POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM RESIDÊNCIAS UNIFAMILIARES EXISTENTES

Joana Sanagiotto Pastre (1); Bruno Lauffer Pereira Rosa (2) Kimberly Gabriela Angelo Dias (3) Leandro Carlos Fernandes (4) Márcio José Sorgato (5)

(1) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, joanapastre@ufpr.br, Universidade Federal do Paraná.

(2) Graduando do curso de Arquitetura e Urbanismo, brunolaufferpr@gmail.com, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

(3) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, kimberly.ufpr@gmail.com, Universidade Federal do Paraná.

(4) Doutor, Arquiteto e Urbanista, fernandes.ufpr@gmail.com, Universidade Federal do Paraná.

(5) Doutor, Arquiteto e Urbanista, sorgato@utfpr.edu.br, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Universidade Federal do Paraná – UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR, 81530-000. Tel: (41) 3360-5000.

RESUMO

O presente estudo pretende avaliar o potencial de integração de sistemas fotovoltaicos (FV) em edificações residenciais no Sul do Brasil, sem alterações arquitetônicas nas mesmas. Assim, as etapas se dividiram em levantar as três edificações a serem requalificadas, bem como o perfil de consumo de cada família. A segunda etapa consistiu na análise prévia da metragem quadrada necessária para suprir o consumo de cada família, bem como a definição do módulo fotovoltaico a ser utilizada. A terceira etapa consistiu na compilação e alimentação desses valores no software de simulação SAM, gerando os valores de consumo versus geração de cada unidade habitacional estudada. Por fim, uma nova simulação foi realizada considerando os valores ótimos de azimute e inclinação do telhado, com o objetivo de comparar os valores com a mínima intervenção arquitetônico com o cenário ideal. Como resultado, obteve-se que as residências A e B atenderam as suas demandas, enquanto a residência C não conseguiu suprir a totalidade. Este resultado está relacionado com o fato de a residência C não apresentar área de telhado útil para todo o sistema fotovoltaico necessário, além do fato de que a quantidade de radiação na região é menor do que a das outras edificações.
Palavras-chave: eficiência energética, edifício de energia zero, simulação computacional, fotovoltaica.

ABSTRACT

The present study intends to evaluate the integration potential of photovoltaic (PV) systems in residential buildings in the South of Brazil, without architectural changes. Therefore, the phases were divided into evaluating the three buildings to be refurbished, as well as the consumption profile of each family. The second stage consisted of a prior analysis of the square footage needed to supply the consumption of each family, as well as the definition of the photovoltaic module. The third stage consisted of compiling and feeding these values into the SAM simulation software, generating consumption versus generation values for each studied housing unit. Finally, a new simulation was carried out considering the excellent values of azimuth and roof slope, in order to compare the values with the minimum projected intervention with the ideal scenario. As a result, THE residences A and B met their demands, while residence C was unable to supply all of it. This result is related to the fact that house C does not have a usable roof area for all the necessary photovoltaic system, in addition to the fact that the amount of radiation in the region is lower than that of other two buildings.
Keywords: energy efficiency, zero energy building, computer simulation, photovoltaic.

1. INTRODUÇÃO

A última década ficou marcada por um avanço na geração de energia local, movida principalmente pela produção fotovoltaica. Segundo o Relatório do Balanço Energético Nacional de 2022, as edificações foram responsáveis por quase 50% do consumo de energia elétrica, sendo que o setor residencial foi responsável por metade deste montante, com um consumo de 26,4% (EPE, 2022). Quando analisada a energia produzida localmente, constata-se que, em 2021, 88,3% da energia produzida no Brasil foi resultado da fonte solar(EPE, 2022). Esse cenário é impulsionado pelo aumento gradual do custo da energia elétrica, ao mesmo tempo em que os sistemas fotovoltaicos estão ficando mais eficientes e baratos, corroborando com o desafio de tonar a matriz energética brasileira mais sustentável, diminuindo os impactos das emissões de carbono (SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).

Considerando a adição do sistema em edificações já construídas, nesse caso realizando a transição para uma ZEB ou nZEB, o sistema fotovoltaico apresenta uma facilidade na aplicação sobre o envelope, visto que a própria forma dos módulos apresenta uma boa integração com os planos arquitetônicos que compõe a edificação, resultando em uma alteração mínima no conceito formal proposto pelo projetista (M. PROBST; C. ROECKER, 2012).

A viabilidade de Sistemas Fotovoltaicos aplicados no envelope de edificações tem sido objeto de uma série de estudos. Oliveira et al., (2019) analisaram a viabilidade técnica e econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede em edificações residenciais multifamiliares em Brumadinho, MG. Como resultado, constatou-se que o sistema instalado foi suficiente para suprir cerca de 70% do consumo eletricidade da edificação.

Silva e Sorgato investigaram o potencial de integração de sistemas FV em edificações residências em Campo Grande/MS, por meio de simulação computacional no SAM. Os resultados comprovaram que as edificações residenciais têm grande potencial de integração de sistemas FV, possibilitando as edificações gerarem as próprias demandas energéticas, mostrando que as residências podem se tornar unidades geradoras de eletricidade para a rede de distribuição de energia.

A análise realizada por Nakabayashi, (2014) buscou estudar o potencial da geração elétrica das 27 capitais brasileiras, por meio de um sistema fotovoltaico conectado à rede. Os resultados mostraram que em 2015, a viabilidade média foi de 62,1%, chegando a 90,1% no ano de 2020.

