ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Potencial de sistemas fotovoltaicos integrados em coberturas de residências

Potential of residential rooftop integrated photovoltaic systems

Níkolas Borges Nascimento de Araújo
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | nikolasborgesn@gmail.com
Roberta Gonçalves Matias
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | roberta.gvs@hotmail.com
Juliana Passos Schneider
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | jupassos@hotmail.com
Leandro Carlos Fernandes
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | fernandes.ufpr@gmail.com
Marcio José Sorgato
Universidade Tecnológica Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | sorgato@professores.utfpr.edu.br

Resumo

A energia solar fotovoltaica revela-se promissora no cenário brasileiro, com projeções de crescimento de instalações nos próximos anos. O objetivo desse estudo é avaliar a integração arquitetônica de sistemas FV nas coberturas de residências em diferentes localidades, com o propósito de transformá-las em edifícios de Energia Zero (ZEB). Inicialmente, realizou-se um levantamento de dados que incluiu informações climáticas, perfil dos usuários e características das edificações. Em seguida, coletou-se dados sobre o consumo de eletricidade, gás e combustível. A terceira etapa envolveu a análise e o pré-dimensionamento da integração de sistemas FV às coberturas. Por fim, avaliou-se o desempenho dos sistemas FV por simulação. A residência A alcançou a maior produção e foi capaz de atender à demanda de consumo registrada. A residência B, com doze módulos propostos, não atendeu à demanda de consumo e o rendimento foi o menor entre os sistemas. A residência C, utilizando módulos em diferentes coberturas, atendeu ao consumo e apresentou a maior geração excedente. As etapas utilizadas neste estudo oferecem informações que auxiliam a integração de sistemas FV em edificações residenciais.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Geração fotovoltaica. Sistemas fotovoltaicos integrados.

Abstract

Photovoltaic solar energy is promising in Brazil, with projected growth in installations in the coming years. This study aims to assess the architectural integration of PV systems on

Como citar:
ARAÚJO, N. B. N. et.al. Potencial de sistemas fotovoltaicos integrados em coberturas de residências. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

residential roofs across various locations, aiming to convert them into Zero Energy Buildings (ZEB). Initially, data was gathered, including climate information, user profiles, and building characteristics. Subsequently, data on electricity, gas, and fuel consumption was collected. The third step involved the analysis and pre-sizing of PV system integration on the roofs. Finally, the performance of the PV systems was evaluated through simulation. Residence A achieved the highest production and met the consumption demand. Residence B, with twelve proposed modules, did not meet consumption demand and had the lowest performance among the systems. Residence C, using modules on different roofs, met consumption and had the highest surplus generation. The stages in this study provide insights for integrating PV systems into residential buildings.

Keywords: Photovoltaic solar energy. Photovoltaic generation. Integrated photovoltaic systems.

INTRODUÇÃO

A matéria-prima utilizada na geração de energia é uma questão relevante para a humanidade, uma vez que está relacionada com o desenvolvimento econômico de nações, questões ambientais e decisões políticas. A evolução da matriz energética global já demonstrou transições, como a substituição da madeira para o carvão e, posteriormente, do carvão para o petróleo. Atualmente, a energia proveniente de fontes renováveis representa uma transição de cenário, substituindo a produção por combustíveis fósseis [1].

Quando comparado ao cenário global, o Brasil se sobressai na utilização de energias renováveis. Em 2021, 45% das fontes de energia empregadas no país provêm de recursos renováveis naturais, enquanto nos demais países, esse índice se restringe a apenas 14% [2].

O Brasil é caracterizado por um clima tropical, quente e ensolarado, desfrutando de níveis regulares e abundantes de irradiação solar em grande parte de seu território. Esse cenário representa uma oportunidade de produção de energia através de sistemas solares fotovoltaicos (PV).

A diversidade e a acessibilidade dos sistemas fotovoltaicos têm possibilitado a instalação e a operação dessas tecnologias em diversas edificações e localidades, adaptando-se a diferentes cenários. No setor residencial, a capacidade instalada já representa 48% do total da capacidade instalada no país, apresentando crescimento de 6% em três anos [3].

O futuro da energia solar se mostra promissor no país, que, pela primeira vez, entrou no grupo das dez maiores perspectivas de mercado solar dos próximos cinco anos. A expectativa é que o Brasil instale 54 GW até 2026, um número comparável às instalações na Alemanha, o maior mercado solar da Europa [4].

Os edifícios de energia zero (ZEB), de energia quase zero (nZEB) ou de energia positiva (PEBs) são capazes de produzir o necessário para atender à demanda energética anual dos usuários. Ürge-vorsatz *et al*. [5] demonstraram que a chave para alcançar edifícios nZEB está em aumentar a eficiência de todos os usos de energia e maximizar as oportunidades de produção local.

As edificações residenciais são as maiores consumidoras de energia no país, sendo o segmento com maior potencial de medidas de eficiência energética. A instalação de sistemas fotovoltaicos em residências representa uma oportunidade de transformá-las em unidades geradoras de energia, sem prejudicar sua estética e arquitetura [6].

