XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

ANÁLISE DO POTENCIAL DE INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS DE 3 CIDADES DA AMÉRICA LATINA

Análisis del Potencial de Integración de Sistemas Fotovoltaicos en Edificios Residenciales de 3 Ciudads en Latinoamericanas

Analysis of the Potencial for Integrating Photovoltaic System in Residential Buildings in 3 Latin American Cities

Eficiência Energética / *Eficiencia energética/ Energy Efficiency*

Galetto Greskiv, Kalline
Graduando de Arquitetura e Urbanismo, UTFPR, Curitiba, Brasil, kalline.2002@alunos.utfpr.edu.br
Vagula, Luana
Graduando de Arquitetura e Urbanismo, UTFPR, Curitiba, Brasil, luanah@alunos.utfpr.edu.br
Gonzalo Lozada, Helbert
Arquiteto e Urbanista, Pós-graduando de Engenharia Civil, UFPR, Curitiba, Brasil, gonzalolzd46@gmail.com
Carlos Fernandes, Leandro
Doutor, Arquiteto e Urbanista, UFPR, Curitiba, Brasil, leandrofernandes@ufpr.br
Sorgato, Márcio
Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPR, Curitiba, Brasil, sorgato@professores.utfpr.edu.br

Resumo

Este estudo avaliou a viabilidade de integrar sistemas fotovoltaicos (FV) em residências na América Latina, sem interferir na arquitetura existente. A primeira etapa abrangeu os levantamentos e análises dos perfis de consumo das três residências estudadas. Na segunda etapa, realizou-se o pré-dimensionamento da área necessária para suprir a demanda e a escolha dos módulos fotovoltaicos para cada edificação, considerando as características das coberturas e a irradiação incidente. A terceira etapa utilizou o software SAM para simular a integração dos sistemas fotovoltaicos e comparou as gerações com os consumos das unidades. Outras simulações foram feitas com os valores ideais de azimute e mantendo a inclinação das coberturas, para comparar com o cenário de mínima intervenção arquitetônica. Os resultados indicaram que as residências A e B atenderam seus consumos, mas a C não conseguiu suprir totalmente, devido a grandes desvios azimutais nas áreas úteis de telhado, apesar das condições favoráveis de radiação.

Palavras-chave: eficiência energética, edifício de energia zero, simulação computacional, fotovoltaica, residência.

Resumen

Este estudio evaluó la viabilidad de integrar sistemas fotovoltaicos (FV) en residencias de América Latina sin interferir con la arquitectura existente. La primera etapa consistió en estudiar y analizar los perfiles de consumo de las tres residencias estudiadas. La segunda etapa consistió en predimensionar la superficie necesaria para satisfacer la demanda y elegir los módulos fotovoltaicos para cada edificio, teniendo en cuenta las características de los tejados y la irradiación incidente. En la tercera etapa se utilizó el software SAM para simular la integración de los sistemas fotovoltaicos y se compararon las generaciones con el consumo de las unidades. Se realizaron otras simulaciones con los valores de acimut ideales y manteniendo la pendiente de los tejados, para comparar con el escenario de intervención arquitectónica mínima. Los resultados indicaron que las residencias A y B satisfacían su consumo, pero la residencia C no podía satisfacerlo totalmente debido a las grandes desviaciones azimutales de las superficies útiles de los tejados, a pesar de las condiciones favorables de radiación.

Palabras clave: eficiencia energética, edificio de energía cero, simulación informática, fotovoltaica, residencia.

Abstract

This study assessed the feasibility of integrating photovoltaic (PV) systems into residences in Latin America, without interfering with the existing architecture. The first stage involved surveying and analyzing the consumption profiles of the three residences studied. The second stage involved pre-dimensioning the area needed to meet demand and choosing the photovoltaic modules for each building, considering the characteristics of the roofs and the incident irradiation. The third stage used SAM software to simulate the integration of the photovoltaic systems and compared the generations with the consumption of the units. Further simulations were carried out with the ideal azimuth values and maintaining the slope of the roofs, to compare with the scenario of minimal architectural intervention. The results indicated that residences A and B met their consumption, but residence C was unable to fully meet it, due to large azimuthal deviations in the useful roof areas, despite favorable radiation conditions.