Pereira et al., (2020) analisaram a integração de sistema fotovoltaicos em edificações de ensino, avaliando o desempenho de duas tecnologias de células fotovoltaicas, por meio de simulação computacional no SAM. Os resultados mostraram que o desempenho dos sistemas FV da tecnologia de filme fino (Telureto de cádmio) foram superiores aos sistemas FV com células de silício poli-cristalino.

Schultz et. al., (2021) , analisaram a viabilidade econômica da implantação dos sistemas fotovoltaicos em edificação multifamiliares de interesse social em Belo Horizonte, MG. Como resultado, obteve-se que uma área reduzida de 7,00m² (cobertura da edificação), seria suficiente para cobrir o consumo de 20 apartamentos, gerando uma economia média mensal de cerca de 80%.

A pesquisa de Santos (2009) mostrou que, somente no Bairro de Santa Mônico, em Florianópolis-SC, o total de 496 residências levantadas apresentava área de telhado disponível para a instalação de um sistema fotovoltaico, além do fato de a inclinação destes já apresentarem valores satisfatórios para uma produção bem próxima ao máximo possível daquela região.

Em uma simulação realizada para sistemas fotovoltaicos já em operação, Zomer (2014) mostraram que apenas 15% de toda energia produzida era suficiente para suprir a demanda de toda a edificação do Centro de Pesquisa em Energia Solar da UFSC.

Além disso, o montante de energia produzido em uma ZEB está diretamente ligado à disponibilidade de radiação solar. De acordo com o Atlas brasileiro de energia solar (PEREIRA et al., 2017)a capital Paranaense está entre as cidades que apresentam os menores índices de radiação solar do país. Porém, apresenta um grande potencial de geração solar fotovoltaica, uma vez que apresenta uma população de quase 1,9 milhão de habitantes (IBGE, 2022).

Nesse cenário, o conceito da edificação de energia zero (ZEB) pode contribuir para limpar a matriz energética elétrica brasileira, já que a fonte principal de energia destas edificações é a solar, recurso extremamente abundando no Brasil (RÜTHER, 2004), visto que, segundo Sorgato et. al (2018) , as edificações apresentam um grande potencial para produzir a sua própria energia, revertendo o cenário em que as edificações se apresentam apenas como consumidoras.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é avaliar o potencial de integração de sistemas fotovoltaicos para atender a demanda energética em edificações residenciais unifamiliares localizadas na Região Sul do país.

3. MÉTODO

O desenvolvimento deste trabalho foi estruturado em três etapas: 1 - Análise do perfil de consumo das residências; 2 - Análise da integração e pré-dimensionamento dos sistemas FV nas coberturas das edificações; 3 - Levantamento do perfil de consumo, avaliação dos dados de radiação, dimensionamento e simulação do sistema fotovoltaico. Conforme pode ser observado na Figura 1:



Figura 1 – Etapas do desenvolvimento da pesquisa

3.1 Análise do perfil de consumo das residências

Os consumos de eletricidade foram levantados por meio das faturas das distribuidoras de energia, por um período de 12 meses. O consumo de eletricidade foi convertido para energia primária, considerando um fator de conversão de 0,78. Também foram levantados os consumos de gás (GLP) e de combustível utilizado pelo automóvel da residência. O consumo de gás, foi convertido para kWh, utilizando um fator de conversão de 13,8 kWh por kg de GLP. Em relação ao consumo de combustível, considerou-se a média mensal de quilômetros rodados . Com base nos quilômetros rodados, foram estimados os consumos de eletricidade para substituir o veículo a combustão por um veículo elétrico, considerou-se uma recarga de 40 kWh para 400 km rodados.

3.2 Análise da integração e pré-dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos nas coberturas das edificações

Para avaliar a integração dos sistemas fotovoltaicos nas coberturas das edificações, observou-se a orientação e a inclinação da cobertura, a disponibilidade da área e os elementos que geram sombra da cobertura. As análises foram realizadas por meio de modelos tridimensionais.

Após a seleção dos planos inclinados das coberturas, estimou-se a disponibilidade de irradiação solar global na superfície da cobertura, considerando a orientação e a inclinação da cobertura. A estimativa da irradiação solar no plano inclinado foi calculada por meio do programa Radiasol (UFRGS, 2023). O programa calcula a irradiação solar no plano inclinado, com base nas coordenadas geográficas, dados de irradiação global horizontal do local, orientação e inclinação proposta para o sistema FV.

Os dados de irradiação global horizontal foram extraídos da base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar, disponibilizado na página eletrônica do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia – LABREN. A Tabela 1 apresenta a irradiação global horizontal das latitudes e longitudes referentes as residenciais desta pesquisa.

Tabela 1 – Irradiação global horizontal referente as localidades das residências (kWh/m²)

Residência	Latitude e Longitude	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Residência A	25°40’ S 49°24’ W	4,658	4,717	4,333	3,819	3,199	2,998	3,124	4,107	3,704	4,031	4,723	4,948	**4,03**
Residência B	25°53’ S 49°29’ W	4,946	4,912	4,564	4,095	3,465	3,227	3,41	4,410	3,970	4,313	4,900	5,092	**4,27**
Residência C	26°77’ S 48°64’ W	5,735	5,436	4,669	3,682	3,027	2,520	2,617	3,263	3,501	4,249	5,405	5,786	**4,15**

Os sistemas fotovoltaicos foram pré-dimensionados com base na média de consumo de eletricidade diário da edificação, a irradiação global da superfície da cobertura (plano inclinado) e o rendimento do sistema fotovoltaico, conforme a Equação 1. O pré-dimensionados foi realizado para dois cenários, o mês com menor nível de irradiação global horizontal e para média anual de irradiação global horizontal.

$$P_{cc} = \frac{(E/G_{poa})}{R}$$ Equação 1

Na qual:

Pcc: *Potência nominal do sistema fotovoltaico – kW_{Pcc};*
E: *Consumo de eletricidade diário da edificação;*
G_{poa}: *Irradiação global no plano inclinado;*
R: *Rendimento do sistema fotovoltaico a 80%.*

3.3 Simulação de desempenho dos sistemas fotovoltaicos propostos

Os sistemas fotovoltaicos foram modelados e simulados no programa *System Advisor Model* – SAM (BLAIR et al., 2018). O SAM possibilita a simulação de sistemas FV conectados à rede ou isolados. As simulações podem ser realizadas por meio de arquivos climáticos, ou dados climáticos disponibilizados na base de dados: *National Solar Radiation Database* (NSRDB). Para as simulações deste trabalho, foram utilizados os dados climáticos da base NSRDB, disponíveis no disponíveis no programa SAM.

Os sistemas fotovoltaicos foram simulados com módulos de silício mono cristalino (Mono-c-Si), tecnologia com maior produção nos últimos anos, responsável por 94% da produção mundial(FRAUNHOFER, 2023). Os sistemas propostos foram integrados nos planos inclinados das coberturas das edificações, verificando a compatibilidade entre a área disponível e área de módulos FV necessários. As características dos módulos selecionados constam na Tabela 2.

Tabela 2 – Módulos fotovoltaicos utilizados nas simulações dos sistemas fotovoltaicos propostos.

Edificação	Fabricante/ Módulo FV	Potência (W)	Tecnologia FV	Vmp (W)	VVoc (V)	IIsc (A)	Eficiência (%)	Dimensões (mm)
Resid. A	SunPower SPR-A390	390W	Mono-c-Si	39.0	48.0	10,8	20,85	1.000x1.870
Resid. B	SunPower SPR-X21-350	350W	Mono-c-Si	57.3	68.2	6.5	21,47	1.000x1.630
Resid. C	SunPower SPR-X22-360	360W	Mono-c-Si	60.6	69.5	6.5	22,07	1.000x1.630

Os inversores selecionados para os sistemas fotovoltaicos são da topologia *string* e *multi-string,* as características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Inversores fotovoltaicos utilizados nas simulações dos sistemas fotovoltaicos propostos.

Edificação	Fabricante/ Inversor	Potência em CA (Wac)	Eficiência (%)	Intervalo de tensão (V)	MPPT
Resid. A	SunPower SPR-5000m [240V]	5.000	95,57	100 - 480	1
Resid. B	SMA America: SB7000TL-US [240V]	7.000	98,20	100 - 480	1
Resid. C	SMA America: SB5.0-1SP-US-40 [240V]	5.000	96,90	220 - 480	1

A Tabela 4 apresenta as perdas modeladas nos sistemas fotovoltaicos. Abaixo são apresentadas as perdas adotadas na simulação. Esse passo é necessário uma vez que há situações em que existem perdas consideráveis que influenciam no desempenho do sistema, como é o caso das perdas por sujeira que impactam diretamente na geração de energia.

Tabela 4 – Detalhes das perdas adotadas nas simulações no SAM.

Diodos e conexões	Mismatch	Degradação por exposição	Indisponibilidade do sistema	Transmissão	Sujeira	Fiação CA	
						CA	CC
0,5%	2%	0%	0%	0%	3,83%	1%	2%

O desempenho dos sistemas fotovoltaicos foi avaliado por meio dos indicadores de *Yield* (produtividade) é a fração entre a geração do FV pela potência nominal do sistema FV, *Performance Ratio* (PR – Taxa de desempenho) mede a qualidade do sistema FV, relacionando o desempenho real versus o ideal e a geração

anual do sistema. O desempenho dos sistemas propostos foram comparados com o desempenho de um sistema nas condições ideais, orientado a norte e inclinação do sistema igual a latitude local.

4. RESULTADOS

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foram simulados para duas situações: a primeira condição considerando o ângulo de inclinação e o desvio azimutal da cobertura e a segunda condição com ângulo de inclinação igual a latitude local e o desvio azimutal zero, ou seja, a condição ideal para melhor rendimento do sistema fotovoltaico.

4.1. Análise das características das residências e levantamento dos consumos de energia

As edificações analisadas são residências unifamiliares em alvenaria de dois pavimentos, contendo sala de estar, banheiros, dormitórios, cozinha, lavanderia e garagem. Elas estão localizadas na região Sul do Brasil nas coordenadas 25,40 S (latitude), 49,24 O (longitude); 25,53 S (lat.) 49,29 O (long.) e 26,77 N (lat.) 48,64 O (long.) . Todas as residências possuem automóvel e o número de moradores variou entre dois a quadro ocupantes (Tabela 5). Na residência A o perfil de moradores corresponde a dois adultos. Um deles trabalha fora e o outro em home office. As refeições são feitas parcialmente em casa. Na residência B é habitada por uma família de quatro pessoas, sendo três adultos e uma criança. Dois adultos trabalham fora, um dos adultos permanece na residência durante o dia, a criança estuda no período da manhã e todas as refeições são feitas em casa. A residência C também é habitada por uma família de quatro pessoas, todos adultos. A maioria das refeições é feita em casa e somente um dos adultos permanece na residência no período da manhã, o restante trabalha fora. A tabela 3 mostra as características de cada residência unifamiliar:

Tabela 5 - Características de ocupação e de equipamentos das residências unifamiliares

Edificação	Moradores	Chuveiros elétricos	Chuveiros aquec. GLP	Ar-condicionado	Automóveis
Residência A	2	0	2	1	1
Residência B	4	1	1	0	1
Residência C	4	2	0	0	1

As residências A e B possuem sistema de aquecimento de água para chuveiro a gás (GLP-gás liquefeito de petróleo). Todas as residências utilizam gás GLP para cocção e o combustível utilizado nos veículos é a gasolina. A residência A possui climatização artificial do ar em um dormitório. Os consumos de eletricidade referente aos doze meses do ano são apresentados na Tabela 6. Observa-se que a residência A apresentou a menor média diária de consumo de eletricidade (4,12 kWh/dia), entretanto, a residência C resultou na maior média diária de eletricidade (15,2 kWh/dia), e o consumo da residência B foi aproximadamente o dobro da residência A.