Os módulos FV podem ser integrados substituindo os materiais ou revestimentos convencionais do edifício (BIPV), como também apenas fixados na envoltória da edificação (BAPV). A integração pode acontecer em áreas disponíveis de cobertura ou de fachada. Quanto às tecnologias, algumas delas já têm sua aplicação largamente explorada, como a de silício cristalino (c-Si). Outras se popularizaram posteriormente, como o caso dos módulos de filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), considerados de segunda geração.

O desempenho de sistemas FV é influenciado por fatores como a irradiação, o ângulo de incidência, a temperatura do ambiente, a velocidade do vento, entre outros. Em módulos de CdTe, os coeficientes de temperatura são menores que os de c-Si. Essa propriedade indica que sua operação é menos impactada por temperaturas altas, absorvendo e convertendo a luz solar de forma mais eficiente [7][8][9].

Dessa forma, para se obter desempenho adequado para gerar energia correspondente à demanda da edificação, é necessário a avaliação das condições meteorológicas do local, da arquitetura do edifício e das tecnologias empregadas [7]. A análise inadequada destes fatores pode gerar desempenho ineficaz do sistema, impossibilitando a transformação do edifício em ZEB, NZEB ou PEB.

O objetivo deste estudo é avaliar a integração de sistemas fotovoltaicos nas coberturas de edificações residenciais unifamiliares, buscando a harmonia entre o sistema e a arquitetura, com a meta de suprir a demanda energética dos usuários.

METODOLOGIA

Esta pesquisa é classificada como estudo de caso exploratório, utilizando elementos de pesquisa quantitativa aplicada. O desenvolvimento foi estruturado em quatro etapas. Primeira etapa: levantamento do perfil dos moradores e as características das edificações. Segunda etapa: levantamento do consumo de energia (eletricidade, gás e combustível) dos usuários. Na terceira etapa desenvolveu-se a análise da integração e do pré-dimensionamento dos sistemas FV nas coberturas das edificações. Por fim, na quarta etapa, analisou-se o desempenho do sistema FV proposto por meio do *software* de simulação SAM (*System Advisor Model*) [10].

CARACTERIZAÇÃO DOS LOCAIS E DOS OBJETOS DE ESTUDO

Foram coletadas informações sobre três edificações residenciais, incluindo localização, características arquitetônicas e perfil dos usuários. Breves entrevistas compuseram o perfil e as operações de uso de energia. O levantamento arquitetônico analisou orientação, inclinação das coberturas e elementos de sombreamento. A volumetria foi modelada para análises de integração.

LEVANTAMENTO DO CONSUMO ENERGÉTICO

Foram levantados os consumos de eletricidade, gás e combustível. O consumo de eletricidade, oriundos das faturas durante um ano, foi convertido em energia primária com um fator de correção de 0,88 [2]. O consumo de GLP foi acessado por entrevistas, considerando o consumo anual de botijões (GLP 13 kg) e convertido usando a taxa de 13,8 kWh/kg. Com base na quilometragem percorrida mensalmente, estimou-se a energia necessária para substituir veículos a combustão por elétricos. Considerando a autonomia da bateria, determinou-se a quantidade mensal de recargas. A Tabela 1 apresenta as características dos veículos elétricos selecionados.

Tabela 1: Características dos veículos elétricos selecionados

	Residência A	**Residência B**	**Residência C**
Veículo	Chevrolet Bolt EUV	Sedan JAC E-J7	Kwid E-tech
Autonomia média	383 km/carga	402 km/carga	185 km/carga
Bateria	66 kWh	50 kWh	26,8 kWh

Fonte: o autor.

ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO E PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NAS COBERTURAS

Para esta análise, foram considerados orientação, inclinação, área disponível e elementos de sombreamento das coberturas, sendo desenvolvida por meio de modelos tridimensionais, baseados nos projetos arquitetônicos das edificações.

Os sistemas FV foram integrados conforme as inclinações características das coberturas a fim de preservar as volumetrias das residências. Utilizando o programa Radiasol [11], foram calculadas as irradiações solares no plano inclinado das coberturas com base nas coordenadas geográficas, dados de irradiação global horizontal, orientação e inclinação. Os dados de irradiação global horizontal, expostos na Tabela 2, foram obtidos no Atlas Brasileiro de Energia Solar [12]. As residências B e C, localizadas na mesma quadrícula de referência, apresentam dados iguais.

Tabela 2: Irradiação global horizontal (kWh/m²)

Residências		**Jan.**	**Fev.**	**Mar.**	**Abr.**	**Maio**	**Jun.**	**Jul.**	**Ago.**	**Set.**	**Out.**	**Nov.**	**Dez.**	**Ano**
A	2°90'S 41°75'W	5,59	5,53	5,36	5,04	5,15	5,29	5,45	5,84	5,72	5,77	6,18	5,99	5,58
B e C	25°23’S 49°12’O	5,32	5,16	4,54	3,78	3,05	2,76	2,89	3,86	3,83	4,36	5,23	5,56	4,19

Fonte: [12].

