
Integração de Sistemas Fotovoltaicos em Elementos Construtivos das Envoltórias de Edificações: Estudo de Caso em Coberturas

Integration of Photovoltaic Systems in Constructive Elements of Building Envelopes: Case Study in Roofing

Raquel Pose Hirata

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1251-2435>

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP - Brasil

E-mail: r176459@dac.unicamp.br

Alberto Luiz Francato

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5815-8068>

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP - Brasil

E-mail: francato@unicamp.br

Vinício de Carvalho Neiva Pinheiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4049-7256>

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP - Brasil

E-mail: vpinheiro@unicamp.br

Caio Batista Carra

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5787-5610>

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP - Brasil

E-mail: cbatistacarra@gmail.com

William Jonathan Cearlini Camargo

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6794-4514>

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – UNICAMP - Brasil

E-mail: williamjcamargo@yahoo.com.br

RESUMO

A evolução da tecnologia fotovoltaica impulsiona o lançamento de novos produtos que expandem o horizonte de aplicação da geração desta energia para lugares antes não explorados. Neste cenário, surgem os *Building Integrated Photovoltaics* (BIPVs), elementos integrados à construção, que cumprem tanto função de envoltória quanto de geradores fotovoltaicos. A localização, extensão territorial e incidência de radiação solar brasileiros trazem bom potencial para a energia solar fotovoltaica, mas o uso de BIPVs ainda está defasado em relação ao EUA, Europa e China. Esta pesquisa apresenta diferentes formas de se inserir sistemas fotovoltaicos nas edificações e explorar a aplicação de (BIPVs) na cobertura de edificações residenciais.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Geração de Energia Elétrica; Integração Envoltória-Painel

ABSTRACT

The evolution of photovoltaic technology drives the launch of new products that expand the horizon of application of this energy generation to previously unexplored places. In this scenario, Building Integrated Photovoltaics (BIPVs) appear, elements integrated into the construction, which fulfill both the function of envelope and photovoltaic generators. The Brazilian location, territorial extension and incidence of solar radiation bring good potential for photovoltaic solar energy, but the use of BIPVs is still lagging behind in relation to the USA, Europe and China. This research presents different ways of inserting photovoltaic systems in buildings and exploring the application of (BIPVs) in the coverage of family residential buildings.

Keywords: Photovoltaic Solar Energy; Electric Power Generation; Wrap-Panel Integration

INTRODUÇÃO

O setor elétrico brasileiro tem como desafio, continuidade no Atendimento à crescente demanda de eletricidade da população, enquanto procura formas mais eficientes de gerar e entregar energia elétrica ao usuário final sem perder qualidade. Existe também, um desafio à nível mundial formado pelo compromisso ambiental de diminuir as emissões de gás carbônico na atmosfera.

Nesse sentido, segundo o Relatório Síntese de Balanço Energético Nacional realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) ano 2022, a matriz elétrica brasileira é composta 61,9% pela geração hidráulica, 6,1% gás natural, 6,0% entre derivados do petróleo, nuclear e carvão e derivados e o resto distribuído entre 11,8% eólica, 8,0% biomassa e 4,4% solar fotovoltaica. Apesar da pequena representação da geração fotovoltaica, ela apresentou o maior crescimento em termos de porcentagem nos últimos anos.

Dados os recentes investimentos realizados e da visibilidade alcançada, surgem novas tecnologias de geração fotovoltaica derivadas do tradicional painel solar fotovoltaico. Os *Building Integrated Photovoltaics* (BIPVs), elementos fotovoltaicos integrados à construção, são uma forma de produção de energia elétrica já utilizada em maior escala na Europa, China e EUA, mas ainda pouco difundida no Brasil.

Assim a tendência é integrar o elemento fotovoltaico incorporando-o à edificação, podendo substituir elementos construtivos da fachada ou cobertura. Ou seja, o painel não é adicionado à envoltória da edificação, pois ele é a própria envoltória. Cumpre assim, duas funções: inserção de um sistema capaz de gerar eletricidade e promover a estética.

Os BIPVs (*Building Integrated Photovoltaics*) possibilitam promover desempenho aliado à arquitetura e abrem um horizonte de produtos novos e incentivos à

energia fotovoltaica. Esta pesquisa objetiva apresentar características de BIPVs com foco na recente tecnologia para coberturas, as telhas solares. De forma complementar apresenta-se um estudo de caso com aplicação da tecnologia.

REVISÃO DE LITERATURA

É apresentado uma revisão de literatura pertinente a energia solar fotovoltaica com detalhamento particular para elementos do sistema integrados a envoltória das edificações.