Tabela 6 - Consumo de energia elétrica das residências – (kWh)

Edificação	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média Diária	Consumo Anual
Res. A	81	113	181	140	117	122	122	122	119	120	107	163	4,12	1.507
Res. B	107	204	244	239	222	243	200	264	351	359	295	363	9,40	3.091
Res. C	330	434	431	442	512	515	444	549	504	517	457	414	15,2	5.549

O consumo de eletricidade das residências foi convertido em energia primária, considerando um fator de conversão de 0,78, que está baseado na participação das fontes renováveis da matriz de eletricidade do Brasil. O consumo de energia para cocção e deslocamento com automóvel foram convertidos para eletricidade, com o objetivo de analisar a viabilidade de converter estes usos para eletricidade.

Observa-se na Figura 2 que a residência C possui o maior consumo de eletricidade 7.114 kWh/ano, resultando em um consumo de eletricidade per capita de 1.778 kWh/pessoa no ano e um consumo de 68,63 kWh/m².ano. A residência B apresentou o maior consumo de gás e combustível, com um consumo de 156 kg gás GLP durante o ano, resultado em um consumo equivalente de 2.153 kWh/ano. O uso do automóvel na residência B é de 21.600 km por ano, resultando em um consumo equivalente de 2.160 kWh/ano, que refere-se aproximadamente a uma recarga de um veículo elétrico por semana (considerando 40 kWh para rodar 400 km). A residência A resultou em um consumo de energia 4.291 kWh/ano, resultando em um consumo total (eletricidade/equivalente gás/equivalente combustível) per capita de aproximadamente 2.145 kWh/ano,

resultando em um consumo de 4% superior a residência B e 6% inferior a residência C. Comparando o consumo de eletricidade por metro quadrado (ano), a residência A apresenta o maior indicador 68,63 kWh/m².ano, de 16,33 kWh/m².ano na residência A e 35,38 kWh/m².ano na residência C. Em relação ao consumo por morador, as residências A e B resultaram em consumos de eletricidade próximos, 966 kWh/pessoa e 990 kWh/pessoa respectivamente; o consumo da residência C foi aproximadamente 84% superior a residência A. As demandas de energia das residências (eletricidade/gás e combustível) estão relacionadas com os hábitos e estilos de vida das famílias.

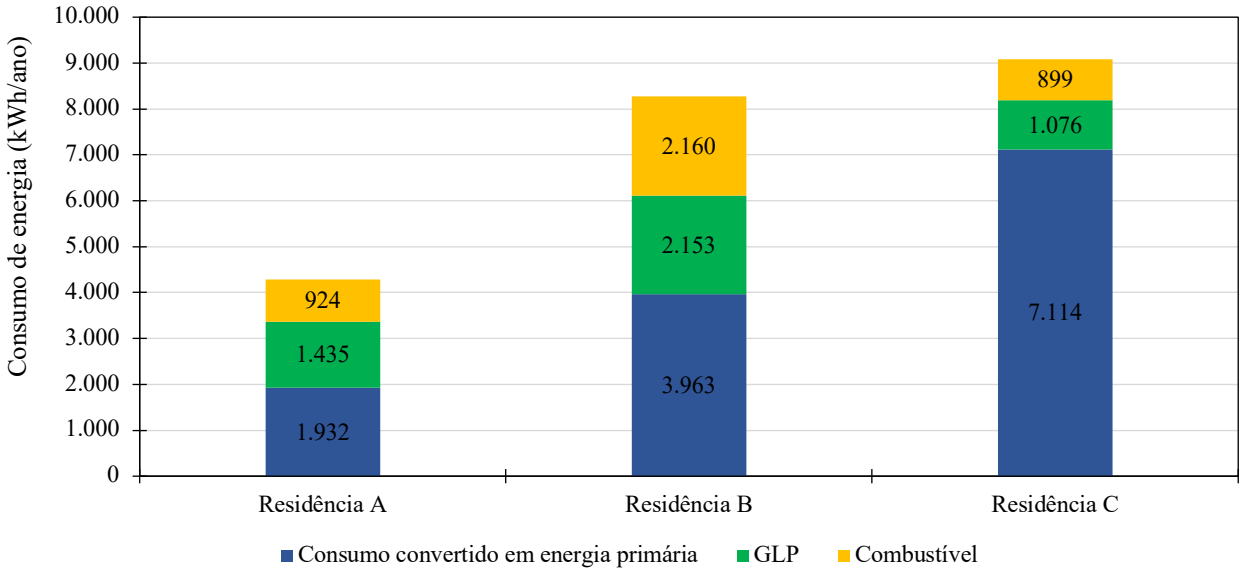
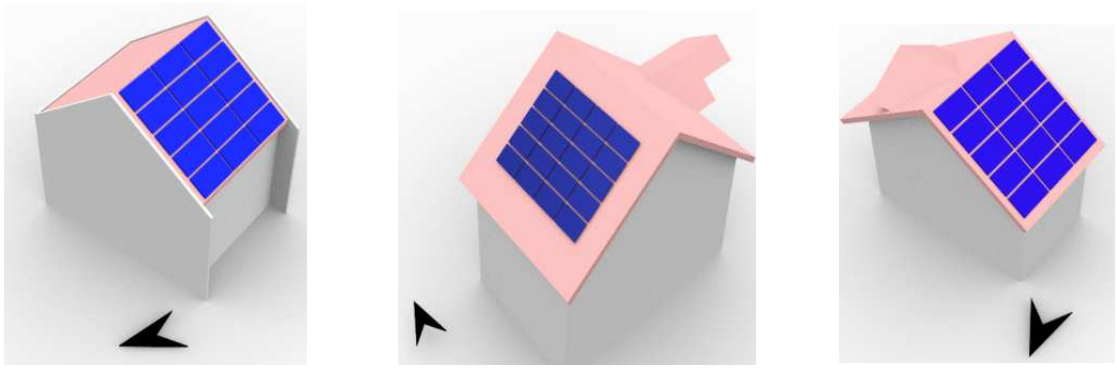