Com base na média anual de irradiação incidente no plano inclinado e no consumo médio diário, realizou-se o pré-dimensionamento da potência nominal do sistema FV, de acordo com a Equação 1. Para o pré-dimensionamento foi adotado o rendimento de 0,80.

$$Pcc = \frac{\left(\frac{E}{Gpoa}\right)}{R} \quad (1)$$

No qual:
P_{cc} = potência nominal instalada (kWh);
E = consumo médio diário (kWh/dia);
G_{poa} = irradiação solar incidente no plano (kWh/m²/dia);
R = rendimento do sistema.

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO

O desempenho dos sistemas FV foram avaliados por meio de simulações no programa SAM, na versão 2022.11.22 [10]. O SAM simula sistemas FV conectados à rede ou isolados. As simulações foram realizadas com dados de irradiação oriundos do *National Solar Radiation Database* (NSRDB). Os sistemas foram simulados no modelo detalhado, sem estudo financeiro. Adotou-se o modelo de radiação difusa de Perez.

Os módulos adotados para as residências são de silício mono cristalino (Mono-c-Si), tecnologia que representa 95% da produção mundial [13], e de Telureto de Cádmio (CdTe), tecnologia mais eficiente na absorção e conversão de energia em temperaturas elevadas [6]. Na Tabela 3 são apresentadas as características dos módulos FV utilizados nas simulações.

Tabela 3: Características dos módulos FV

Resid.	Módulo FV	Tecnologia FV	Pmp (W)	Vmp (V)	Imp (A)	Voc (V)	Isc (A)	Efici. (%)	Coef. Temp (%/°C)	Tamanho (m)
A	*First Solar* FS-6450A	CdTe	450,1	186,8	2,41	221,1	2,6	18,2	-0,32	2,48 x 1,00
B	*SunPower* SPR-X22-340-BLK	Mono-c-Si	340,0	57,3	2,4	68	6,3	20,8	-0,331	1,56 x 1,04
C	*Canadian* Inc. CS1U-420MS	Mono-c-Si	420	44,9	9,37	53,8	9,9	20,4	-0,37	2,08 x 0,99

Pmp – potência máxima; Vmp – tensão à potência máxima; Imp – corrente à potência máxima; Voc – tensão circuito aberto; Isc – corrente de curto-circuito.
Fonte: o autor.

Os inversores selecionados para os sistemas são da tipologia *string* e *multi-string*, as características são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Características dos inversores

Residência	Inversor	Capacidade em CA (Wac)	Eficiência (%)	Intervalo de tensão (V)	MPPT
A	ABB: PVI-3.0-OUTD-S-US	3000	96,157	240-480V	1
B	ABB: UNO-DM-3.8-TL-PLUS-US-SE-RA - 240V	3800	96,270	200-480V	1
C	SMA America SB3000TL - US – 22 - 240V	3050	96,928	100-480V	1
	SMA America SB1100U-SBD - 240V	1100	91,246	100-325V	1

MPPT- rastreamento do ponto de máxima potência (maximum power point tracking).
Fonte: o autor.

A Tabela 5 apresenta as estimativas de perdas de geração adotadas. Foi assumido maior percentual por sujeira para a residência A a fim de representar o clima com curto período de chuvas da região.

Tabela 5: Características dos módulos FV

Resid.	Diodos e conexões	Mismatch	Degradação	Indisponibilidade	Transmissão	Sujeira	Cabeamento	
							CC	CA
A	0,5%	2%	0%	0%	4%	6%	2%	1%
B	0,5%	2%	0%	0%	0%	5%	2%	1%
C	0,5%	2%	0%	0%	0%	5%	2%	1%

CC – corrente contínua; CA – corrente alternada.
Fonte: o autor.

Os sistemas FV foram avaliados com base no indicador de produtividade (*Yield*), razão entre a quantidade de eletricidade CA injetada na rede pela potência nominal, e a taxa de desempenho (PR – *Performance Ratio*) que expressa o desempenho do sistema descontando as perdas. A geração dos sistemas FV propostos foi comparada à geração de um sistema integrado em uma cobertura de desvio azimutal 0° e inclinação igual à latitude da localidade (cenário ideal).

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS E CONSUMOS DAS RESIDÊNCIAS

As características das três residências estão expostas na Tabela 6. A residência A possui a maior área de cobertura disponível à integração, com orientações Norte e Sul. A residência B possui a menor área construída e a menor área de cobertura disponível, direcionadas para o Noroeste e Sudeste. A residência C apresenta a maior área construída e área de cobertura disponível voltadas a Nordeste, Noroeste e Sudoeste.

