Simulação e análise de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos aplicados em uma edificação residencial vertical

Henrique de Araujo Lauffer (UNISINOS) - henrique.lauffer@gmail.com

Georgia Andrade Tomaszewski (UERGS) - g_atomaszewski@hotmail.com

Fernanda Haeberle (UNISINOS) - fernandahaeberle@gmail.com

João Batista Dias (UNISINOS) - joaobd@unisinos.br

Paulo Roberto Wander (Unisinos) - prwander@unisinos.br

Resumo:

Um grande desafio para edifícios sustentáveis é reduzir o consumo de eletricidade e, ao mesmo tempo, suprir sua demanda de energia com autogeração. A energia solar fotovoltaica é uma alternativa complementar aos sistemas energéticos tradicionais, por ser uma geração de energia limpa e com possibilidade de ser aplicada diretamente no local de consumo. O objetivo do trabalho é analisar a geração de energia elétrica em uma edificação típica residencial com um sistema fotovoltaico aplicado na envoltória e comparar o desempenho nas diferentes fachadas, localizações geográficas, tecnologias fotovoltaicas e analisar a performance de geração, utilizando para isso o software EnergyPlus. Os resultados mostram que a geração de eletricidade em fachadas não convencionais auxilia no suprimento da demanda e pode produzir energia suficiente para atender o consumo de energia elétrica da edificação. A partir dos resultados de geração, foram criadas relações entre a produção de energia elétrica por área na cobertura considerada ideal, versus a produção de energia elétrica por área em cada fachada vertical. Para Porto Alegre, com exceção da fachada sul, que apresentou uma proporção de 3,3, as demais fachadas possuem desempenho semelhante. A fachada vertical com melhor desempenho é a leste, com 1,73, seguida das fachadas norte com 1,75 e oeste com 1,76. Já em Recife, a fachada vertical com maior desempenho é a fachada oeste, que apresentou uma relação de 1,39, seguida das fachadas leste com 2,2, norte com 2,34 e, por último, a fachada sul com 2,69.

Palavras-chave: *Desempenho energético, EnergyPlus, Geração fotovoltaica aplicada em edificações*

Área temática: *Arquitetura e Energia Solar*

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

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE DIFERENTES TECNOLOGIAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS APLICADOS EM UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL VERTICAL

Henrique de Araujo Lauffer – henrique.lauffer@gmail.com
Georgia Andrade Tomaszewski – g_atomaszewski@hotmail.com
Fernanda Haeberle – fernandahaeberle@gmail.com
João Batista Dias – joaobd@unisinos.br
Paulo Roberto Wander – prwander@unisinos.br
Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica

Resumo. *Um grande desafio para edifícios sustentáveis é reduzir o consumo de eletricidade e, ao mesmo tempo, suprir sua demanda de energia com autogeração. A energia solar fotovoltaica é uma alternativa complementar aos sistemas energéticos tradicionais, por ser uma geração de energia limpa e com possibilidade de ser aplicada diretamente no local de consumo. O objetivo do trabalho é analisar a geração de energia elétrica em uma edificação típica residencial com um sistema fotovoltaico aplicado na envoltória e comparar o desempenho nas diferentes fachadas, localizações geográficas, tecnologias fotovoltaicas e analisar a performance de geração, utilizando para isso o software EnergyPlus. Os resultados mostram que a geração de eletricidade em fachadas não convencionais auxilia no suprimento da demanda e pode produzir energia suficiente para atender o consumo de energia elétrica da edificação. A partir dos resultados de geração, foram criadas relações entre a produção de energia elétrica por área na cobertura considerada ideal, versus a produção de energia elétrica por área em cada fachada vertical. Para Porto Alegre, com exceção da fachada sul, que apresentou uma proporção de 3,3, as demais fachadas possuem desempenho semelhante. A fachada vertical com melhor desempenho é a leste, com 1,73, seguida das fachadas norte com 1,75 e oeste com 1,76. Já em Recife, a fachada vertical com maior desempenho é a fachada oeste, que apresentou uma relação de 1,39, seguida das fachadas leste com 2,2, norte com 2,34 e, por último, a fachada sul com 2,69.*

Palavras-chave: *Desempenho energético, EnergyPlus, Geração fotovoltaica aplicada em edificações.*

1. INTRODUÇÃO

Em decorrência das mudanças climáticas e da escassez de matérias primas energéticas, o uso eficiente da energia, em especial a elétrica, está em pauta no mundo e fazendo com que sejam criados cada vez mais incentivos às fontes renováveis de energia e projetos de eficiência energética. Um dos principais objetivos é otimizar a cadeia energética a fim de diminuir a emissão de poluentes oriundos da queima de combustíveis fósseis.

As edificações dos setores residencial, comercial e público consumiram 48,7% da energia elétrica no mundo em 2017. (IEA, 2019). No Brasil, estas edificações foram responsáveis por 50,5% de participação no consumo de eletricidade no ano de 2018. (EPE, 2019). O grande desafio para as edificações é a redução do consumo de energia através de ações de eficiência e geração local. A eficiência energética das edificações tem como objetivo torná-las sustentáveis energeticamente, mantendo condições adequadas de conforto ambiental, além da produção de energia in loco a fim de suprir as próprias necessidades e eventualmente do entorno, reduzindo, assim, a demanda global. (CGEE, 2017).

A energia solar fotovoltaica é uma alternativa complementar aos sistemas energéticos tradicionais, por ser uma geração de energia limpa e com possibilidade de ser aplicada diretamente no local de consumo. É atualmente uma das alternativas mais promissoras para suprir o desenvolvimento energético da sociedade moderna. A energia gerada pelo Sol é considerada uma fonte de energia renovável, ou seja, inesgotável em escala terrestre tanto como fonte de luz, quanto de calor. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006), o Brasil possui altos índices de radiação solar em seu território. Os valores médios anuais de irradiação solar no plano horizontal em qualquer região do território brasileiro estão entre 4,2 e 6,7 kWh/m². (Pereira *et al*., 2006). A irradiação solar possui uma distribuição variável em função do dia, mês e localização geográfica.

A inclinação de um módulo em ângulo próximo à latitude local e orientado ao norte possibilita o maior aproveitamento da energia solar, isto devido à inclinação do eixo terrestre em relação à órbita solar. Quanto mais afastado do ponto ótimo relacionado a uma orientação ao norte e uma inclinação igual à latitude, o módulo recebe menos energia solar e consequentemente produzirá menos energia elétrica. Portanto, o posicionamento diferente do ideal, por motivos técnicos ou estéticos, acarreta em perdas no potencial de geração. (Burger e Rüther, 2006).

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da radiação em eletricidade, que é conhecido como efeito fotovoltaico, sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor. Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados basicamente em duas categorias principais: isolados ou conectados à rede.