Energia Solar Fotovoltaica

A energia do Sol é utilizada em painéis solares para promover o aquecimento de água em edifícios e residências, mas, é também responsável pelo fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. Consiste na conversão direta da energia solar em energia elétrica e foi identificada pela primeira vez em 1839, por Edmond Becquerel (MACHADO e MIRANDA, 2014).

Em 1954 foi desenvolvida a primeira célula solar à base de silício, principal material constituinte de placas fotovoltaicas até hoje. A descoberta despertou o interesse de cientistas em promover o estudo e desenvolvimento de toda tecnologia envolvendo um sistema fotovoltaico (MACHADO e MIRANDA, 2014).

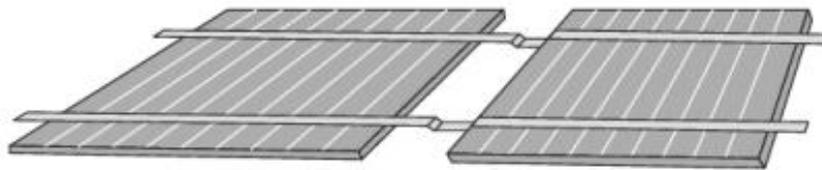
Segundo Villalva e Gazoli (2012), a célula fotovoltaica é o componente principal de um sistema fotovoltaico, pois nela acontece a transformação efetiva de energia solar para elétrica. É formada por duas camadas semicondutoras N e P de silício, grade metálica, base metálica e terminais elétricos.

O silício é o material semicondutor mais utilizado por uma série de motivos. É um material não tóxico, disponível em abundância, de alta penetração no mercado já que foi o primeiro a ser aplicado comercialmente e a fabricação é mais econômica em relação a outros materiais. Os tipos de células fotovoltaicas mais conhecidos e utilizados são constituídos por silício monocristalino e policristalino, explicitados a seguir (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Módulo e Painel Fotovoltaico

A conexão e distribuição organizada de células fotovoltaicas sobre uma estrutura rígida forma o denominado módulo fotovoltaico. A maneira mais comum de se conectar células é em série com intuito de produzir tensões maiores conforme representação na Figura 1 (VILLALVA e GAZOLI, 2012). Os terminais superiores (polo negativo) de uma célula são conectados aos terminais inferiores (polo positivo) da próxima de forma sucessiva, até que se atinja o comprimento necessário para compor o módulo desejado.

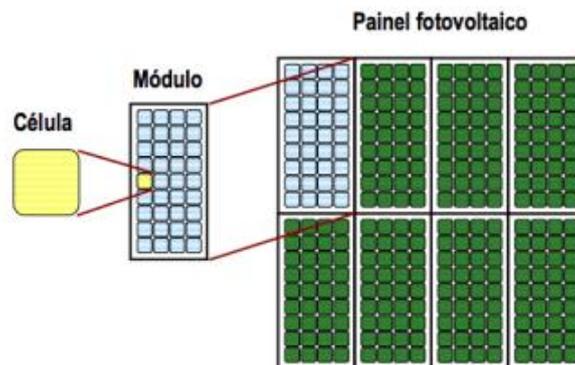
Figura 1 – Conexões elétricas em série de células fotovoltaicas em um módulo



Fonte: VILLALVA e GAZOLI (2012)

A conexão em paralelo é utilizada em casos especiais e não é interessante pois resulta na soma de correntes, mantendo-se exatamente a tensão da célula (CRESESB/CEPEL, 2019). O conjunto de módulos fotovoltaicos agrupados em série, paralelo ou misto é chamado de painel fotovoltaico (Figura 2).

Figura 2 – Agrupamento sequencial - célula, módulo, painel fotovoltaico.



Fonte: CARNEIRO, J. (2010)

Sistema Fotovoltaico

Pinho e Galdino (2014) pontuam no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos que “um sistema fotovoltaico é constituído por bloco gerador, bloco de condicionamento de potência e, opcionalmente, um bloco de armazenamento”. O principal componente, o painel fotovoltaico, forma o bloco gerador junto ao cabeamento

elétrico e estrutura para suporte. O bloco de condicionamento pode ter conversores, inversores, controladores de carga e outros dispositivos. Por último, o bloco de armazenamento, presente em alguns casos, possui baterias ou outros acumuladores elétricos (PINHO e GALDINO, 2014).

Existem duas categorias principais de sistemas fotovoltaicos: isolados (*off-grid*) ou conectados à rede (*on-grid*), podendo ser abastecidos apenas pela energia fotovoltaica ou pela combinação com outras fontes em sistemas denominados híbridos.