Tabela 6: Características gerais das edificações

Características	Residência A	Residência B	Residência C
Localidade	Parnaíba/PI	Curitiba/PR	Curitiba/PR
Área construída (m²)	177	143	234
Área de cobertura (m²)	162,32	65,4	117,95
Usuários	2	2	3
Veículo a combustão	1	1	1

Fonte: o autor.

É possível observar que o consumo de anual de eletricidade, disposto na Tabela 7, foi maior para residência B, diferindo apenas 100 kWh da residência A.

Tabela 7: Consumo de energia elétrica (kWh)

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maio	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média diária	Consumo anual
Resid. A	224	253	322	164	111	348	330	216	370	270	304	301	8,80	3.213
Resid. B	258	200	244	172	187	158	379	346	275	342	355	396	9,07	3.312
Resid. C	215	219	177	208	232	264	227	230	253	261	225	219	7,48	2.730

Fonte: o autor.

A Tabela 8 mostra o consumo de GLP e a quilometragem registrados, os quais foram estimados em eletricidade. A residência C registrou a maior quilometragem percorrida e, devido à baixa autonomia da bateria, demandou o maior número de recargas. O veículo selecionado para a residência B necessitou da menor quantidade de recargas e registrou baixa quilometragem percorrida pelos usuários.

Tabela 8: Estimativa do consumo de gás e combustível

	Residência A	Residência B	Residência C
Consumo GLP (ano)	5 botijões	4 botijões	3 botijões
GLP em eletricidade	74,75 kWh/mês	59,80 kWh/mês	44,84 kWh/mês
Quilometragem (mês)	720 km	320 km	910 km
Quant. de recargas	1,88	0,79	4,92

Fonte: o autor.

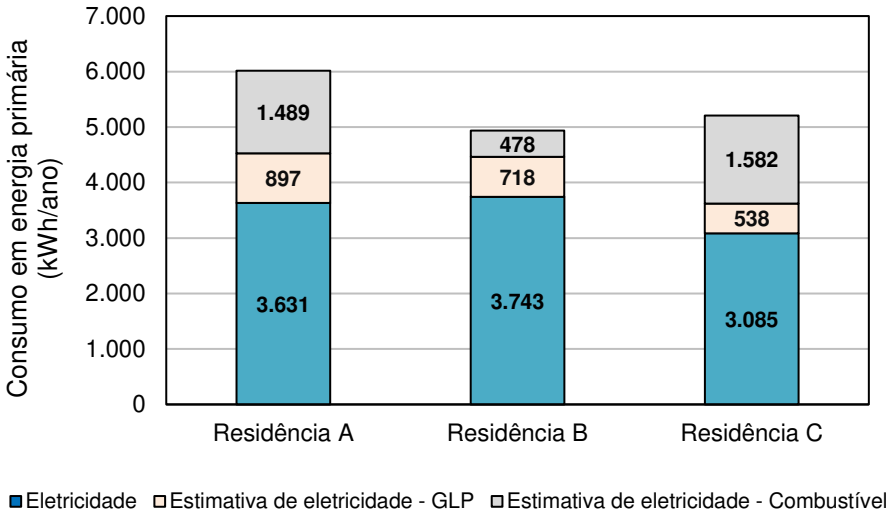
A Figura 1 apresenta graficamente os consumos registrados e a Tabela 9 os coeficientes calculados para as residências. Observa-se que, apesar de a residência B consumir mais eletricidade, seu consumo de energia total é o menor das residências estudadas. Isso se deve, principalmente, ao baixo consumo de combustível estimado. A residência A registra o maior consumo anual e por habitante, bem como a maior energia por uso de GLP. O consumo por área da residência B foi o maior registrado entre as residências.

Tabela 9: Consumos

	Residência A	Residência B	Residência C
Consumo Anual (kWh/ano)	6.017	4.939	5.205
Consumo por habitante (kWh/hab)	3.008,5	2.469,5	1.735
Consumo por área (kWh/m²)	34	34,54	22,24

Fonte: o autor.

Figura 1: Consumo de energia



Fonte: o autor.

ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO E PRÉ-DIMENSIONAMENTO

A Tabela 10 apresenta as informações das coberturas selecionadas, a potência nominal instalada e a área de integração estimadas no pré-dimensionamento. A área estimada foi calculada utilizando a eficiência específica de cada módulo.

O sistema da residência A foi integrado à cobertura com orientação Norte e apresenta a menor potência instalada, ocupando 38,11% da área disponível. A cobertura da residência B possui o maior ângulo de inclinação e o maior desvio azimutal. Os módulos fotovoltaicos ocupam 43,75% da área disponível para suprir a potência pré-dimensionada. Para a residência C, foi pré-dimensionado um sistema na cobertura Nordeste, de 4,43 kWp e na cobertura Sudoeste, de 4,80 kWp. Essa diferença ocorre devido à menor irradiação na cobertura Sudoeste, o que requer um sistema com uma potência maior para atender ao consumo. Essa residência demandou a maior potência instalada e possui a maior área disponível, ocupando 78,2% e 26,0% da cobertura Nordeste e Sudoeste, respectivamente.