A utilização de cada uma dessas opções dependerá da aplicação e/ou da disponibilidade de recursos energéticos. Os sistemas conectados à rede são aqueles em que a energia gerada pode ser entregue diretamente à rede elétrica da concessionária. O sistema de distribuição recebe a energia e, por meio de compensação, o consumidor pode utilizar esta energia em horários onde não há geração suficiente para suprir sua demanda energética. Nesta configuração, é indispensável que se utilize um inversor, o qual deve satisfazer as exigências de segurança e qualidade para que não degrade a rede elétrica na qual o mesmo está interligado.

Os módulos fotovoltaicos podem ser aplicados na cobertura ou envoltória das edificações de diferentes maneiras. Quanto integrados ao edifício (*Building-Integrated Photovoltaic - BIPV*), os módulos fotovoltaicos substituem ou complementam a estrutura da edificação, substituindo materiais tradicionais da envoltória. A integração fotovoltaica na edificação pode ser também adicionada/anexada ao edifício (*Building Added/Attached Photovoltaic - BAPV*), nestes casos, é comum haver algum suporte adicional de montagem e são os mais utilizados na instalação dos sistemas usuais e em *retrofit*. (Santos e Rüther, 2012). A aplicação ou integração da energia solar em edificações é dividida em cerca de 80% em coberturas e 20% em fachadas. Apesar da participação em fachadas ser inferior, estas superfícies apresentam um grande potencial ainda não explorado. Com a evolução dos módulos translúcidos de filmes finos, há possibilidade de aplicação em paredes do tipo pele de vidro para edificações comerciais. (Triparhy, Sadhu e Panda, 2016).

Sorgato, Schneider e Rüther (2017) realizaram um estudo onde comprovaram através de simulações que uma edificação comercial pode ter seu consumo de energia elétrica totalmente suprido através da integração de energia solar fotovoltaica de módulos de filmes finos de Telureto de Cádmio (CdTe) nas fachadas e cobertura para diversas cidades do Brasil. Os autores utilizaram o *EnergyPlus* para fazer a avaliação termo energética da edificação e utilizaram o software PVSyst como ferramenta para estimar a produção de energia.

Ordenes *et al*. (2006) analisaram uma edificação multifamiliar com geração fotovoltaica integrada em todas as superfícies opacas da envoltória, em cidades com baixa latitude, e comprovaram que, em aproximadamente 30% do ano, o sistema fotovoltaico gerou mais energia que a demanda do prédio e mostraram que, apesar de ser em baixa latitude e em posição vertical, a edificação produziu uma quantidade razoável de sua demanda. Para realizar a avaliação termo energética e a estimativa de produção foi utilizado o software *EnergyPlus*. Para a estimativa da energia, as diferentes tecnologias foram diferenciadas através de suas propriedades térmicas e da eficiência e, como parâmetro de entrada no software, foi calculada uma eficiência operativa para cada tecnologia.

Didoné, Wagner e Pereira (2014) investigaram, através de simulações, três edificações comerciais: um edifício protótipo, que representa as edificações atuais; outra sendo o caso otimizado, aplicando soluções de eficiência energética; e por último a integração de energia fotovoltaica, a fim de tornar a edificação com balanço de energia zero ou negativo. Os autores concluíram que após a aplicação de todas as ações de eficiência, a edificação apresentou uma redução de 50% do consumo anual, sendo necessária a integração da geração fotovoltaica para a obtenção de um balanço de energia nulo. O software *EnergyPlus* foi utilizado para avaliar o consumo e para estimar a produção anual de energia fotovoltaica através da eficiência corrigida a partir da temperatura operativa de diferentes tecnologias.

Este trabalho tem como objetivo analisar a geração de energia elétrica em uma edificação residencial típica com um sistema fotovoltaico aplicado na envoltória e comparar o desempenho de diferentes tecnologias de células fotovoltaicas, local da edificação, diferentes orientações e, analisar a performance de geração. Para isso, as simulações foram realizadas utilizando o software *EnergyPlus* para as cidades de Porto Alegre/RS e Recife/PE.

2. METODOLOGIA

A Fig. 1 demostra em (a) e (b), respectivamente, o modelo tridimensional projetado, sendo que em roxo estão representadas as áreas consideradas com geração, e o modelo do prédio contendo os módulos integrados nas fachadas e coberturas. Na cobertura foi considerado um espaçamento entre as fileiras de módulos a fim de um painel não produzir sombra em outro.

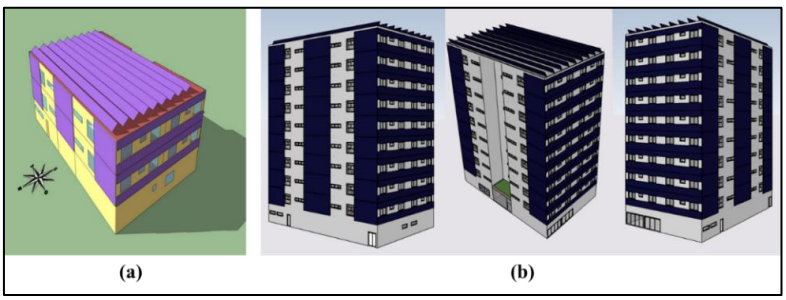

Figura 1 - (a) Modelo tridimensional da edificação com sistema fotovoltaico integrado e (b) Imagens da edificação típica residencial com BIPV.

A área da edificação em estudo possui um total de 4713,92 m². Para a simulação foram construídas 13 zonas térmicas em três pavimentos, sendo o primeiro pavimento a base do edifício que faz contato com o solo, onde se encontram zonas de áreas comuns e de serviço, como o hall de entrada, sala de serviço e manutenção e salão de festas. No segundo

pavimento foi construído um pavimento tipo (pavimento padrão), onde há quatro apartamentos iguais e um corredor com elevador, sendo este pavimento tipo repetido 8 vezes na simulação. Por fim, no terceiro pavimento, foram desenhados os mesmos ambientes do pavimento tipo, porém estes sendo a cobertura da edificação, apresentando o contato com as condições exteriores da simulação.

O programa de simulação computacional utilizado para gerar todos os dados necessários para as análises da edificação é o *EnergyPlus*. Este software foi selecionado por possibilitar a avaliação horária da geração fotovoltaica, consumo e utilização da energia, permitindo incluir os dados de geração fotovoltaica já aplicadas na edificação e sua influência nos demais indicadores de consumo. Também possibilita a análise da influência das diferentes regiões geográficas do território brasileiro de acordo com as localidades selecionadas através dos arquivos climáticos. Para realizar as análises da simulação com a aplicação da geração de energia elétrica, o método de cálculo do *EnergyPlus* escolhido para a simulação dos sistemas fotovoltaicos aplicados na edificação foi o *simple model*, uma vez que os outros métodos apresentam limitações nas opções de tecnologias.