Figura 2 - Consumos de energia das residenciais, eletricidade, gás e combustível

4.2 Análise da integração e pré-dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos

Para a integração dos sistemas FV nas coberturas das residências, foram analisadas as características da cobertura: orientação e inclinação dos planos da cobertura, elementos arquitetônicos e volumes que podem proporcionar sombreamento nos módulos FV, prejudicando o desempenho do sistema FV. A Figura 3 apresenta a integração dos sistemas FV nas coberturas das edificações.



a) Residência A b) Residência B c) Residência C

Figura 3 - Geometria dos telhados

A

Tabela 7 apresenta as características das coberturas, como: área do plano inclinado da cobertura, tipo de telha, ângulo de inclinação e o desvio azimutal em relação ao norte.

Tabela 7 – Características das coberturas

Edificação	Área da cobertura [m²]	Tipo de telha	Ângulo de inclinação [°]	Desvio azimutal	Pcc kW_P	Área estimada m²
Residência A	37,90	Concreto	39,00	-54	3,64	19,64
Residência B	34,60	Cerâmica	37,00	-8	6,63	36,96
Residência C	28,25	Cerâmica	36,13	-80	7,50	29,76

O pré-dimensionamento dos sistemas FV foi estimado com a média anual de irradiação global, considerando a inclinação e desvio azimutal da cobertura, resultando em 3,64 kW_P para a residência A, 6,63 kWP (residência B) e de 7,50 kWP na residência C.

4.3 Simulação de desempenho dos sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos foram simulados considerando dois cenários, o proposto e o ideal, no qual o sistema fotovoltaico está orientado à norte geográfico e com a inclinação da latitude local.

Na residência A o sistema FV proposto é composto por 15 módulos FV de 390 W, resultando em um sistema de 5.850 kWp. A potência do inversor utilizado foi de 5 kW, resultando em uma razão entre CC/CA de 1,17. O sistema proposto para residência C apresenta características semelhantes ao sistema Fv da residência A, sendo composto por 15 módulos FV (360 W) e um inversor de 5kW, resultando na razão entre CC/CA de 1,07. O maior sistema FV proposto é o da residência B, com 20 módulos (350 W) é um inversor de 7kW. O sistema da residência B é 8,1 m² maior que o sistema da residência C, que possui a menor área. A Tabela 8 apresenta as características e configurações dos sistemas fotovoltaicos propostos.

Tabela 8 – Características dos sistemas fotovoltaicos propostos para as residências

Edificação	Tecnologia	Potência módulo FV	Número de strings	Módulos por String	Total Módulos	Área de Módulos FV	Potência do Sistema FV em CC (kWp)	Modelo e potência do Inversor em CA	Razão CC/CA
Resid. A	Mono-c-Si	390 W	5	3	15	28,0 m²	5.850	SunPower - 5,0 kW	1,17
Resid. B	Mono-c-Si	350 W	5	4	20	32,6 m²	7.000	SMA – 7,0 kW	1,00
Resid. C	Mono-c-Si	360 W	5	3	15	24,5 m²	5.400	SMA -5,0 kW	1,07

A geração do sistema FV proposto para a residência C não atendeu o consumo anual de energia da edificação, resultando em deficit de 2.327 kWh/ano. Entretanto, as residências A e B apresentaram um superávit de geração FV, de 3.899 kWh/ano e 2.484 kWh/ano, respectivamente. A Tabela 9 apresenta o desempenho dos sistemas FV propostos versus ideal. Observa-se que no indicador Performance Ratio (PR) as diferenças entres os sistemas propostos versus o sistema ideal foram pequenas. Em relação ao desempenho do Yield a residência B apresentou a menor diferença entre o sistema FV proposto versus o ideal, nas residências A e B as diferenças foram de aproximadamente 10 e 15%, respectivamente.

Tabela 9 – Desempenho dos sistemas fotovoltaicos propostos versus ideal

Edificação	Consumo de Energia [kWh/ano]	Geração do Sistema FV proposto [kWh/ano]	Geração do sistema FV ideal [kWh/ano]	*Yield* do Sistema FV proposto [kWh/kW]	*Yield* do Sistema FV ideal kWh/kW	PR do sistema FV proposto	PR do Sistema FV ideal
Resid. A	4.291	8.190	9.134	1.400	1.561	79%	80%
Resid. B	8.275	10.759	10.944	1.537	1.563	80%	80%
Resid. C	9.089	6.762	7.871	1.252	1.458	79%	79%

Em relação a demanda e produção, nem todas as unidades atenderam às suas demandas. A unidade A conseguiu superar em 47,60% a demanda na situação real e 53,01% na situação ideal. Já a unidade B conseguiu 23,08% para situação real e 24,38% para situação ideal. A unidade C não foi capaz de suprir sua demanda, na situação real a produção foi de 6.762kWh/ano, a ideal foi 7.871 kWh/ano e a demanda de energia 9.089,86 kWh/ano.