Tabela 10: Características das coberturas

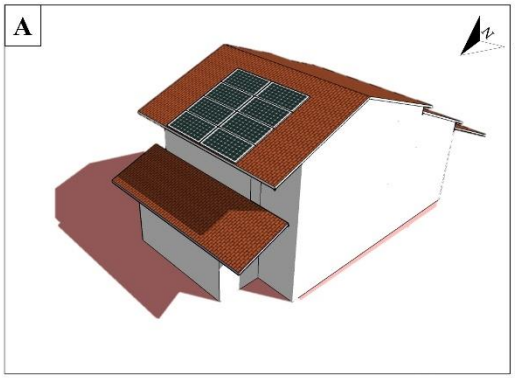
Resid.	Orientação da Cobertura	Área [m²]	Telha	Inclinação [°]	Desvio azimutal [°]	Pcc [kWp]	Área estimada [m²]
A	Norte	44,27	Cerâmica	20	0	3,07	16,87
B	Noroeste	44,53	Concreto	30	305	4,05	19,48
C	Nordeste	27,8	Cerâmica	25	67	4,43	21,72
	Sudoeste	90,15	Cerâmica	25	252	4,80	23,53

Pcc – potência de pico.

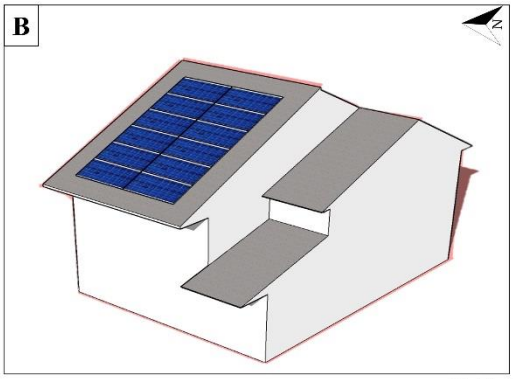
Fonte: o autor.

A Figura 2 apresenta a integração dos sistemas FV propostos nas coberturas das edificações. Todos os sistemas instalados excederam a área estimada no pré-dimensionamento. O maior número de módulos foi integrado à residência B. O sistema integrado à residência C foi dividido entre duas coberturas.

Figura 2: Integração dos sistemas FV



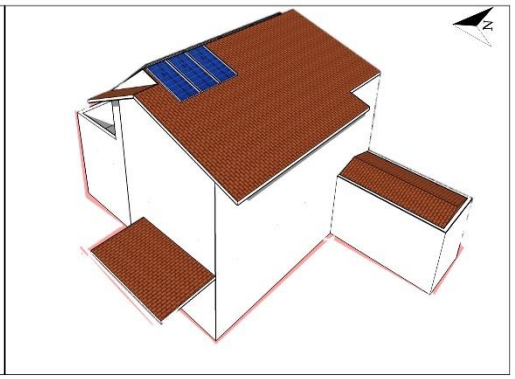
Área	Inclinação	Azimute	Área FV	Potência FV
44,27 m²	20°	0°	19,84 m²	3,60 kWp



Área	Inclinação	Azimute	Área FV	Potência FV
44,53 m²	30°	305°	19,56 m²	4,08 kWp



Área	Inclinação	Azimute	Área FV	Potência FV
27,08 m²	25°	67°	15,9 m²	3,36 kWp



Área	Inclinação	Azimute	Área FV	Potência FV
90,15 m²	25°	252°	6,00 m²	1,26 kWp

Fonte: o autor.

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO

A Tabela 11 apresenta as características dos sistemas fotovoltaicos. A residência C possui a maior área instalada, totalizando 21,9 m². A maior potência foi instalada à cobertura com maior irradiação. O sistema da residência B apresenta a maior potência instalada, de 4,08 kWp, e a menor razão CC/CA, de 0,7%, devido à potência do inversor adotado. A residência A apresentou a maior razão CC/CA, com uma taxa de sobrecarga do inversor de 20%.

Tabela 11: Características dos sistemas fotovoltaicos

Resid.	Tecnologia	Potência (W)	Strings	Módulos por string	Total módulos	Área de módulos	Potência em CC (kWp)	Potência inversor em CA (kWac)	Razão CC/CA
A	CdTe	450	4	2	8	19,84	3,60	3	1,20
B	Mono-c-Si	340	6	2	12	19,56	4,08	3,8	1,07
C	Mono-c-Si	420	8	1	8	15,9	3,36	3,05	1,10
			3	1	3	6	1,26	1,1	1,15

Fonte: o autor.

A Tabela 12 exibe o desempenho simulado dos sistemas FV proposto e ideal, e o consumo de energia anual das residências. A maior geração ocorreu no sistema FV proposto para a residência A, com diferença de 166 kWh/ano com o sistema ideal. Isso pode ser atribuído ao posicionamento da cobertura, que está direcionada ao Norte, sem desvio azimutal. Esse sistema, de tecnologia CdTe, obteve maior *Yield* que os sistemas de tecnologia c-Si.