Para esse estudo, os dados climáticos foram obtidos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), da Universidade Federal de Santa Catarina, e o tipo de formato escolhido foi o epw (*energyplus weather*), pois este é criado com o objetivo de ser especificamente para o *software* de simulação utilizado. Os dados são disponibilizados no tipo TRY (*Test Reference Year*), desenvolvido pelo *National Climatic Center*.

Para analisar a performance energética sobre a geração em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras realizou-se a simulação para duas cidades. A primeira sendo Porto Alegre/RS, localizada nas coordenadas 30º 01' 59" S e 51º 13' 48" W e escolhida devido ao estudo da envoltória da edificação estar baseado na tipologia construtiva desta região. A segunda cidade escolhida para realizar as simulações foi Recife/PE, localizada nas coordenadas 08º 03' 14" S e 34º 52' 52" W. A escolha deve-se a ser uma cidade com características climáticas bastante divergentes de Porto Alegre.

O sistema fotovoltaico a ser aplicado no edifício de estudo é um sistema conectado à rede, o qual foi dividido em cinco subsistemas, conforme descrito na Tab. 1, a fim de analisar seu comportamento por tipo de superfície: cobertura e fachadas norte, sul, leste e oeste. Apesar de se ter conhecimento que a fachada sul não tem um bom desempenho para geração solar, ela foi analisada no estudo apenas para quantificá-la, sem considerar a viabilidade financeira. Nas fachadas, os módulos serão instalados conforme a orientação da superfície e com inclinação de 90°, em relação ao plano horizontal. Já para a cobertura, a orientação e inclinação estão em sua orientação de referência, para o norte geográfico, e inclinação igual a latitude de cada localidade analisada.

Tabela 1 - Características dos subsistemas.

Sistema	Orientação	Inclinação (°)	Área Superfície (m²)	Área Instalada (m²)
Cobertura	Norte	30/10	471	255
Fachada Norte	Norte	90	733	468
Fachada Leste	Leste	90	411	301
Fachada Oeste	Oeste	90	411	301
Fachada Sul	Sul	90	546	280

As tecnologias fotovoltaicas escolhidas para simulação foram o silício monocristalino (c-Si), silício multicristalino (mc-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS). Através de uma pesquisa de módulos comerciais existentes foram selecionados fabricante e modelo para cada tecnologia. Na Tab. 2, são apresentados os dados básicos das diferentes tecnologias, incluindo a eficiência corrigida para cada módulo selecionado.

Tabela 2 - Características dos módulos fotovoltaicos utilizados na simulação.

Tecnologia	Fabricante/Modelo	Área do módulo (m²)	η_{STC} (%)	P_{STC} (W)	γ_{PM} (%/°C)	T_{NOCT} (°C)	η_{NOCT} (%)
Silício monocristalino	TallMax/TSM DD14A	1,94	19,3	375	0,39	45	17,8
Silício multicristalino	Jinko/JKM 295 PP	1,65	17,9	295	0,37	45	16,6
Silício amorfo	Schott Solar/ASI 107	1,45	7,4	130	0,20	49	7,1
CdTe	First Solar/FS-6445	2,47	18,0	445	0,32	45	16,8
CIGS	Eterbright/CIGS 3600A2	2,36	15,2	360	0,28	46	14,3

Os dados de eficiência, apresentados pelos fabricantes, levam em conta a condição padrão de teste (STC). Nesta condição, o módulo é testado com uma elevada irradiância, de 1000 W/m², em uma temperatura controlada de 25 °C e AM 1,5. Porém, esta condição raramente é encontrada em operação. Os módulos fotovoltaicos, quando submetidos a tal irradiância, normalmente apresentam temperaturas elevadas. Com o objetivo de se obter dados mais reais em relação as características operativas e da geração de energia de um módulo fotovoltaico, os fabricantes apresentam também características para condição normal de operação (NOCT), em que se considera uma irradiância de 800 W/m² e uma temperatura de célula em torno de 45 °C.

Uma das características operativas de módulos fotovoltaicos é o coeficiente de perda de potência máxima em relação ao aumento de temperatura, usualmente apresentado em %/°C. Este parâmetro é bastante utilizado para realizar o ajuste

da eficiência de um módulo, pois além de apresentar uma eficiência mais próxima do real para determinada temperatura, também pode diferenciar tecnologias devido a ser um coeficiente relacionado ao desempenho do tipo de módulo. A Eq. (1) apresenta o cálculo de correção da eficiência.

$$\eta_{NOCT} = \eta_{STC}\left[\frac{100 - (\gamma \Delta T)}{100}\right] \quad (1)$$

onde η_{NOCT} é a eficiência corrigida para uma temperatura de operação de 45 °C, η_{STC} é a eficiência na condição padrão de teste do módulo, γ é o coeficiente de perda de potência em relação a temperatura e ΔT é a diferença de temperatura, em °C, entre a condição padrão e a temperatura de operação do módulo.

A partir do arquivo climático e da simulação base, foram obtidos os dados de irradiância e de temperatura que incidem nas superfícies da edificação, e então, estimada a temperatura da célula, com base na Eq. (2).

$$T_C = T_{amb} + G\left[\frac{(T_{NOCT} - 20)}{800}\right] \quad (2)$$

onde, T_C é a temperatura da célula fotovoltaica, em °C, T_{amb} é a temperatura ambiente, em °C, e T_{NOCT} é a temperatura para condição nominal de operação fornecida pelo fabricante. Com os valores de temperatura da célula para cada valor de temperatura ambiente e de irradiância incidente, foi calculada a eficiência operativa utilizando a Eq. 1.

Para o cálculo da potência, o *simple model* do *EnergyPlus*, método utilizado para a simulação do sistema, utiliza a Eq. (3) para realizar a estimativa horária.

$$P = A_{surf} \times f_{activ} \times G \times \eta_{NOCT} \times \eta_{sistema} \quad (3)$$

onde P é a potência elétrica entregue à rede, em W, A_{surf} é a área da superfície dos módulos, em m², determinada no modelo tridimensional com o *SkecthUp* e *OpenStudio*, f_{activ} é o fator da área com células solares que é igual a um, G corresponde a irradiância, em W/m², e $\eta_{sistema}$ é a eficiência global do sistema. Para este método, foi utilizado como dado de entrada a eficiência corrigida. Um schedule de eficiência horária foi criado conforme a temperatura ambiente, a radiação incidente e parâmetros técnicos dos módulos fotovoltaicos. Neste modelo, também é necessário informar o desempenho do sistema, que inclui a eficiência do inversor e perdas em cabos e demais equipamentos entre o módulo e o medidor de energia. Neste estudo foi utilizado um desempenho de conversão total de 0,85 por estar entre os valores recomendados e utilizados em estudo similares a este, como em Zomer *et al*. (2011) e Didoné, Wagner e Pereira (2014).