Keywords: energy efficiency, zero energy building, computer simulation, photovoltaic, residence.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o consumo energético brasileiro vem crescendo. De acordo com o Relatório do Balanço Energético Nacional de 2024, foram 616,3 TWh consumidos, um aumento de 5,2% em comparação com o ano anterior (586,1 TWh). Deste total, as edificações são responsáveis por 51,8%, resultando em um crescimento de 9,06%, de 2023 para 2024. As edificações residenciais são responsáveis por 27,5%. A redução do preço dos sistemas fotovoltaicos (FV) e a grande disponibilidade de radiação solar na maior parte da América Latina, pode suprir a demanda energética das edificações, com possibilidade de gerar mais do que a demanda, por meio de sistemas FV (SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).
O potencial dessa tecnologia tem sido amplamente discutido por diversos pesquisadores. Sorgato et al. (2018) demonstrou que a edificação proposta apresentou resultados positivos de geração energética em diferentes localidades brasileiras. Zomer (2016) analisou que apenas 15% do gerado por um sistema pré-existente eram necessários para alimentar completamente o Centro de Pesquisa em Energia Solar da UFSC. Pastre (2023), avaliou três habitações unifamiliares, concluindo que duas obtiveram resultados positivos de até 47,60% na geração energética.

Os estudos mostraram a viabilidade das edificações do setor residencial em gerar sua própria demanda energética e até mesmo exportar o excedente para a rede distribuidora de energia, de modo que possa colaborar diretamente com a matriz energética de seu local. Essas edificações carregam a possibilidade de serem a solução de oferta de eletricidade renovável por sua geração distribuída (SORGATO et al., 2018). Se o sistema fotovoltaico (FV), for capaz de suprir por um ano sua demanda energética, logo a mesma pode ser classificada como uma Edificação de Energia Zero (EEZ, em inglês: ZEB) (CRAWLEY; TORCELLINI; PLESS, 2009). Lucon e Goldemberg (2009) ressaltaram a importância das energias renováveis como mecanismos de segurança energética para o país que as aplica, conciliando o pensar projetual com o potencial de sua eficiência.

A crescente preocupação com uma energia mais limpa e sustentável motiva a investigação da integração de sistemas fotovoltaicos em edificações existentes, avaliando a possibilidade de transformar em edificações de energia zero (EEZ) ou quase zero, com pequenas intervenções nas características arquitetônicas (M. Probst; C. Roecker, 2012).

2. OBJETIVO:

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de integração de sistemas fotovoltaicos para atender a demanda energética em edificações residenciais unifamiliares localizadas na América Latina, considerando e prezando as características da arquitetura e do entorno.

3. METODOLOGIA

A análise do potencial de integração de sistemas FV em edificações da América do Sul foi desenvolvida em três etapas: 1 - Levantamento e análise do perfil de consumo das residências; 2 - Análise da disponibilidade de irradiação para a integração e pré-dimensionamento dos sistemas FV às coberturas existentes; e 3 - Simulação do desempenho dos sistemas FV integrados às edificações.

3.1. Levantamento e análise do perfil de consumo das residências

O estudo foi desenvolvido em três residências, localizadas em: Arequipa, Peru (Res. A), Carambeí-PR, Brasil (Res. B) e Pres. Prudente-SP, Brasil (Res. C). A meta foi convertê-las em EEZs para a atender a demanda energética anual considerando-se o consumo de eletricidade, de gás GLP (assume-se 13,8 kWh/Kg de gás) e transporte com veículo familiar. Os levantamentos dos consumos de eletricidade foram realizados por meio das faturas das distribuidoras de energia, nos quais utilizou-se o fator de conversão de 1,28 do consumo de eletricidade para conversão em energia primária, devido a proporção de energia renovável gerada na matriz elétrica do Brasil. Com base no perfil de uso do veículo familiar (quilometragem rodada por mês) estimou-se a demanda energética para um veículo elétrico, determinando o número de recargas, a partir da sua autonomia e carga da bateria, para a família. Levantaram-se os consumos *per capita* anuais das residências com intuito de realizar comparações entre elas, sua relação com perfil de consumo e aspectos climáticos.

3.2. Análise da disponibilidade de irradiação para a integração e pré-dimensionamento dos sistemas FV nas coberturas existentes

A integração dos sistemas FV foram propostas nas inclinações e orientações das coberturas existentes. Com modelagens 3D, observou-se a existência de áreas com potencial de geração e áreas sujeitas a sombreamento para a escolha dos locais adequados à sua instalação. Para a irradiação global horizontal, a Residência C utilizou os dados da National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2024) e as Residências B e C do Atlas Brasileiro de Energia Solar (EPE,

2017A). A irradiação solar no plano inclinado foi calculada por meio do programa Radiasol (UFRGS, 2023), utilizando o ângulo de inclinação e o desvio azimutal das coberturas.