Observa-se que a diferença pequena no desempenho do Yield da residência B, justifica-se pelas características do sistema FV proposto, pois possui um desvio azimutal de apenas 8º em relação ao sistema ideal, a maior diferença (11,4º) está relacionada a inclinação do sistema. Na residência C e A apresentam maior diferença em relação ao desvio azimutal, sendo de 80º na residência C e de 54º na residência A (Tabela 10).

Tabela 10 – Inclinação e orientação dos sistemas FV propostos versus ideal

Edificação	Inclinação do sistema FV proposto	Inclinação do Sistema FV ideal	Azimute do Sistema FV proposto	Azimute do Sistema FV ideal
Resid. A	39º	25,6º	306º	0º
Resid. B	37º	25,6º	352º	0º
Resid. C	36,13º	26,8º	280º	0º

A Figura 5 apresenta a relação entre consumo e a geração FV do sistema proposto e ideal para a residência A. Observa-se que a geração FV do sistema proposto foi superior ao consumo em todos os meses do ano. Os meses de março, abril, maio e novembro resultaram nas maiores gerações FV, em março o sistema FV proposto gerou 847 kWh, sendo que a geração do sistema ideal foi 13% superior ao proposto. O mês com menor geração FV foi junho (475 kWh), a geração FV foi 34% superior a demanda de energia no mês. No balanço anual o sistema FV proposto gerou (8.190 kWh/ano) aproximadamente o dobro da demanda de energia (4.291 kWh/ano) da residência A. Com um sistema FV de 5,0 kW_P a residência pode ser uma edificação de energia positiva.

Observa-se que o impacto do sistema FV ideal foi de aproximadamente de 11% no ano. Os resultados mostram que a integração de sistemas FV na inclinação e orientação da cobertura tem perdas baixas, mas não justifica a necessidade dos sistemas FV serem instalados nas condições ideais.

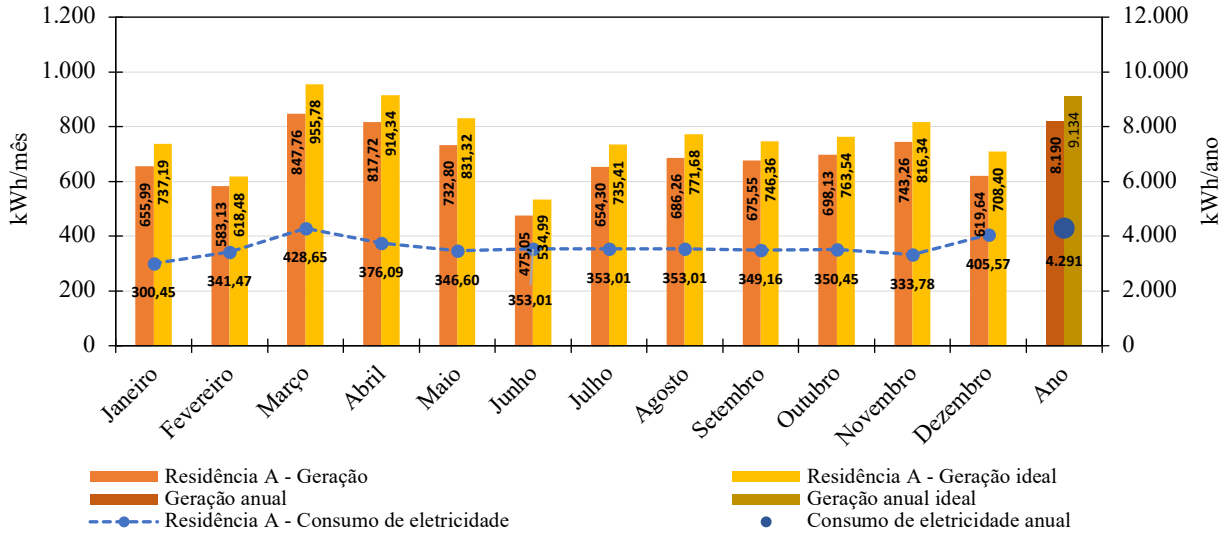


Figura 4 – Geração fotovoltaica do sistema proposto, ideal versus consumo de energia da Residência A

Na residência B (Figura 5), em dois meses (junho e dezembro) do ano a geração FV do sistema proposto foi inferior a demanda de energia da edificação, no mês de junho a geração FV foi 28 kWh inferior ao consumo e em dezembro foi 75 kWh. Analisando o balanço energético anual, o sistema proposto gerou 30% superior a demanda energética anual. Os meses de março, abril e maio apresentaram as maiores gerações FV, 1.006 kWh, 1.111 kWh e 1.036 kWh, respectivamente.