3. RESULTADOS

3.1 Resultados da simulação do edifício base

O consumo médio mensal dos apartamentos simulados em Porto Alegre foi de 21,93 kWh/m²/ano e de 31,46 kWh/m²/ano em Recife. O consumo anual da edificação para a cidade de Porto Alegre é de 75,17 kWh, enquanto o consumo anual da edificação para a cidade de Recife é de 107,61 kWh, o que representa um aumento de 26,26%. O principal motivo desse acréscimo de consumo se deve ao maior uso de equipamentos de condicionamento de ar para refrigeração, necessários para manter as mesmas condições de temperatura no interior da edificação em relação à edificação simulada em Porto Alegre. Os consumos por mês e por tipo de uso final estão detalhados nas Fig. 2 e 3 para a cidade de Porto Alegre e de Recife, respectivamente.

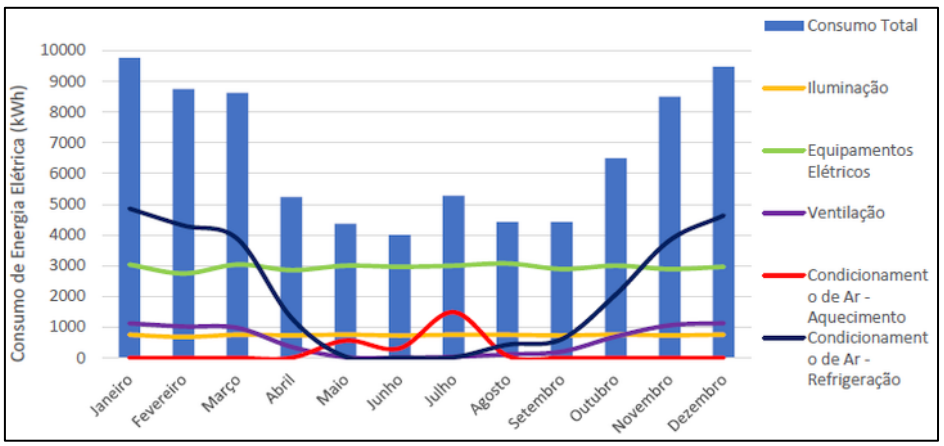

Figura 2 - Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Porto Alegre.

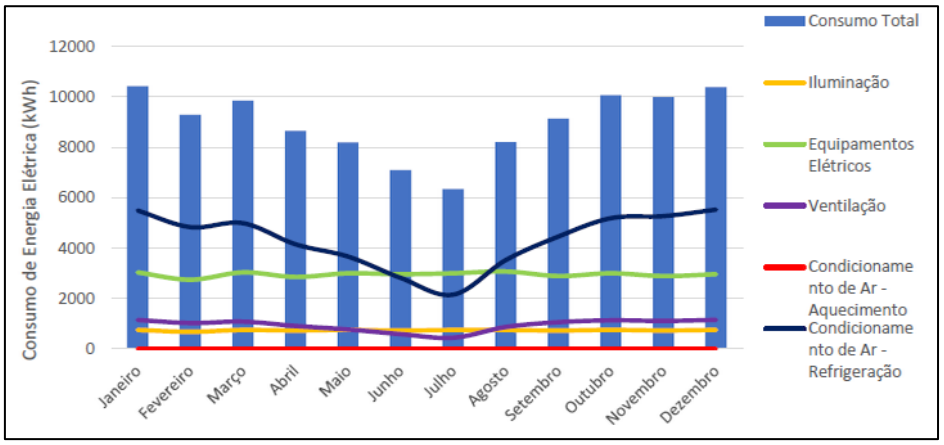

Figura 3 - Consumo de energia na edificação por mês e por tipo de uso final para Recife.

3.2 Resultados da análise de geração fotovoltaica

Para os dados de geração fotovoltaica, é considerado o resultado da energia elétrica entregue à rede, em corrente alternada, já considerando todas as perdas e a eficiência dos equipamentos de conversão. As Tab. 3 e 4 apresentam o consumo e a geração mensal por tipo de tecnologias, considerando geração em todos os subsistemas para Porto Alegre e Recife, respectivamente.

Tabela 3 - Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Porto Alegre.

	Consumo (kWh)	**Geração total por tecnologia (kWh) - Porto Alegre**				
Mês	**Consumo Edifício**	**c-Si**	**mc-Si**	**CIGS**	**CdTe**	**a-Si**
Jan	9.766	21.776	20.246	17.557	20.693	8.671
Fev	8.748	19.583	18.174	15.743	18.497	7.769
Mar	8.628	22.118	20.554	17.787	20.833	8.770
Abr	5.238	18.956	17.589	15.123	17.359	7.417
Mai	4.368	15.709	14.552	12.426	13.952	6.059
Jun	4.002	12.768	11.822	10.075	11.237	4.905
Jul	5.281	13.133	12.159	10.361	11.555	5.043
Ago	4.420	17.636	16.351	14.011	15.912	6.852
Set	4.424	18.456	17.111	14.663	16.661	7.171
Out	6.500	20.332	18.870	16.240	18.716	7.969
Nov	8.499	22.145	20.574	17.784	20.765	8.760
Dez	9.478	23.276	21.651	18.809	22.311	9.301
Total	**79.352**	**225.888**	**209.653**	**180.577**	**208.491**	**88.686**

Tabela 4 - Resumo do consumo e geração mensal de energia por tecnologia em Recife.

	Consumo (kWh)	**Geração total por tecnologia (kWh) - Recife**				
Mês	**Consumo Edificação**	**c-Si**	**mc-Si**	**CIGS**	**CdTe**	**a-Si**
Jan	10.421	21.253	19.769	17.174	20.179	8.494
Fev	9.279	18.737	17.431	15.150	17.798	7.496
Mar	9.853	20.509	19.070	16.544	19.450	8.174
Abr	8.645	19.854	18.454	15.986	18.805	7.889
Mai	8.185	19.988	18.570	16.059	18.903	7.915
Jun	7.089	17.965	16.682	14.395	16.959	7.082
Jul	6.344	15.742	14.615	12.601	14.850	6.196
Ago	8.207	19.090	17.736	15.333	18.051	7.554
Set	9.130	20.148	18.729	16.231	19.091	8.011
Out	10.070	20.684	19.238	16.706	19.634	8.259
Nov	9.995	20.395	18.969	16.472	19.359	8.144
Dez	10.389	20.982	19.519	16.961	19.928	8.390
Total	**107.606**	**235.346**	**218.782**	**189.613**	**223.006**	**93.603**

Os resultados para Porto Alegre demonstram que todas as tecnologias supriram a demanda da edificação no acumulado do ano. Já Recife, apesar de apresentar uma geração de energia maior, também apresenta um consumo maior.