Geração de energia fotovoltaica em elementos construtivos

O termo *Building Integrated Photovoltaics* (BIF), pode ser traduzido como: elementos fotovoltaicos aplicados à estrutura. Foi utilizado a primeira vez em 1991 em Aachen, Alemanha, quando elementos fotovoltaicos foram integrados à fachada de vidro de uma construção (Benemann et al, 2001). Como são parte da construção, possuem algumas características vantajosas como substituir materiais de função apenas estrutural por outro que, além de estrutural produz energia limpa; promover arquitetura diferenciada ao compor fachadas e tetos e tornar a edificação mais eficiente em termos de temperatura.

De acordo com as funções exercidas, os elementos terão nomes específicos: BIPVT (Building Integrated Photovoltaic with Thermal); BOPVT (Building Integrated Opaque Photovoltaic Thermal System); BISPVT (Building Integrated Semitransparent Photovoltaic Thermal System), ou seja, variam também em relação à opacidade e transparência, podendo realizar função de reguladores térmicos (DEBBARMA, et al., 2017).

Formas de integração fotovoltaica

As possíveis aplicações de BIPVs são incontáveis, pois a cada dia surgem novas pesquisas e estudos de caso sobre o assunto. A seguir, alguns exemplos.

- Claraboias: Permite a passagem de luz e promove iluminação natural no ambiente interno. É instalada sobre estrutura similar à que suporta vidros (DEBBARMA, et al., 2017).

- Sistemas de Sombreamento: Módulos de diferentes formatos podem ser usados para gerar sombra sobre janelas. Como muitas janelas já possuem certa estrutura, os módulos não adicionam carga adicional (DEBBARMA, et al., 2017).
- Fachadas: Esse tipo de aplicação foram uma espécie de invólucro em torno do edifício, isolando de alterações climáticas externas. Pode ser instalado na estrutura do edifício independentemente do tipo. Tem papel de separador entre os meios interno e externo, portanto, deve permitir que níveis aceitáveis de luz passem para que os usuários mantenham certa conexão visual, (DEBBARMA, et al., 2017).
- Telhas Fotovoltaicas: Substituem as telhas comuns e podem ser usadas para cobrir parte ou todo o telhado. É importante considerar a inclinação ideal do telhado para obter melhor aproveitamento da luz, assim como nos painéis comuns (DEBBARMA, et al., 2017).

Concepção de um projeto com tecnologias de integração fotovoltaica

O rendimento energético de um sistema é a quantidade de energia elétrica produzida em determinado tempo. Dias (2014) apresenta um método para pré-dimensionar o rendimento em 4 passos.

- 1º passo: Orientação do Plano de Geração;
- 2º passo: Área do Plano de Geração;
- 3º passo: Determinação do Rendimento Energético do Sistema;
- 4º passo: Estimativa da Geração de Energia Elétrica.

Em se tratando da incorporação fotovoltaica na envoltória de edifícios, a escolha do tipo de integração do sistema tange os quatro passos acima citados e traz melhores resultados quando considerados desde a fase de planejamento do empreendimento. Segundo Weller, et al (2010), a incorporação acontece em três formas distintas:

- Adição: O sistema fotovoltaico é apenas sobreposto à envoltória.
- Substituição: O sistema é sobreposto, porém substitui alguns elementos como telhas e revestimentos.
- Integração: O sistema fotovoltaico é a envoltória em si.

O trabalho conjunto da arquitetura e engenharia é capaz de produzir uma edificação interessante do ponto de vista estético e eficiente do ponto de vista energético. Supondo um plano de instalação e orientação corretos, é possível obter diversas composições.

METODOLOGIA

Na geração de energia elétrica fotovoltaica em coberturas de edificações é congruente que a energia gerada seja utilizada para atividades como iluminação, tomadas de força e aplicações específicas como aquecimento, etc. A eletricidade gerada pode resultar na diminuição do valor da conta de energia.

Os elementos fotovoltaicos, necessitam, no entanto, de inclinação adequada para otimizar a geração de energia, conforme discutido em itens anteriores. Por isso, em coberturas de prédios se adapta melhor a inserção de painéis fotovoltaicos comuns ao invés de elementos integrados à construção.

Em contrapartida, os BIPVs são uma ótima solução para a geração fotovoltaica em residências unifamiliares. A quantidade de energia produzida é capaz de suprir ou ajudar a suprir o consumo médio de uma família, é claro, com a eficiência variando devido aos fatores de nebulosidade, horas claras, chuva, irradiância, entre outros citados. O telhado de casas apresenta inclinação, ideal para a inserção de telhas fotovoltaicas, cuja função é tanto de cobertura quanto de geração de energia. A inclinação que resulta em maior aproveitamento depende da escolha por BIPVs desde a fase de projeto. Tal aspecto será comentado adiante.