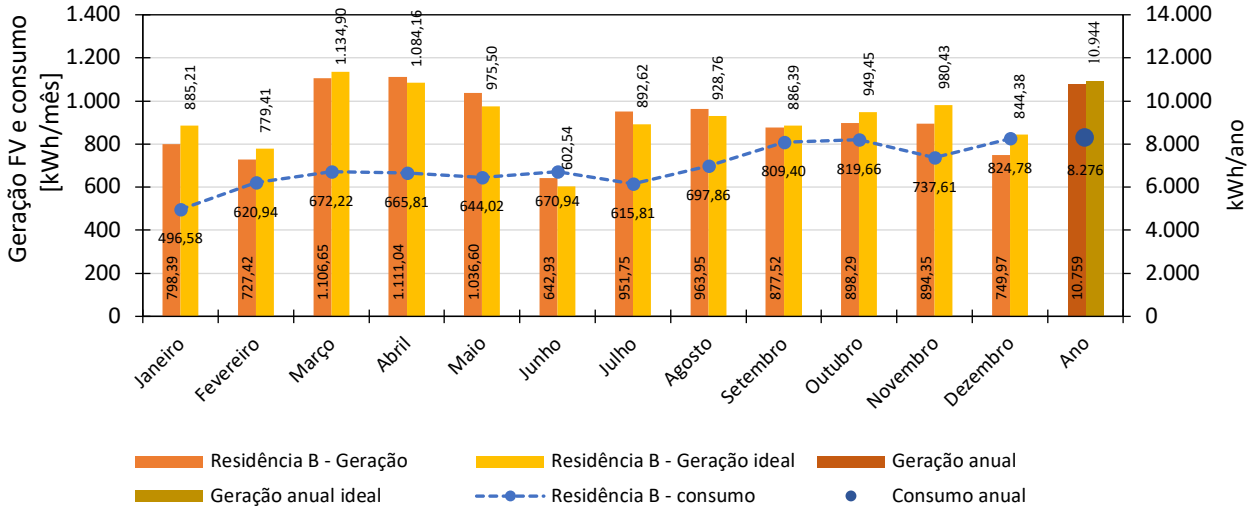


Figura 5 - Geração fotovoltaica do sistema proposto, ideal versus consumo de energia da Residência B

Observa-se que nos meses de abril, maio, julho e agosto a geração do sistema proposto foi superior a geração do sistema ideal, variando entre 2 a 6 % (Figura 5). O desempenho do sistema FV ideal em relação ao sistema FV proposto foi superior aproximadamente 2% no ano, sendo que o mês com melhor desempenho foi em dezembro, com uma geração de 12% superior ao sistema proposto. A geração anual excedente do

sistema FV proposto foi de 2.483 kWh/ano. A residência B resultou em balanço energético positivo, sendo que em 10 meses a geração FV foi superior a demanda de energia da edificação, somente em dois meses o sistema FV não atendeu a demanda da edificação.

O sistema FV proposto para integrar a cobertura da residência C não atendeu a demanda energética da edificação, a geração anual foi de 6.761 kWh/ano e a demanda energética de 9.090 kWh/ano, resultando em 74% da demanda energética (Figura 6). Observa-se que há uma combinação de fatores de contribuíram para o desempenho do balanço energético desta edificação, a maior demanda energética nos meses de inverno e a menor geração do sistema FV em função dos menores níveis de irradiação solar nestes meses, contribuíram para um balanço energético negativo. Somente em dois meses (janeiro e março) do ano, a geração FV do sistema proposto foi igual ou superior a demanda de energia da residência. O mês com menor geração FV no sistema proposto foi em junho (311 kWh), atendendo somente 37% da demanda de energia (825 kWh) da edificação, faltando 513kWh para atender a demanda. O sistema FV proposto para a residência C ficou limitado devido as características arquitetônicas da edificação, que estão relacionadas a orientação dos planos inclinados da cobertura, área de cobertura disponível para integração dos sistemas FV.

Observa-se que mesmo com o sistema FV ideal (Figura 6), a edificação não atenderia a demanda energética, seria necessário propor um sistema FV maior para atender a demanda. O desempenho do sistema FV ideal foi aproximadamente 16% superior ao sistema proposto, quando comparado na base anual. No mês de maio, o sistema FV ideal o desempenho foi superior em 37% ao sistema proposto, um impacto significativo. Na residência C a integração do sistema FV mostrou que mesmo distante das condições ideais, o sistema FV proposto possibilitou atender 74% da demanda de energia da edificação. A demanda energética maior que as outras residências, está vinculada aos hábitos e estilo de vida dos moradores.

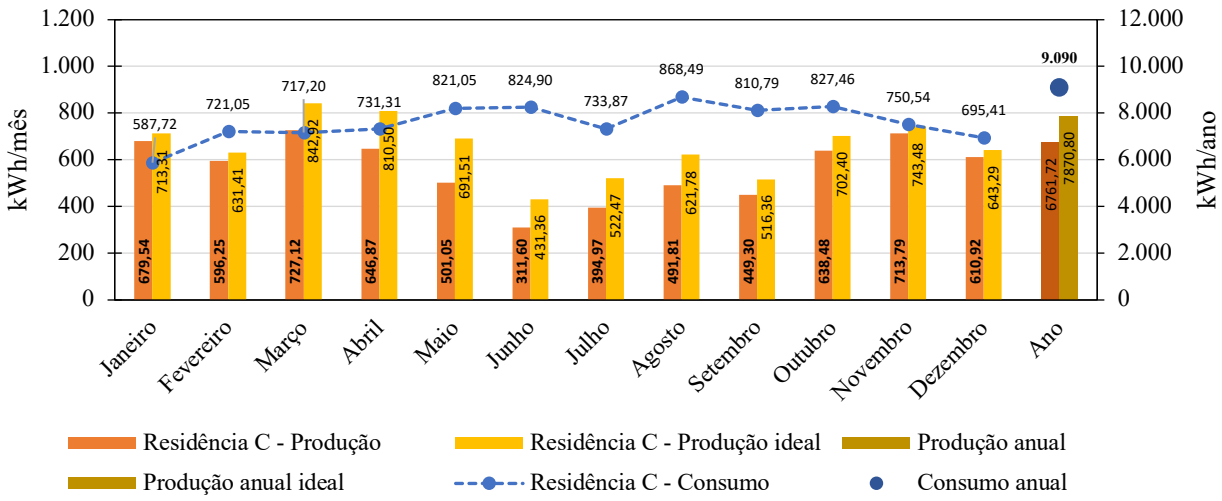


Figura 6 - Geração fotovoltaica do sistema proposto, ideal versus consumo de energia da Residência C