A geração de energia proveniente das tecnologias de silício monocristalino, multicristalino, CdTe e CIGS supriram a demanda, porém, quando a envoltória foi coberta por módulos de silício amorfo, o sistema não foi suficiente para deixar a edificação autossuficiente no acumulado do ano. Para todas tecnologias, a geração foi maior em Recife, porém, em diferentes proporções. Para Porto Alegre os módulos com a tecnologia de mc-Si obtiveram a segunda maior produção, porém para Recife, a segunda maior geração foi com a utilização da tecnologia de CdTe. Essa variação ocorre devido às propriedades de cada tecnologia.

A Fig. 4 apresenta a variação entre o mínimo, máximo e a média da eficiência operativa das diferentes tecnologias ao longo do ano. Com o objetivo de obter a eficiência durante a operação real do sistema, foi considerado o mínimo de uma incidência solar horária de 100 W/m², desconsiderando os períodos da noite, início e fim do dia, em que as células apresentam temperaturas operativas baixas, obtendo uma eficiência maior, porém sem fins de geração. A variação é maior em Porto Alegre pois, nessa região, há dias com alta incidência solar e com temperaturas mais baixas, que aumentam a eficiência dos módulos. O mesmo ocorre nos dias com temperatura ambiente elevadas, que além da temperatura, a incidência solar aquece os módulos que atingem temperaturas operativas maiores, e com isso perdem mais eficiência.

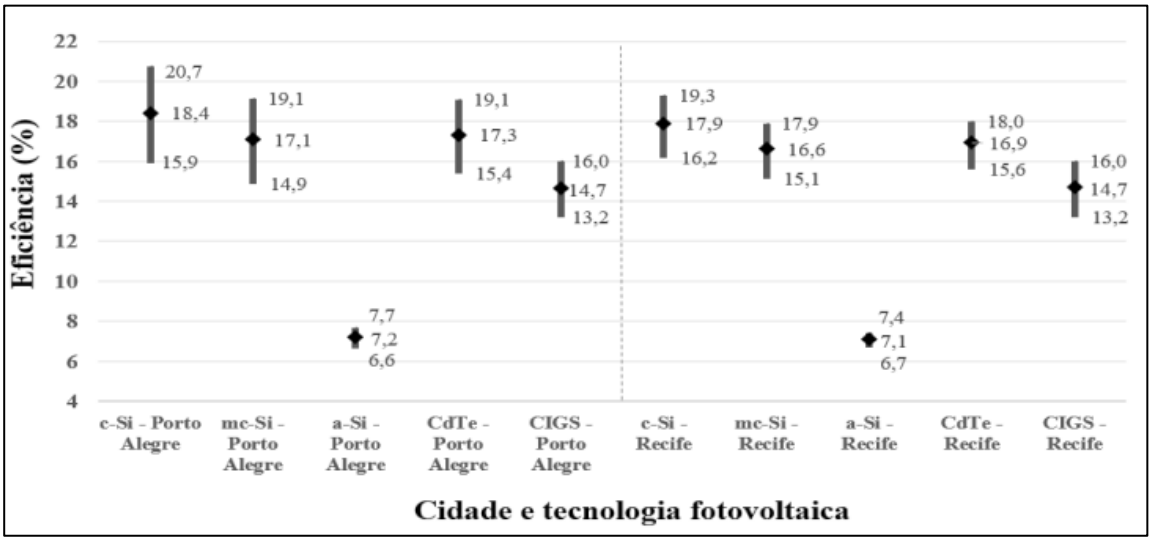

Figura 4 - Eficiência operativa mínima, máxima e média de diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicos ao longo do ano por cidade.

A fim de analisar o comportamento dos sistemas, também em relação a orientação, são apresentadas, na Tab. 5 e na Fig. 5, a geração de energia dos subsistemas. Para esta análise, foi escolhida a tecnologia de silício monocristalino, por ser uma tecnologia com grande participação no mercado, consolidada e com maior eficiência atualmente. É importante destacar que neste estudo foram consideradas para simulação a cobertura da edificação e todas as suas fachadas. Embora no Brasil a fachada sul não seja a orientação indicada para uma instalação fotovoltaica, ela foi considerada como parte do estudo para fins de comparação.

Tabela 5 - Geração de energia por subsistema para os módulos de silício monocristalino.

Tecnologia / Cidade	Sistema	Área (m²)	Participação na área total (%)	Geração (kWh)	Participação na geração (%)
Tecnologia de Silício Monocristalino (Porto Alegre)	Cobertura	255	15,9	60.337	26,7
	Fachada Norte	468	29,2	63.555	28,1
	Fechada Leste	301	18,8	41.297	18,3
	Fachada Oeste	301	18,8	40.519	17,9
	Fachada Sul	280	17,4	20.149	8,9
	Total c-Si	**1.605**	**100,0**	**225.857**	**100,0**
Tecnologia de Silício Monocristalino (Recife)	Cobertura	255	15,9	65.684	27,9
	Fachada Norte	468	29,2	51.515	21,9
	Fechada Leste	301	18,8	35.447	15,1
	Fachada Oeste	301	18,8	55.817	23,7
	Fachada Sul	280	17,4	26.884	11,4
	Total c-Si	**1.605**	**100,0**	**235.346**	**100,0**

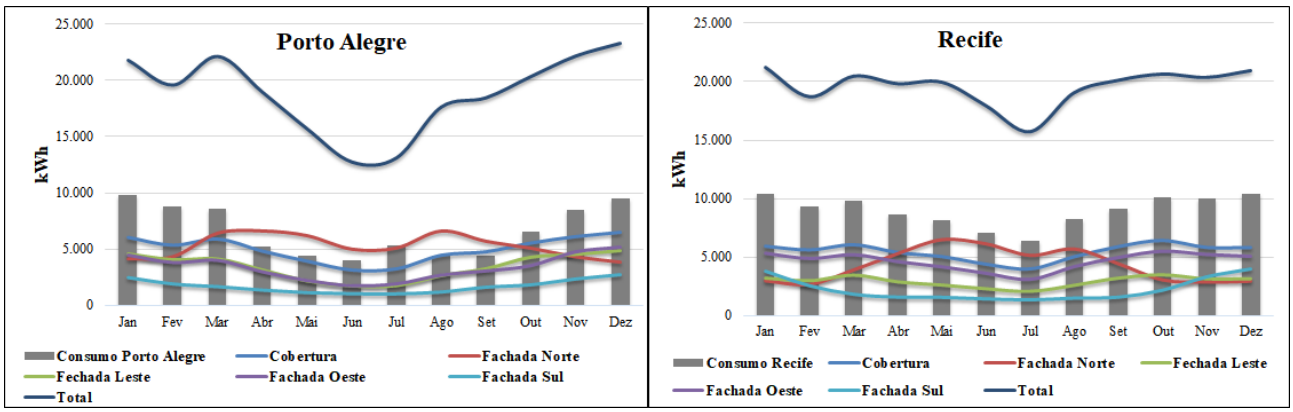

Figura 5 - Geração de energia mensal dos subsistemas com módulos de silício monocristalino para Porto Alegre e Recife.