Aspectos que permeiam o uso de BIPVs em coberturas

Inclinação

Existe uma inclinação ideal que satisfaz um sistema fotovoltaico de forma a obter o maior aproveitamento da luz solar, afinal, é a luminosidade o fator determinante para a produção da energia. A escolha da inclinação ideal depende, principalmente, da latitude do local respectivo e, em busca de melhor aproveitamento da luz, foram criados os chamados rastreadores solares (KUNH, 2013).

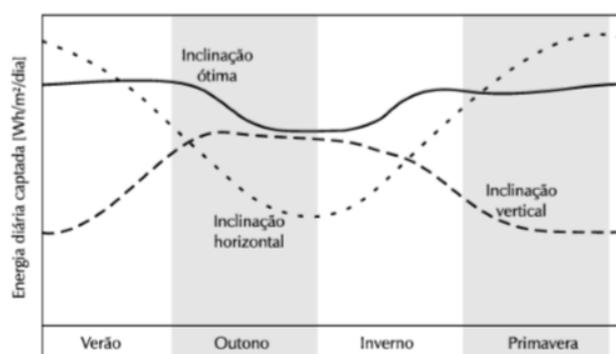
Trata-se do movimento automático de painéis através do eixo de forma a aumentar a eficiência. Os rastreadores são do tipo passivo ou ativo. O primeiro não utiliza energia e se movimenta a partir do princípio de diferença de densidade gerada pelo aquecimento de água no interior de um tubo. Os ativos são elétricos e possuem sistema de motorização. (KUHN, 2013).

Ambos representam avanços tecnológicos importantes, mas estão sujeitos a outros fatores capazes de comprometer o rendimento de uma operação. Os passivos estão vulneráveis à ação do vento e podem não se movimentar em dias nublados nos quais a água dos tubos pouco aquece. Os ativos garantem melhor produção bruta, mas a presença de motor e potencial gasto de energia dele, diminui a produção líquida.

No caso das telhas fotovoltaicas, não há possibilidade de movimentação uma vez que são integradas à construção, mas a eficiência poderá ser maximizada por meio do estudo de melhor inclinação para o elemento gerador de energia. Uma telha comum é um produto com características definidas mínimas de inclinação, mas, ao somar a função fotovoltaica ao mesmo objeto, será estabelecida outra inclinação mínima. A escolha final será baseada no atendimento de ambas.

Segundo Villalva e Gazoli (2012) não há uma regra única para a escolha do ângulo de instalação. A inclinação horizontal traz maior resultado no verão ao passo que a inclinação vertical traz maior resultado no inverno (Figura 3).

Figura 3 – Energia solar captada ao longo do ano com diferentes inclinações.



Fonte: Livro de energia solar (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Instalação do BIVPs

O uso de telhas fotovoltaicas em coberturas diminui as horas e conseqüente o custo de instalação. No caso dos painéis, que são sobrepostos à estrutura da cobertura, ocorrem dois momentos de instalação. O primeiro trata-se da construção do telhado em si, cumprindo papel de envoltória. O segundo momento é composto pela montagem da estrutura de suporte aos painéis fotovoltaicos junto à instalação do sistema elétrico (fios, conexões, proteção). Portanto, haverá dois profissionais para realizar cada uma das tarefas citadas.

Em contrapartida, a instalação de telhas fotovoltaicas exclui a necessidade de dois profissionais, já que reúne função de envoltória e de sistema fotovoltaico. Não é exigido um eletricitista durante o processo, apenas um instalador com capacidade técnica para instalar as telhas e realizar as conexões elétricas simples necessárias.

A opção de gerar eletricidade por meio de telhas fotovoltaicas, cuja estética não interfere, e sim, se mistura à visão do telhado pode ter um apelo muito forte na escolha do consumidor. Porém, o mercado de BIPVs é recente, e, dentro de um panorama de aumento exponencial do número de consumidores instalando tecnologia fotovoltaica em suas casas, existe um cenário de mudanças constantes. É difícil traçar as tendências destes consumidores e o tamanho da disposição deles em investir na estética versus o preço, já que a tecnologia mais nova e menos abundante tende a possuir preço inicial mais elevado.