Os resultados mostraram que dimensionar os sistemas FV com base na média diária de consumo, o dimensionamento funcionou para as residências A e B, resultando em uma geração FV superior a demanda de energia da edificação. Na residência C a combinação dos fatores: orientação da cobertura, disponibilidade de área para integração e o consumo elevado de energia da edificação, resulta em uma relação de consumo por área de cobertura disponível para os sistemas FV desfavorável, inviabilizando a geração da demanda energética da edificação.

Os sistemas FV ideias apresentaram um desempenho superior aos sistemas FV propostos. O desempenho na residência A foi de 12%, 2% na residência B e na residencia C de 16% no ano. O melhor desempenho dos sistemas FV ideias em muitas situações não justifica a alteração das caracteristicas volumetricas das edificações para integrar sistemas fotovoltaicos na sua envoltória. A integração de sistemas FV são mais adequadas, minimizando o impacto na arquitetura da edificação.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o potencial de integração de sistemas fotovoltaicos em edificações residências unifamiliares na Região Sul do Brasil. A análise da demanda energética das residências mostrou diferentes perfis familiares, sendo que as residências A e B apresentam um consumo de energia por morador próximos, de 966 kWh/pessoa na residência A e de 990 kWh/pessoa na residência B. Entretanto na residência C o

consumo de energia foi 84% superior da residência A, os resultados mostraram que os hábitos e estilo de vida da família impacta significativamente na demanda de energia da edificação.

Em relação a análise de integração dos sistemas FV na envoltória das residências, as residências A e B apresentaram maior potencial de integração de sistemas FV nas coberturas, na residência C tem um menor potencial de integrar sistemas FV na sua cobertura, devido a orientação da cobertura e a área disponível na cobertura.

Os resultados mostraram que a integração de sistemas FV nas coberturas das residências A e B podem gerar a demanda energética da família, para os consumos de eletricidade, cocção e de transporte (automóvel). As residências A e B apresentaram balanço energético positivo, podem ser classificadas como Edificações de Energia Positiva, que refere-se a edificação que tem geração superior ao seu consumo. A geração excedente pode contribuir para a matriz energética brasileira. Na residência C a geração do sistema FV proposto atendeu 74% da demanda energética da família, o resultado realça o impacto dos hábitos e do estilo de vida da família na demanda energética.

A integração de sistemas FV na envoltória de edificações residências unifamiliares pode ser uma solução de geração de eletricidade renovável, disponibilizando energia limpa para novas demandas, como a mobilidade elétrica. No Brasil há um número expressivo de residências unifamiliares, o estudo mostrou que estas apresentam um grande potencial de gerar a demanda energética das famílias, como também injetar eletricidade nas redes de distribuição, contribuindo para reduzir a demanda de fontes não renováveis do e no Sistema Nacional Interligado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLAIR, N. et al. **System Advisor Model – SAM**. Denver NREL - National Renewable Energy Laboratory, 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro: 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 24/04/2023.

FRAUNHOFER. **Photovoltaics Report. 2023**. Disponível em: <www.ise.fraunhofer.de>.

IBGE, Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: 2023.

M. PROBST; C. ROECKER. **Solar energy systems in architecture integration criteria and guilines**. 2ª Ed. 2012

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração Fotovoltaica No Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo - USP) São Paulo: p. 107. 2014.

OLIVEIRA, G. L. C. et al. Análise De Viabilidade Técnica E Econômica Da Implantação De Um Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Em Uma Edificação Multifamiliar. In: XV ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2019, João Pessoa, **Anais...**, p. 2179–2187, 2019.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: 2ª ed. 2017.

PEREIRA, Priscila Martins Mateus de Oliveira, NETO, Luiz Pereira da Silva, SORGATO, Marcio José. Análise Técnica Da Integração De Sistemas Fotovoltaicos Em Edificações Da UFMS. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. 2020, Porto Alegre, **Anais...**, ANTAC, 2020.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. p. 114 p., 2004.

SANTOS, Í. P. DOS. **Integração De Painéis Solares Fotovoltaicos Em Edificações Residenciais E Sua Contribuição Em Um Alimentador De Energia De Zona Urbana Mista**. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC) Florianópolis, p. 126, 2009.

SCHULTZ, A.; ASSIS, E. S. DE; VILELA, J. A. Análise Da Viabilidade Econômica Da Utilização Do Sistema Fotovoltaico Em Habitações De Interesse Social Em Belo Horizonte, MG. In: XVI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Palmas – TO, **Anais...**, p. 1223–1232, 2021.

SILVA, Tais Oliveira, SORGATO, Marcio José. Análise Do Potencial De Integração De Sistemas Fotovoltaicos Em Edificações Residenciais De Campo Grande/ MS. In: XI ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. 2019. João Pessoa, **Anais...**, 2019.

SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, v. 118, p. 84–98, 1 abr. 2018.

UFRGS, Universidade do Rio Grande do Sul. **Programa Radiasol**. , 2023. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labsol/#softwares>. Acesso em: 30 mar. 2023

ZOMER, C. D. **Método De Estimativa Da Influência Do Sombreamento Parcial Na Geração Energética De Sistemas Solares Fotovoltaicos Integrados Em Edificações**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), Florianópolis, 2014.