A residência C apresentou a maior diferença entre *Yield* do sistema proposto e do ideal, especificamente na cobertura Sudoeste. Isso indica um baixo aproveitamento da incidência de irradiação solar nessa orientação. O maior PR foi apresentado pela residência B, indicando menores perdas no sistema.

Tabela 12: Desempenho dos sistemas fotovoltaicos

	Residência A	Residência B	Residência C	
Consumo de energia (kWh/ano)	6.016,57	4.937,77	5.205,96	
Desvio azimutal (°)	0	305	67	252
Geração do sistema proposto (kWh/ano)	6.066	3.577	4.464	1.384
Geração do sistema ideal (kWh/ano)	6.232	4.026	4.763	1.691
Yield do sistema proposto (kWh/kW)	1.684	877	1.326	1.097
Yield do sistema ideal (kWh/Kw)	1.713	987	1.415	1.340
PR do sistema proposto	75%	81%	77%	73%
PR do sistema ideal	75%	82%	77%	73%

Fonte: o autor.

As Figuras 3, 4 e 5 representam a relação mensal entre o consumo e a geração FV do sistema proposto e do ideal para a residência A, B e C, respectivamente.

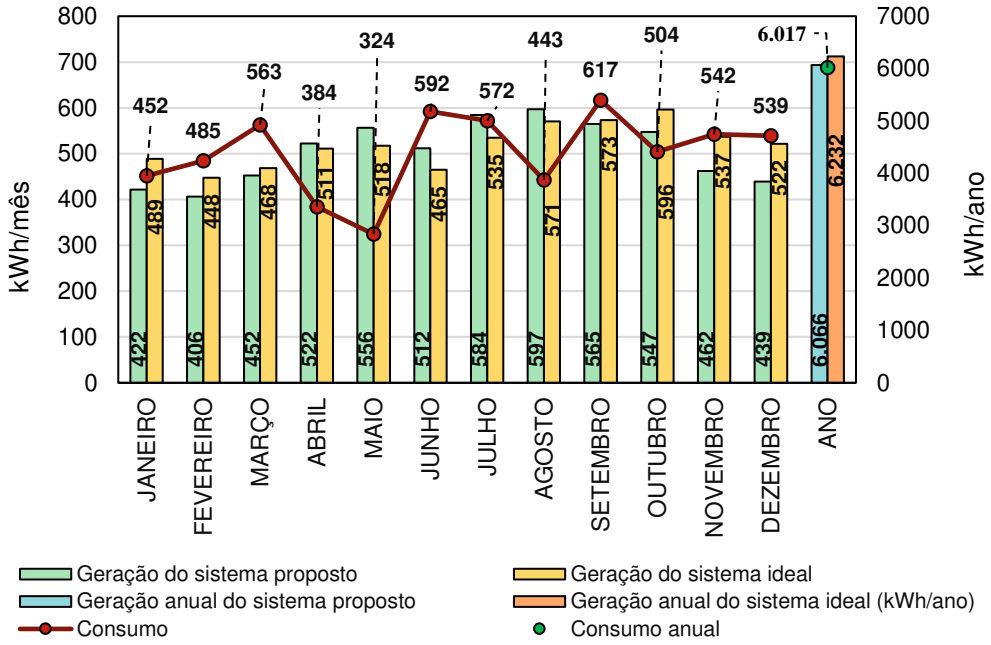
Apesar de a residência A registrar alto consumo, a geração anual dos sistemas supre à demanda energética. Os excedentes foram de 0,8% e 3,6% para sistema proposto e ideal, respectivamente. Nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto, a geração pelo sistema proposto superou a geração nas condições ideais. O ápice da geração deste sistema ocorreu em agosto, enquanto o ideal ocorreu em outubro. A produção no cenário ideal é de 2,75% superior à produção do cenário proposto.

Observa-se que a geração anual do sistema FV proposto para a residência B não atendeu à demanda calculada, gerando apenas 72,44% do consumo, enquanto o

sistema ideal 80,79%. A geração FV anual do sistema proposto é 12,53% menor do que a do sistema ideal. O pico de geração ocorreu em dezembro.