Em Porto Alegre, nota-se que o subsistema que mais gerou energia foi a fachada norte com o equivalente a 28,1% da energia produzida, isto devido à área instalada deste subsistema ser a maior, representando 29,2% da área instalada na envoltória. Em seguida vem a geração da cobertura, com uma participação de 26,7%. A fachada leste representou 18,3% e a fachada sul, com a menor participação e área instalada, representou 8,9% do total gerado. A geração de energia total anual para Porto Alegre, incluindo todas as fachadas, foi de 225.857 kWh.

Para Recife, há diferenças nas participações do total gerado, o subsistema que mais entregou energia à rede foi a cobertura com o equivalente a 27,9% da energia produzida com uma área instalada que representa 15,9% da área instalada na envoltória. Já a geração da fachada oeste obteve uma participação de 23,7%, com uma participação de 18,8% na área instalada. Com isso, a fachada oeste apresentou um ótimo desempenho em relação às demais fachadas na vertical para Recife, pois produziu mais energia com menor área instalada. A fachada norte apresentou uma produção de 21,9% do total. A leste apresentou uma participação de 15,1% e, por fim, a fachada sul, com a menor participação, representou 11,4% do total gerado. A geração de energia total anual para Recife, incluindo todas as fachadas, foi de 235.346 kWh.

As Fig. 6 e 7 apresentam comparativos entre a geração de energia por área em cada superfície, em kWh/m². Para a elaboração dos gráficos dos dias médios, foram consideradas as médias de geração em um metro quadrado para cada horário do dia de acordo com o referente período escolhido, assim criando um dia médio para o ano e para cada estação.

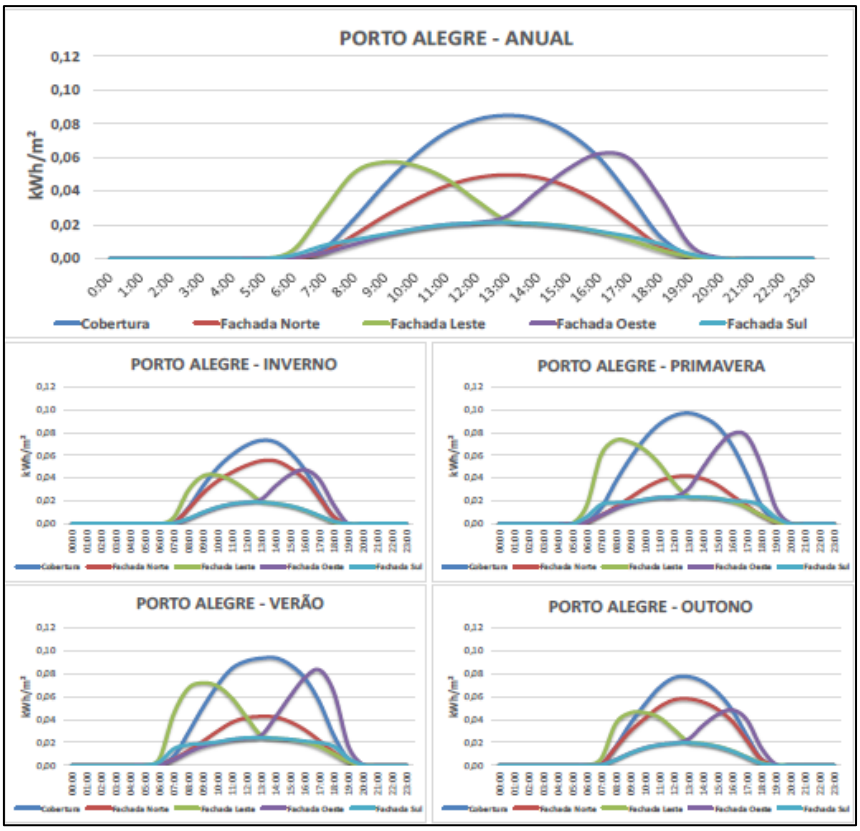

Figura 6 - Energia gerada em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Porto Alegre.

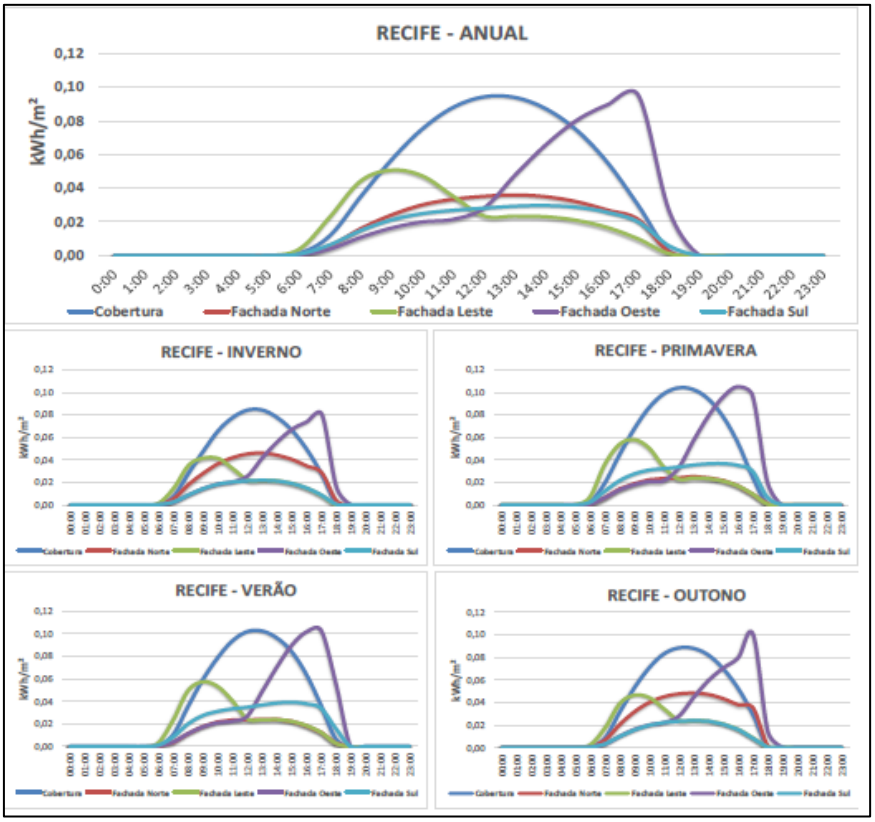

Figura 7 - Energia gerada em um metro quadrado por subsistema ao longo do dia médio para Recife.