Para o pré-dimensionamento dos sistemas FV foi utilizado o Cálculo da Potência Nominal Necessária (Pcc), que resulta no número de kWp estimados para atender a demanda de eletricidade. Os cálculos foram realizados com a média de consumo diário da edificação (E), o nível de irradiação solar no plano inclinado (G_{poa}) e o fator de rendimento do sistema adotado foi de 80% (R), utilizados na equação abaixo.

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

3.3. Simulação do desempenho dos sistemas FV integrados às edificações.

As simulações dos sistemas propostos foram realizadas no programa SAM (System Advisory Model) versão 2023.12.17, desenvolvido pelo NREL (NREL, 2023). Os arquivos climáticos utilizados nas simulações foram do site climate.onebuilding.org, no formato TMYx, na Tabela 1 onde foram apresentadas as informações dos arquivos. Os valores médios da irradiação global nos planos inclinadas foram apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Informações dos arquivos climáticos.

Res.	Pais/Município	Estação	Lat.	Long.	Arquivo/Período	Nome Arquivo
Res. A	PE - Arequipa	847520	-16.34	-71.58	TMY – 2007 a 2021	Arequipa-Rodriguez.AP
Res. B	BR – Castro	868630	-24.79	-49.99	TMY – 2009 a 2023	Presidente.Prudente
Res. C	BR – Presid. Prudente	869210	-22.12	-51.40	TMY – 2009 a 2023	Castro

Tabela 2: Dados de irradiação total no plano inclinado (kWh/m². dia).

Res.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Res. A	5,42	4,29	5,48	5,85	6,19	5,73	6,13	6,67	7,11	7,65	7,28	6,22	6,17
Res. B	5,23	4,31	5,19	5,20	4,57	3,59	4,40	4,58	5,25	4,93	5,45	5,33	4,84
Res. C	5,37	4,85	5,83	5,60	4,83	4,30	5,05	5,39	5,89	5,82	5,81	5,93	5,39

As simulações foram realizadas com o modelo detalhado de sistemas FV, para edificações residenciais, onde foi adotado o modelo de distribuição de radiação difusa de Perez. As características técnicas adotadas nas simulações, são apresentadas nas tabelas: módulos FV (Tab. 3), inversores (Tab. 4) e os coeficientes de perdas dos sistemas FV (Tab. 5).

Tabela 3: Módulos fotovoltaicos utilizados nas simulações dos sistemas fotovoltaicos propostos.

Res.	Fabricante	Módulo FV	Potência (W)	Vmp (W)	VVoc (V)	Imp (A)	Ilsc (A)	Eficiência (%)	Dimensões (mm)
Res. A	Canadian Solar Inc.	CS1U 400MS	400	44,1	53,4	9,1	9,6	20,12	1.990 x 1.000
Res. B	JA Solar	JAM72S30-550/MR	550	42	49,9	13,1	14	21,85	2.070 x 1.218
Res. C	JA Solar	JAM72S30-545/MB	545	41,8	49,8	13	13,9	21,63	2.070 x 1.218

Tabela 4: Inversores fotovoltaicos utilizados nas simulações dos sistemas fotovoltaicos propostos.

Res.	Fabricante	Inversor	Potência em CA (Wac)	Eficiência (%)	Intervalo de Tensão (V)	MPPT
Res A	Canadian Solar Inc.	CSI-4000TL-CT	3.810	96.64	100 - 470	1
Res B	GoodWe Technologies Co.	GEP 6.0-1-US30	6.000	96,73	198 - 500	1
Res C	Delta Electronics	SOLIVIA 3.8NAG4TL 240V	3.810	97,54	100 - 500	1

Tabela 5: Detalhes das perdas adotadas nas simulações no SAM.

Diodos e Conexões (%)	Mismatch (%)	Degradação por Exposição (%)	Indisponibilidade do Sistema (%)	Transmissão (%)	Fiação CA (%)	Fiação CC (%)
0,5	2	0	0	0	1	2

Todos os módulos FV (Tab. 2) são de silício monocristalino (Mono-c-Si), que representam 94% da produção mundial (FRAUNHOFER, 2023). As perdas (Tab. 4) foram baseadas nos estudos de Alberto e Sorgato (2019), Dolla et al. (2018) e Duarte (2016). A pluviosidade de cada residência foi considerada para determinar as perdas por acúmulo de sujeira, sendo utilizada: 5 (Res. A e C) e 5,5 (Res. B). Os indicadores para avaliar o desempenho dos sistemas FV foram o *Yield* e o *Performance Ratio* (PR). Comparou-se os indicadores de desempenho dos sistemas FV propostos com os dos sistemas simulados para norte verdadeiro (desvio azimutal 0°), sendo a inclinação da cobertura foi mantida das simulações propostas para as ideais.