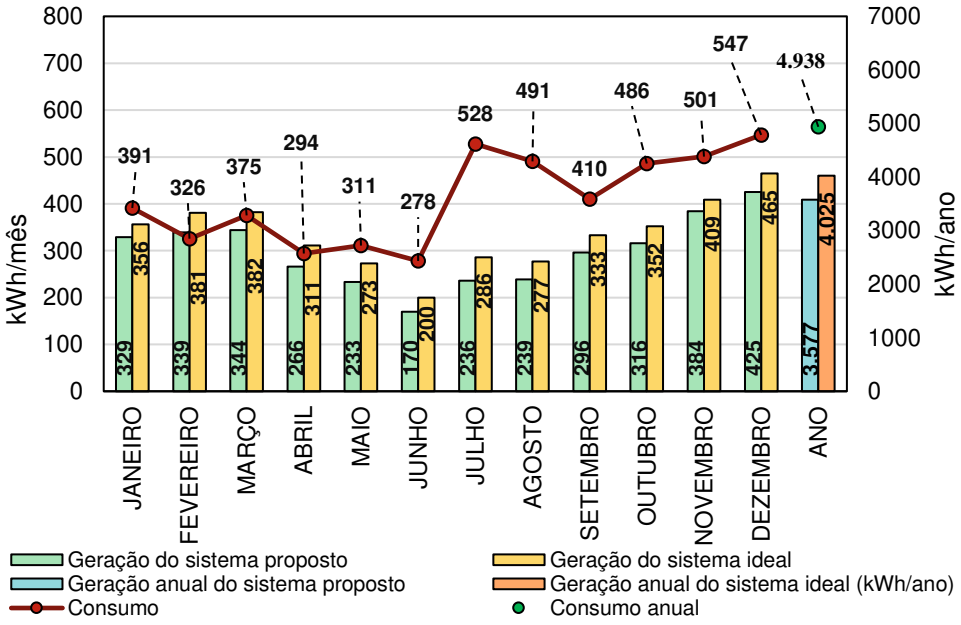
A geração do sistema proposto para a residência C é 10,3% inferior ao ideal e atende à demanda levantada. Assim como a residência B, o mês de maior geração foi dezembro. O menor sistema, integrado à cobertura Sudoeste, foi responsável por 23,66% da geração anual no cenário proposto e 26,20% no cenário ideal. O sistema proposto e ideal resultou em excedentes de 12,3% e 24,0%, respectivamente.

Figura 3: Relação entre o consumo e a geração FV do sistema proposto e ideal para a residência A



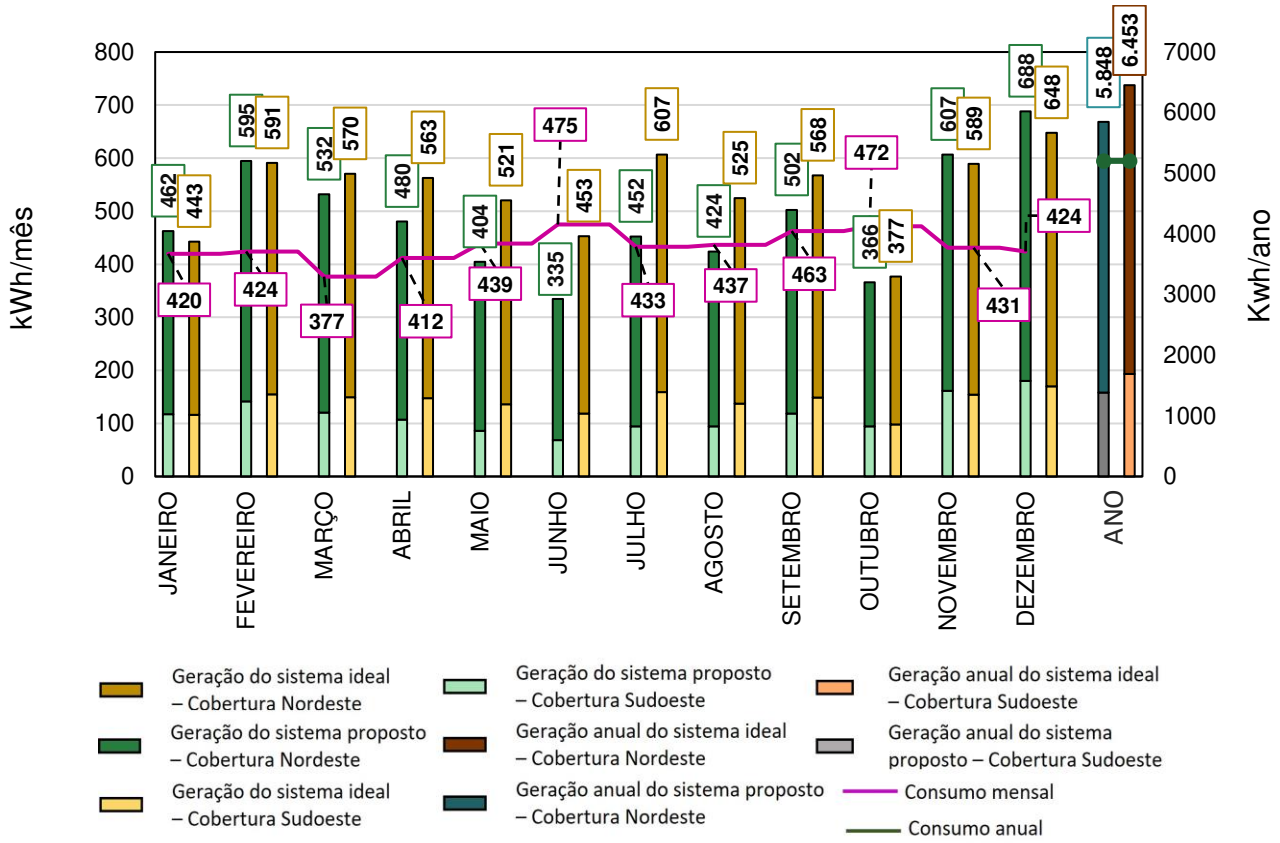
Fonte: o autor.