Em Porto Alegre, a geração na cobertura apresentou o melhor desempenho ao longo de todo o ano, porém no inverno e outono, a fachada norte, apesar de estar na vertical, apresentou um desempenho semelhante à cobertura. Já as fachadas leste e oeste, ao longo do ano, possuem um desempenho equivalente ao instalado na fachada norte. Nota-se as diferenças devido a trajetória solar ao longo do ano, onde cada fachada tem um comportamento distinto ao longo das estações, sendo que no verão e na primavera, a geração na fachada sul se aproxima da fachada norte e as fachadas leste e oeste possuem um desempenho superior ao restante do ano.

Para Recife, além da cobertura, que é esperado ter um bom desempenho, destaque-se a fachada oeste como a melhor fachada vertical para a instalação, com um desempenho de 69% superior em relação a fachada norte, ao longo do ano. Este comportamento deve-se principalmente porque a irradiação na edificação se mantém elevada no período das 15 às 17 horas, onde soma-se com a trajetória solar que aumenta a geração em ângulos verticais e orientação oeste. Este efeito de irradiação elevada na fachada oeste para Recife é descrito nas Cartas Solares disponíveis no Anexo 1 do RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Residenciais) do PBE Edifica (2012). Também por consequência da latitude local e a trajetória solar, para Recife, a fachada sul obteve um desempenho superior em relação a norte, no verão e na primavera e, com isso, obteve um desempenho anual próximo a essa fachada. Para Porto Alegre, esse comparativo representou a maior diferença entre fachadas.

Sabe-se que em projetos reais e, principalmente, em edificações já existentes, onde se planeja o acoplamento de energia fotovoltaica na envoltória, não se dispõem de muita superfície útil para essa finalidade, tanto nas fachadas quanto na cobertura. Com a relação de kWh/m² produzido por ano em cada caso, pode ser criada uma relação entre a orientação da fachada versus a geração máxima, que neste caso foi considerada a geração na cobertura com inclinação próxima da ideal. Por fim, consegue-se apresentar uma estimativa de área necessária para suprir a demanda de energia do edifício residencial proposto em cada subsistema. Estas relações podem ser utilizadas como estudos rápidos e preliminares, com base na área disponível nas fachadas e no consumo do edifício para avaliar a geração potencial de uma edificação. Porém, deve-se levar em conta módulos eficientes com eficiências próximas as apresentadas neste estudo para uma melhor comparação. Estas relações podem ser utilizadas também como índices de adaptação de projeções de geração já estimadas para um caso em cobertura para a geração em uma das fachadas.

Analisando os dados obtidos, nota-se que as proporções da geração anual de energia elétrica por área nas fachadas versus a condição teoricamente ideal entre as diferentes tecnologias fotovoltaicas para a mesma cidade variam pouco. Com isso, é possível criar uma relação média entre as fachadas e determinar o comportamento médio de todas as tecnologias estudadas neste trabalho, pois ambas possuem uma semelhança entre os resultados quando analisadas nas mesmas condições. Para simplificar os resultados, foi realizada uma relação média das gerações das tecnologias para cada cidade, Fig. 8, por fachada, e considerando a geração em todos subsistemas. Quanto menor for o índice de relação, mais

próximo da geração ideal a fachada irá estar, portanto, quanto menor o índice, melhor o desempenho, e menor será a área necessária para a mesma geração de energia elétrica.

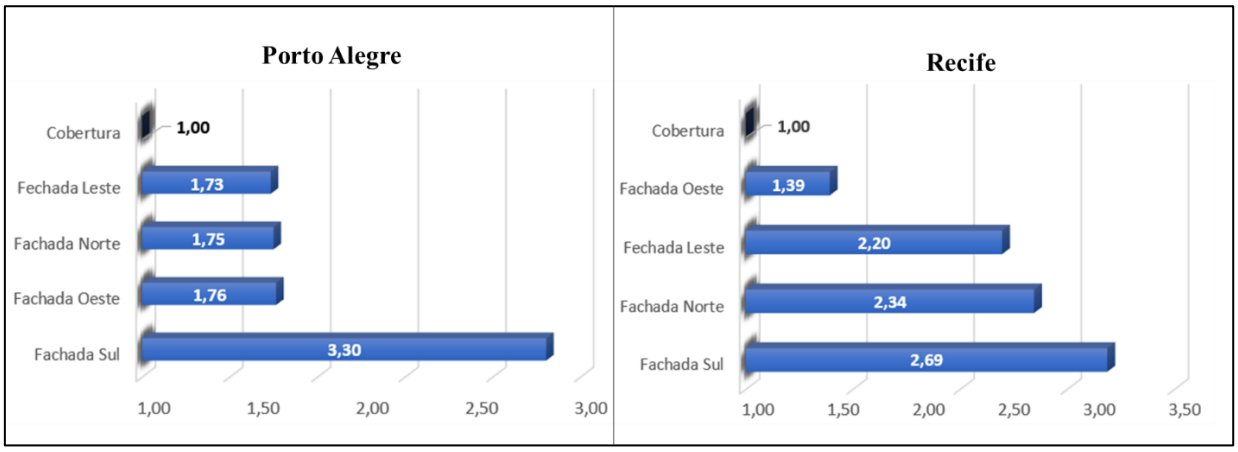

Figura 8 - Relação de geração de energia das fachadas versus a orientação ideal nas fachadas da edificação para Porto Alegre e Recife.

Para Porto Alegre, as fachadas norte, leste e oeste possuem desempenho semelhante ao longo do ano, portanto podem ser levadas em conta de forma igual em projetos, dando preferência para instalações na cobertura. A fachada sul apresenta um desempenho 3,3 vezes abaixo de uma geração na cobertura, confirmando que no Brasil tal orientação não é recomendada pois para uma mesma geração, necessitaria de 3,3 vezes mais área instalada, o que levaria ao projeto possuir um custo muito maior.

Para Recife, a fachada oeste apresentou uma relação de 1,39, o que torna esta alternativa interessante quando uma edificação não possuir área em cobertura suficiente ou desejar complementar a geração com a utilização de uma fachada vertical que dispõe de área útil para instalação dos módulos. Já as fachadas norte, leste e sul possuem índices superior a 2, o que dobra a área necessária instalada de módulos e que significaria um custo muito mais elevado por energia produzida, o que provavelmente implicaria em uma inviabilidade financeira.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou análises do desempenho de uma edificação típica residencial, através de dados obtidos em simulações utilizando o software *EnergyPlus*. Foi desenvolvida uma edificação e padrões de uso típico residencial, a fim de criar uma edificação e quantificar ao longo do ano seu consumo. No trabalho, foram comparados os resultados para duas cidades, Porto Alegre e Recife.