4. RESULTADOS

Os desempenhos dos sistemas foram simulados para duas situações: na primeira condição foi considerado o ângulo de inclinação da cobertura e o desvio azimutal das coberturas adotadas; na segunda condição, o desvio azimutal foi definido como zero (norte verdadeiro), mantendo a inclinação da cobertura. Permitiu-se comparar o desempenho do sistema ideal versus o sistema proposto.

4.1. Análise dos consumos energéticos das residências

As residências unifamiliares são localizadas nas latitudes e longitudes: Res. A - 16°S 71ºO, Res. B - 24°S 50°O, Res. C - 22°S 51°O. Observa-se que na Residência A, o perfil dos usuários é composto por quatro adultos e duas crianças que estudam em período integral. A Residência B é composta por um casal e duas jovens universitárias, trabalham durante o dia, sendo que o homem frequentemente está viajando. Não realizam as refeições na residência, a edificação não possui ocupação no período matutino e vespertino. Na Residência C, há dois adultos que trabalham durante o dia e a noite, apenas um deles realiza as refeições na residência, sem ocupação até às 23 horas, e durante meses específicos há a presença da filha. A Tabela 6 condensa os dados dos domicílios citados:

Tabela 6: Local, classificação climática de Köppen-Geiger, moradores e equipamentos das residências.

Res	Cidade	Clima	Morad.	Chuv. Elét.	Chuv. Aque. a GLP	Chuv. a Ener. Solar	A.C.	Autom.
Res A	Arequipa - PE	BWk	6	0	0	2	0	1
Res B	Carambeí - BR	Cfb	4	3	0	0	0	1
Res C	Pres. Prudente - BR	Aw	2	2	0	0	2	1

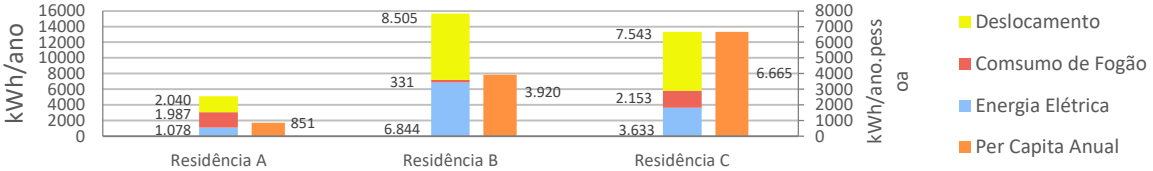
As residências B e C possuem sistemas de aquecimento elétrico de água, e a Residência A energia solar. Apenas a Residência C contém sistema de climatização artificial. Todas as residências utilizam-se de GLP para cocção e todos os automóveis das famílias são movidos por combustíveis fósseis. A Tabela 7 apresenta o consumo de eletricidade das três residências, convertidos em energia primária. Observa-se que a Residência B apresenta o maior consumo de eletricidade anual, 535% superior ao da Residência A e 88% à Residência C.

Tabela 7: Consumo de eletricidade em energia primária das residências – (kWh/mês e kWh/ano).

Res.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Res. A	64	60	122	149	150	66	74	75	73	79	79	88	1.078
Res. B	447	552	603	568	539	596	596	607	588	570	625	554	6.844
Res. C	507	403	359	290	350	188	156	186	235	326	350	283	3.633

Os consumos integrais de energia das residências foram apresentados na Figura 1, computando os usos de eletricidade, energia de deslocamento e gás para coação (GLP). Os consumos de energia de deslocamento e de GLP foram convertidos em kWh, com o objetivo de dimensionar um sistema para atender estas demandas de energia, por meio de um veículo elétrico e a substituição do fogão. Observa-se que a energia de deslocamento dos veículos representou a maior parte do consumo das famílias; resultando em aproximadamente, 40% na Residência A, 54% na Residência B e 57% na Residência C. O consumo de eletricidade total da Res. A foi de 5.105 kWh/ano; da Res. B foi de 15.680 kWh/ano e na Res. C foi de 13.329,0 kWh/ano. A maior diferença resultou entre as Residências A e B, com uma diferença de 307%. A Res. C apresentou o maior consumo *per capita* anual (6.665 kWh/pessoa. ano). A Res. B possui a maior demanda de energia para deslocamento anual (8.505 kWh/ano), resultando em 585 recargas de um veículo com bateria de 66 KWh, computando em 38.880 km rodados.