Figura 4: Relação entre o consumo e a geração FV do sistema proposto e ideal para a residência B



Fonte: o autor.

Figura 5: Relação entre o consumo e a geração FV do sistema proposto e ideal para a residência C



Fonte: o autor.

CONCLUSÃO

A residência A apresentou a maior geração anual no sistema proposto e a menor diferença em relação ao sistema ideal. Isso se deve à orientação Norte da cobertura, sem desvio azimutal, semelhante ao cenário ideal de referência, com inclinação igual à latitude, maximizando a irradiação.

Esse sistema utiliza tecnologia CdTe e teve rendimento *yield* superior aos sistemas c-Si das outras residências. Esse desempenho pode ser atribuído à maior eficiência da tecnologia na conversão de energia sob altas temperaturas, mostrando-se uma escolha adequada para a região.

O sistema proposto para residência B, com a maior potência instalada, não conseguiu suprir a demanda anual de energia, nem mesmo no cenário ideal, apresentando o menor rendimento *yield*. O alto desvio azimutal da cobertura e à baixa sobrecarga do inversor podem ser apontados como fatores responsáveis por este comportamento.

O sistema FV da residência C, integrado a duas coberturas com orientações distintas, gerou o maior excedente energético. A integração em múltiplas coberturas foi necessária para atender ao consumo registrado, evidenciando que esta pode ser uma

solução adequada para maximizar a geração dos sistemas, conforme recomendado por Ürge-vorsatz *et al.* [5].

Portanto, por meio deste estudo, evidenciou-se que as etapas de pré-dimensionamento adotadas foram apropriadas para avaliar a integração dos sistemas fotovoltaicos (FV) nas coberturas, oferecendo informações que auxiliam nas tomadas de decisões. A avaliação permitiu relacionar características arquitetônicas das residências com propriedades dos sistemas FV, explorando como essas interações impactam a geração de energia. Além disso, foi constatado que edificações residências têm potencial para se tornarem produtoras locais de energia, atendendo às suas demandas e aproveitando a estrutura existente sem comprometer a arquitetura.

Este estudo contribui para o campo de projetos de energia solar em edificações, otimizando o processo de planejamento e implementação de sistemas FV. Recomenda-se que pesquisas futuras explorem mais variáveis e novas tecnologias para aprimorar o desempenho dos sistemas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela estrutura física e financeira fornecida para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

[1] LU, Y.; KHAN, Z. A.; ALVAREZ-ALVARADO, M. S.; ZHANG, Y.; HUANG, Z.; IMRAN, M. A Critical Review of Sustainable Energy Policies for the Promotion of Renewable Energy Sources. Sustainability, v. 12, n. 12, p. 5078, jan. 2020. https://doi.org/10.3390/su12125078.

[2] EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022. Rio de Janeiro: 2023. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 10/10/2023. RIO DE JANEIRO: 2023.

[3] ABSOLAR - Infográfico ABSOLAR - Maio, 2024. Disponível em http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html Acesso em: 30 maio 2024.

[4] HEMETSBERGER, W.; SCHMELA, M.; CHIANETTA, G.; SAUAIA, R. Global Market Outlook for Solar Power. 2022

[5] ÜRGE-VORSATZ, D.; KHOSLA, R.; BERNHARDT, R.; CHAN, Y. C.; VÉREZ, D.; HU, S.; CABEZA, L. F. Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector. Annual Review of Environment and Resources, v. 45, n. 1, p. 227–269, 2020. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045843

[6] 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. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.091

[7] GHOSH, A. Potential of building integrated and attached/applied photovoltaic (BIPV/BAPV) for adaptive less energy-hungry building's skin: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, v. 276, p. 123343, 10 dez. 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123343.

[8] SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. Energy and Buildings, v. 128, p. 99–110, 15 set. 2016a. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.077.

[9] SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. Exergetic assessment of BIPV module using parametric and photonic energy methods: A review. Energy and Buildings, v. 119, p. 62–73, 1 maio 2016b. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.022.

[10] BLAIR, N. et al. System advisor model – SAM. Denver NREL – National Renewable Energy Laboratory, 2018.

[11] UFRGS, Universidade do Rio Grande do Sul. Programa Radiasol, 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labsol/#softwares>. Acesso em: 20/05/2024

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

[13] FRAUNHOFER. Photovoltaics Report. 2023. Disponível em: <www.ise.fraunhofer.de>.