida.
- Martins, F. R., R. Rütther, E. B. Pereira and S. L. Abreu, 2008. Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications, Energy Policy, vol. 36, n. 8, pp. 2865-2877.
- Mondol, Jayanta Deb, Yigzaw Yohanis, Mervyn Smyth and Brian Norton, 2006. Long term performance analysis of a grid connected photovoltaic system in Northern Ireland, Energy Conversion and Management, vol. 47, n. 18, pp. 2925-2947.
- PVsyst, 2013. Near Shadings: tutorial. Switzerland, PVsyst Photovoltaic Software.
- Reich, N. H., W. G. J. H. M. van Sark, W. C. Turkenburg and W. C. Sinke, 2010. Using CAD software to simulate PV energy yield – The case of product integrated photovoltaic operated under indoor solar irradiation, Solar Energy, vol. 84, n. 8, pp. 1526-1537.
- Reich, Nils H., Bjoern Mueller, Alfons Armbruster, Wilfried G. J. H. M. van Sark, Klaus Kiefer and Christian Reise, 2012. Performance ratio revisited: is PR > 90% realistic?, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 20, n. 6, pp. 717-726.
- Ropp, Michael E., Miroslav Begovic, Ajeet Rohatgi and Richard Long, 1997. Design Considerations for Large Roof-integrated Photovoltaic Arrays, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 5, n. 1, pp. 55-67.
- Rütther, Ricardo, Lucas Nascimento, Jair Urbanetz, Paulo Pfitscher and Trajano Viana, 2010. Long-term performance of the first grid-connected, building-integrated, thin-film amorphous silicon PV installation in Brazil, 35<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu - HI, EUA.
- Rütther, Ricardo and Roberto Zilles, 2011. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil, Energy Policy, vol. 39, n. 3, pp. 1027-1030.
- UFRGS, 2001. Radiações Porto Alegre, Laboratório de Energia Solar do GESTE.
- Zomer, Clarissa Debiazi, 2014. Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações, Tese, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

## RESEARCH AND TRAINING CENTER IN SOLAR ENERGY OF UFSC: ARCHITECTURAL PHOTOVOLTAIC INTEGRATION AND PERFORMANCE SIMULATIONS

**Abstract.** *The main objective of this paper is to show the architectural solutions of three building-integrated photovoltaic (BIPV) systems installed at rooftops and at the carport of the Research and Training Center in Solar Energy of UFSC, as well as simulate the energy generation and their corresponding energy performances using computer softwares. This study is divided in three sections: (I) Description of decision-making that were necessary for the development of architectural design, electrical design, and also the procedure for setting photovoltaic systems on the Research and Training Center in Solar Energy of UFSC; (II) Computer simulations to estimate the energy generation of proposed BIPV systems using two different methods and four irradiation data sources; and (III) Validation of simulations, through the comparison of the four data sources with five years of measured data for the same location (2009 to 2013). Results have shown that, in general, Method 1 leads to higher yield values and that Meteornorm data source was the one closest to the measured irradiation data for Florianópolis in the period under study (2009 to 2013). Studies like this can contribute to demonstrate different building integration possibilities using the photovoltaic technology, as well as propagate the energetic and aesthetics benefits of this application.*

**Key words:** *Photovoltaic Solar Energy, Building-integrated photovoltaic systems, Computer simulations for photovoltaic energy generation.*