Figura 1: Consumo Total Anual das Residências (kWh) e Consumo *per capita* (kWh/pessoa).



As Residências A, B e C apresentaram os maiores consumo em maio, novembro e janeiro, respectivamente. Entretanto, o menor consumo foi em fevereiro para a Residência A, em

janeiro para a Residência B e em julho para a Residência C. Os meses de maior e menor consumo das Residências A e B apresentam relação com o perfil de uso das edificações, coincidindo com períodos de maior e menor taxa de ocupação. Para a Residência C, observa-se a relação dos meses de alto consumo com o período do verão em um clima tropical com elevadas temperaturas, devido ao uso mais intenso do sistema de climatização artificial. Em contrapartida, o uso desses sistemas, e por consequência o consumo, é reduzido no período do inverno devido as temperaturas mais amenas.

4.2. Análise da integração e pré-dimensionamento dos sistemas FV

Os valores da irradiação global no plano inclinado (superfície da cobertura) foram obtidos no Radiasol (Tabela 8). Nas propostas de implantação dos sistemas FV foram consideradas as orientações e inclinação das coberturas, visando integração com menor impacto arquitetônico e evitando as áreas sujeitas a sombreamento. As características das coberturas analisadas (desvio azimutal e inclinação) e a Pcc estimado pela demanda, são apresentados na Tabela 9.

Tabela 8: – Irradiação global no plano inclinado referente as localidades das residências (kWh/m²).

Res	Azi	Incl	Jan	Fev	Ma	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	No	Dez	Ano
Res A	25	10	5,6	4,9	4,8	4,9	4,7	4,8	4,9	5,4	5,3	6,1	6,1	5,9	5,3
Res B	345	16,7	5,4	5,4	4,9	4,5	3,7	3,4	3,6	4,7	4,5	4,8	5,5	5,7	4,7
	255		5,5	5,3	4,7	4,0	3,2	2,8	3,1	4,0	4,2	4,7	5,5	5,8	4,4
Res C	90	17,1	6,0	6,0	5,5	4,8	3,9	3,6	3,8	4,7	4,9	5,6	6,1	6,5	5,1

Tabela 9: Características das coberturas analisadas.

Res	Área Total de Cobertura (m²)	Área Escolhidas Para Geração FV (m²)		Desvio Azimutal (°)	Inclinação Cobertura (°)	Pcc Médio (kWp)	Área Necessária Estimada (m²)
Res A	97,87	97,87		25	0	4,2	18,90
Res B	293,00	44,00	84,00	15	16,7	18,0	81,85
		40,00		105			
Res C	165,87	20,65	41,30	90	17,1	12,0	54,51
		20,65		-90			

Os resultados da Pcc foram em média de 4,2 kWp, 18,0 kWp e 12,0 kWp para a Residência A, B e C, na ordem indicada, sendo que a eficiência dos módulos foi adotada de 22%, para o cálculo da Pcc.

4.3 Simulação dos sistemas fotovoltaicos proposto e ideal

Foram realizadas duas simulações para cada edificação, uma do sistema proposto e outra do sistema ideal. No sistema ideal, o desvio azimutal foi 0° e todas as outras configurações foram

as mesmas do sistema proposto. A Tabela 10 apresenta as características dos sistemas fotovoltaicos modelados no SAM.

Tabela 10: Características dos sistemas FV propostos.

Res	Potência Módulo FV	Azimute (°)	Número de Strings	Módulos por Strings	Total de Módulos	Área de Módulos FV	Potência do Sistema FV (kWp)	Número de Inversores	Potência do Inversor	Razão CC/CA
Res A	400	25	2	5	10	19,9	4.000	1	3,8kW	1,05
Res B	550	345	2	6	26	65,55	6.600	2	6,0kW	1,10
		255	2	7			7.700			1,29
Res C	545	90	2	4	16	40,34	4.360	2	3,8kW	1,15
		270	2	4			4.360			

A potência dos sistemas FV propostos foram de 4,0 kWp para a Residência A, 14,3 kWp para a Residência B e de 8,72 kWp na Residência C. Nas edificações que foram propostos sistemas para mais de uma orientação, adotou-se um inversor para cada orientação. O desempenho dos sistemas FV (Geração, Yield e PR) propostos e ideal foram apresentados na Tabela 10.