A cidade de Recife apresentou um consumo de energia elétrica superior quando comparado a Porto Alegre, principalmente devido ao uso de condicionamento de ar, isto devido as características climáticas da cidade. Estas mesmas condições foram responsáveis por Recife apresentar um melhor desempenho na produção de energia elétrica através dos mesmos módulos fotovoltaicos de todas tecnologias aplicados em Porto Alegre.

Com o modelo de edificação simulado, foi proposto um sistema conectado à rede, dividido em cinco subsistemas, cada um para uma orientação de fachada vertical e um para a cobertura. No total, a edificação apresentou um sistema com 1605 m² de área instalada de módulos fotovoltaicos, e foram simuladas as tecnologias c-Si, mc-Si, a-Si, CdTe e CIGS. Para a cidade de Porto Alegre, todas as tecnologias estudadas apresentaram uma produção de energia elétrica suficiente para suprir a demanda da edificação, enquanto para a cidade de Recife, apenas a tecnologias a-Si não produziu energia suficiente para suprir a demanda. Portanto, levando-se em conta as tecnologias já consolidadas no mercado e com a atual eficiência de mercado, é possível uma edificação residencial se tornar autossuficiente com a geração fornecida por suas fachadas, dependendo da área disponível para este fim.

A tecnologia que apresentou a maior geração de energia em Porto Alegre foi a de silício monocristalino, cuja produção média anual foi de 140,7 kWh/m². A tecnologia que apresentou a segunda maior geração foi a de silício multicristalino com 130,6 kWh/m², em seguida a CdTe com 129,9 kWh/m², em quarto a CIGS com 112,5 kWh/m² e por último os módulos da tecnologia de silício amorfo com 55,2 kWh/m². Para Recife, a maior geração de energia também foi a de silício monocristalino, cuja produção média anual foi de 146,6 kWh/m². A tecnologia que apresentou a segunda melhor geração foi a CdTe com 138,9 kWh/m², em seguida a mc-Si com 136,6 kWh/m², em quarto a CIGS com 118,1 kWh/m² e por último os módulos de silício amorfo com 58,3 kWh/m². Apesar da tecnologia CdTe apresentar uma eficiência inferior de catálogo em STC em relação à de silício multicristalino, quando analisada a geração em modo operativo, esta tecnologia supera em geração de energia devido ao seu coeficiente de perda por temperatura ser inferior em relação ao módulo multicristalino.

Para as análises referentes às orientações, cada cidade obteve particularidades devido à latitude local. Para ambas, foi considerada como ideal a geração na cobertura com inclinação sugerida. A partir desta geração, foi apresentada uma relação de área necessária para que cada fachada produzisse a mesma energia que a cobertura.

Para Porto Alegre, com exceção da fachada sul que apresentou um desempenho de 3,3, as demais fachadas possuem desempenho muito semelhante, sendo que a fachada vertical com melhor desempenho foi a leste com 1,73, seguida da fachada norte com 1,75 e da fachada oeste com 1,76. Já em Recife, a melhor fachada vertical é a fachada oeste, que apresentou um desempenho de 1,39, seguida das fachadas leste com 2,2, norte com 2,34 e por último a fachada sul com 2,69. A fachada oeste para Recife apresentou o melhor desempenho em uma fachada vertical para as simulações com valor de 1,39, apesar do maior dimensionamento e da complexidade de instalação vertical, é uma alternativa para as edificações onde não há cobertura suficiente disponível para geração.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001e da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

REFERÊNCIAS

IEA - International Energy Agency, 2019. Key World Energy Statistics. Paris.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2019. Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018. Rio de Janeiro.

PBE Edifica - Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações, 2012. Regulamento técnico da qualidade para edificações residenciais.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética. Brasília.

Pereira, E. B. *et al*., 2006. Atlas brasileiro de energia solar. Instituto Nacional de Pesquisas espaciais - INPE. São José dos Campos, pp. 60.

Burger, B.; Rüther, R., 2006. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. Solar Energy, vol. 80, Issue 1, pp. 32-45.

Santos, Í. P.; Rüther, R.; 2012. The potential of building-integrated (BIPV) and building-applied photovoltaics (BAPV) in single-family, urban residences at low latitudes in Brazil. Energy and Buildings, pp. 290-297.

Triparhy, P. K.; Sadhu, S. K.; Panda, A., 2016. A critical review on building integrated photovoltaic products and their application. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 61, pp. 451-465.

Sorgato, M. J.; Schneider, K.; Rüther, R., 2017. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office building in a warm and sunny climate. Renewable Energy, pp. 84-98.

Ordenes, M. *et al*., 2006. The Impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. Energy and Buildings, pp. 629-642.

Didoné, E. L.; Wagner, A.; Pereira, F. O. R., 2014. Estratégias para edifícios de escritório energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 14, pp. 27-42.

Zomer, C. D. *et al*., 2011. Compromissos entre forma e função de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações e conectados à rede em baixas latitudes. VII ELACAC, Búzios, RJ, pp. 1-10.

SIMULATION AND ANALYSIS OF DIFFERENT PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES MODULES APPLIED IN A VERTICAL RESIDENTIAL BUILDING

Abstract. *A great challenge for sustainable buildings is to reduce electricity consumption and at the same time supply their own energy demand with self-generation. Photovoltaic solar energy is a complementary alternative to traditional energy systems, as it is a clean energy generation with the possibility of being applied directly in the place of consumption. This work aims to analyze the energy behavior of a residential building with solar photovoltaic energy generation applied in the envelope and to compare the performance of different technologies of photovoltaic cells, building site, different orientations and evaluate the possibility of this generation to supply the typical consumption of a residential building. The simulations were performed using the software EnergyPlus. The results showed that the generation of electricity in façades is not an aid in the supply of the demand and can generate sufficient energy to supply the consumption of electrical energy of the building. From this generation considered the ideal, a relation between generation by area in the roof, considered ideal, was created versus generation by area in each vertical facade. For Porto Alegre, with the exception of the south façade that presented a ratio of 3.3, the other façades have very similar performance, the vertical façade with the best performance is to the east, with 1.73, followed by the north with 1.75 and west with 1.76. In Recife, the vertical façade with the better performance is the west, which had a ratio of 1.39, followed by the east façade with 2.2, the north with 2.34 and finally the south façade with 2.69.*

Key words*: Energy performance, EnergyPlus, Photovoltaic generation applied in buildings.*