Observa-se que a geração do sistema proposto nas residências A e B registraram superávits em relação ao consumo, com excedentes de 54% e 28%, respectivamente. Contudo, a geração do sistema FV na residência C não supriu a demanda, com um déficit de 1%. Os resultados da geração dos sistemas ideais foram aproximadamente 10% superiores ao sistema proposto para as Residências B e C, porém na Residência C foi de -0,3% (inferior). A residência A resultou no maior *Yield* (1.964 kWh/kWp), na residência B foi de 1.401 kWh/kWp e de 1.513 kWh/kWp na residência C. O desempenho superior da residência A, está relacionado com maior disponibilidade de irradiação solar próxima da linha do equador. Observa-se que a variação no *Performance Ratio* foi baixa entre as edificações.

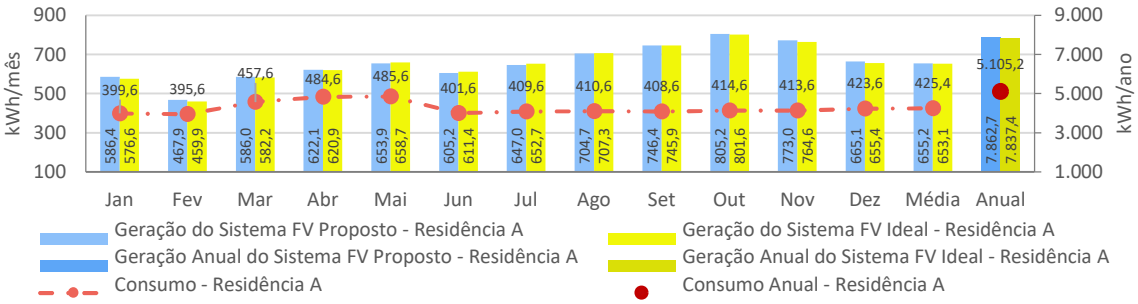
Tabela 11: Características dos sistemas FV propostos.

Res	Consumo de Energia (kWh/ano)	Azimute do Sistema FV Proposto (°)	Azimute do Sistema FV Ideal (°)	Geração do Sistema FV Proposto (KWh/ano)	Geração do Sistema FV Ideal (kWh/ano)	Yield do Sistema FV Proposto (kWh/kWp)	Yield do Sistema FV Ideal (kWh/kWp)	PR do Sistema FV Proposto	PR do Sistema FV Ideal
Res A	5105,2	25	0	7.863	7.837	1.964	1.957	0,82	0,82
Res B	15680,4	345 e 255	0	20.052	21.656	1.401	1.514	0,81	0,81
Res C	13329,0	90 e 270	0	13.194	14.491	1.513	1.662	0,80	0,80

Comparando os sistemas propostos versus os ideais: a Residência A resultou em um decréscimo de 26 kWh/ano na geração FV, na Residência B e C apresentaram um acréscimo na geração FV de 1.604 kWh/ano e 1.297 kWh/ano, respectivamente. A variação no desempenho do *Yield* na Residência B foi de 7,46% e na Residência C de 9,85%.

A Figura 2 apresenta a geração dos sistemas FV, proposto versus ideal, relacionando a demanda energética total da residência A, para os 12 meses.

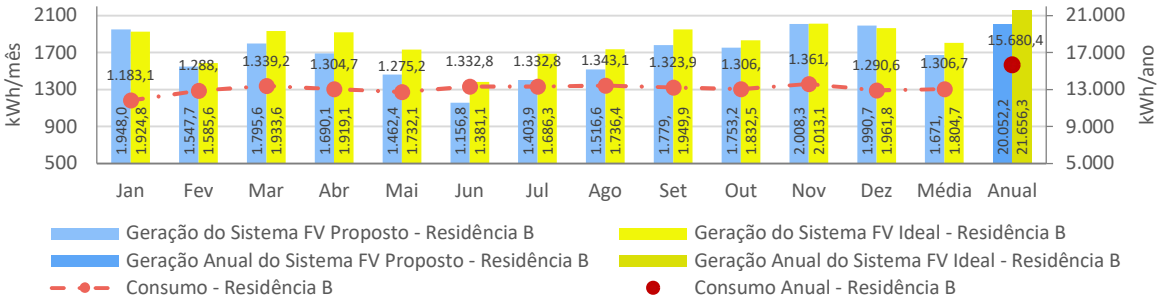
Figura 2 – Geração do sistema FV proposto, ideal versus consumo de energia da Residência A



Observa-se (Figura 2) que sistema FV proposto apresentou geração superior a demanda de eletricidade em todos os meses do ano. Os meses com maior excedente de energia gerada foram novembro com 94,21% (359,4 kWh/mês) e setembro com 86,89% (337,8 kWh/mês). O mês com menor geração foi fevereiro, que superou a demanda em 18,3%. No sistema FV ideal foi de 10,96% inferior ao proposto. A maior diferença mensal ocorreu em janeiro e dezembro, com redução de 9,7kWh/mês do sistema proposto para o ideal; já a menor variação (0,5kWh/mês) ocorreu em setembro, sendo inferior a 1kWh/mês. Com balanço energético positivo de 2.757 kWh/ano, o sistema proposto da Residência pode se classificar como uma edificação de energia positiva (EEP). O sistema FV ideal resultou em um desempenho inferior ao sistema proposto com pequeno decréscimo, isso está relacionado à pequena diferença do desvio azimutal, como foi evidenciado na pesquisa de Santos (2012).

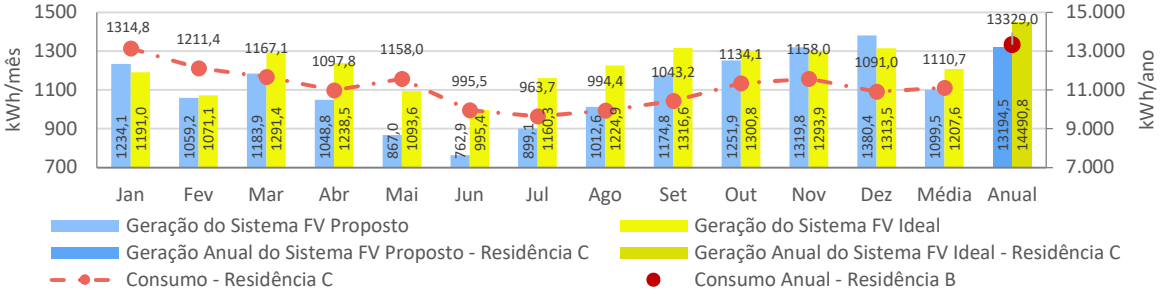
Na Residência B (Figura 3), o mês com maior geração FV excedente foi janeiro com 65% (765 kWh/mês), o sistema FV proposto gerou 2% superior ao sistema FV Ideal. A geração do sistema FV proposto não atendeu a demanda energética somente no mês de junho, com déficit de 13 % (176,1 kWh/mês), porém no sistema FV Ideal superou o consumo mensal em 26,52% (353,4 kWh/mês). A residência apresentou balanço energético anual positivo, com uma geração excedente de 28% (4.371,6 kWh/ano) à geração superior à demanda em 11 dos 12 meses do ano. A geração do sistema FV ideal resultou em 8,0% superior à geração do sistema proposto. Os meses de julho e novembro apresentaram, a maior e menor diferença entre a geração dos sistemas FV proposto versus ideal. O sistema FV ideal apresentou um desempenho melhor no período do inverno, entretanto, no período do verão não houve um ganho expressivo.

Figura 3 – Geração do sistema FV proposto, ideal versus consumo de energia da Residência B



O sistema proposto para a Residência C (Figura 4) não supriu a demanda energética da edificação, resultando em um déficit de 135 kWh/ano. A proposta do sistema com desvio zero supera a demanda anual de energia em 8,72% (1.162 kWh/ano). A geração sistema FV proposto foi inferior à demanda de energia em 6 meses: janeiro, fevereiro, abril, maio, junho e julho, sendo o maior déficit no mês de junho (291 kWh/mês). Entretanto, o sistema FV ideal também não atendeu a demanda de energia em todos os meses, apresentando desempenho insuficiente nos meses: janeiro, fevereiro, maio e junho. O maior excedente ocorreu em dezembro para o sistema proposto, que foi de 289 kWh/mês, o qual foi superior a maior quantidade de energia extra obtida no sistema ideal. Semelhante a Residência B, a maior diferença na geração FV entre os sistemas ocorreu em julho, com um acréscimo de 261 kWh/mês; já a menor variação foi em fevereiro (12kWh/mês), ambas comparando o desempenho do sistema proposto versus o ideal.

Figura 4 – Geração do sistema FV proposto, ideal versus consumo de energia da Residência C



Os resultados mostraram que as Residências A e B tem potencial para serem classificadas como EEP com a geração do sistema proposto, pois mesmo com pequenas perdas, a instalação de sistemas FV na inclinação e orientação da cobertura não reduz consideravelmente sua eficácia. Para a Residência C com as características da cobertura não é possível gerar 100% da demanda energética da edificação, mas consegue atender em 99%, apresentando um pequeno déficit, sendo que uma solução seria investigar o aumento da eficiência dos módulos

FV, para encontrar uma solução que atenda a demanda energética da edificação. Outras soluções seria analisar a eficiência energética da edificação, buscar uma solução que reduza a demanda energética da família, e explorar a possibilidade do sombreamento gerado pelos módulos FV em ser capaz de reduzir o consumo com ar-condicionado.

5. CONCLUSÃO

Este estudo analisou a viabilidade e potencial da integração de sistemas fotovoltaicos em residências unifamiliares situadas em diferentes cidades da América Latina, de modo a respeitar as características arquitetônicas. Os resultados mostraram que foi possível gerar mais de 100% da demanda energética em duas das edificações (Res. A e B), e na residência C a geração foi de 99%.

Para a demanda energética das famílias foram considerados os consumos de eletricidade, cocção e transporte familiar, no qual a demanda de transporte por meio dos automóveis representou até 57% do consumo, na residência C. Os resultados mostraram uma variação significativa nos consumos energéticos, devido ao padrão de uso das edificações e das características climáticas, o que é evidenciado pelo consumo per capita das edificações: a residência C com 6.665 kWh/pessoa.ano, a residência A com 851 kWh/pessoa.ano e a residência B com 3.920kWh/pessoa.ano.

Os sistemas FV propostos apresentaram resultados satisfatórios, com uma produtividade (Yield) mínima de 1.401 kWh/kWp (Res. B) e coeficiente de performance (PR) mínimo de 0,80 (Res. C). As residências A e B apresentaram balanço energético positivo, com potencial de serem classificadas como Edificações de Energia Positiva, possibilitando a contribuição com a matriz energética brasileira por meio da geração excedente. Na residência C a geração do sistema FV proposto não atendeu 100% da demanda energética da família.

Os resultados evidenciam o potencial das residências unifamiliares convertidas em EEP na geração distribuída. As edificações residenciais podem contribuir para a redução do uso de combustíveis fósseis no transporte familiar, como também contribuído para economia familiar. A geração excedente das edificações residências podem reduzir a dependência de fontes não renováveis no Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo uma solução para ampliar a geração de eletricidade renovável.

6. REFERÊNCIAS

BLAIR, N. et al. **System Advisor Model – SAM**. Denver NREL - National Renewable Energy Laboratory, 2023.

TORCELLINI, P.; PLESS, S.; DERU, M.; CRAWLEY, D**. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition.** In: ACEEE Summer Study, 2006, Pacific Grove. Anais [...]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2006.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2024: Relatório Síntese**. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 09 fev. 2025

SANTOS, Ísis Portolan dos; RÜTHER, Ricardo. ***Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil*****.** *Renewable Energy*, 2013. Acesso em: 09 fev. 2025.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise **financeira, energia e sustentabilidade no Brasil.** Estudos Avançados, v. 23, n. 65, p. 121–130, 2009.

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

SANAGIOTTO PASTRE, Joana; LAUFFER PEREIRA ROSA, Bruno; ANGELO DIAS, Kimberly Gabriela; FERNANDES, Leandro Carlos; SORGATO, Márcio José. **Potencial de integração de sistemas fotovoltaicos em residências unifamiliares existentes.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023. Anais [...]. [S. l.]: ANTAC, 2023

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

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, 2018.

UFRGS, Universidade do Rio Grande do Sul. **Programa Radiasol**., 2024. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/labsol/#softwares>. Acesso em: 09 fev. 2025

ZOMER, Clarissa Debiazi; ANTONIOLLI, Andrigo Filippo; CUSTÓDIO, Isadora Pauli; BOING NETO, Júlio; RÜTHER, Ricardo. **Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC: integração fotovoltaica à arquitetura e simulações de desempenho** energético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR – CBENS, 6., 2016, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), 2016.