Sobre todos os aspectos já tratados, um permeia de forma forte e ao mesmo tempo despercebido no que significa integrar um elemento fotovoltaico à construção. Trata-se da relação imprescindível entre a arquitetura e a engenharia e o comportamento deste conjunto para mutuamente gerar valor, tecnologia e estética. No que tange o tema de BIPVs, o melhor aproveitamento do sistema acontecerá mediante o estudo correto sobre as características do sistema instalado (inclinação, localização, orientação, material) previamente à construção da residência. Por isso, a arquitetura e engenharia devem agir de forma conjunta e ordenada desde o início da concepção do projeto para alcançar o produto com tecnicidade e funcionalidade. A inserção de telhas fotovoltaicas posterior à construção fica limitada aos aspectos de inclinação e orientação do telhado, já construído. A união entre tomadas de decisão técnicas antecipadas, respeitando a estética da edificação forma a “integração” da própria sigla BIPV (Building Integrated Photovoltaics).

Custos

O custo de investimento está relacionado à difusão e avanço da tecnologia fotovoltaica. Seguindo a lei de oferta e demanda, quanto maior for a disponibilidade de um insumo, mais seu custo tende a diminuir e é este fenômeno que tem sido observado em âmbito mundial, principalmente na Alemanha, China e EUA. Pinho e Galdino (2014) consideram 3 grandes custos envolvidos na fase de instalação do equipamento fotovoltaico:

- Custo dos módulos: representa cerca de 50% do custo de instalação de um sistema de 1kW conectado à rede no Brasil e é da ordem de 25 a 30% nos sistemas isolados, nos quais o sistema de acumulação representa mais de 40% do investimento inicial;
- Custo dos inversores: representa cerca de 30% do custo de um sistema de 1kW conectado à rede no Brasil e varia entre 15 e 20% em sistemas isolados. A tendência é que o percentual de custo dos inversores aumente para 50% e que dos módulos caia para a faixa de 30 a 50%;
- Custo dos demais componentes: envolve custos de estrutura de sustentação, cabos, disjuntores, custo de projeto. No caso dos sistemas isolados considera-se o custo da bateria.

No Brasil, o custo absoluto torna-se maior, pois grande parte dos componentes são importados e existe incidência de carga tributária sobre o valor de referência internacional (PINHO e GALDINO, 2014).

As proporções apresentadas anteriormente não podem ser aplicadas diretamente à projeção na queda de preço dos BIPVs no Brasil, dadas as inúmeras diferenças entre as características de configuração do sistema com painéis e precificação em outros países. No entanto, os estudos de oferta e demanda e curva de aprendizado evidenciam que o custo de se instalar telhas fotovoltaicas no Brasil irá cair nos próximos anos, já que é uma tecnologia nova de bom potencial de aplicação.

Tecnologia disponível no Brasil

Em agosto de 2019, a empresa Eternit, fabricante de materiais de construção, revelou o lançamento de um novo produto: a primeira telha fotovoltaica produzida no Brasil. Até então, o acesso à tal tecnologia era possível apenas por meio da importação. A primeira geração das telhas é de concreto com diversas cores e acabamentos. Na

segunda geração, os modelos são de fibrocimento também em diferentes cores (cinza grafite, cinza pérola, marfim palha, bege colonial e vermelha) e acabamentos. As dimensões e formato das telhas são as mesmas das já comercializadas telhas de concreto e fibrocimento pela empresa no Brasil.

As vantagens de se usar tais telhas sustenta e apoia a ideia do uso geral de elementos fotovoltaicos integrados à construção e impulsiona o mercado a buscar tecnologias e soluções que, cada vez mais, tratem a geração de energia limpa atrelada ao projeto de engenharia e arquitetura desde o início. As principais vantagens do produto são: instalação similar ao de um telhado tradicional; harmonização estética com o telhado; compatibilidade com inversores do mercado e é claro, redução de energia elétrica.

Comparação entre módulo fotovoltaico e telha solar

A Tabela 2 apresenta um breve resumo comparativo de características técnicas entre um painel fotovoltaico e telhas fotovoltaicas. Foram considerados o painel fotovoltaico de modelo SinoSola sa60, telhas Eternit de concreto e telha solar Eternit.

Tabela 2 – Comparativo entre PV e BIPV para telhado.

Característica	Painel Fotovoltaico em Telhado			Telha Fotovoltaica
	SinoSola sa60	Telha Eternit Concreto	Total	Eternit
Produção estimada (kWh/m ² .mês)	18,97	-	18,97	6,63
Eficiência (%)	15,2	-	15,2	5,3
Peso (kg/m ²)	10	40,9	50,9	40,9
Custo (m ²)	23	20,93	43,93	-*
Durabilidade (anos)	< 25	> 20	> 20	> 20

Fonte: Livro de energia solar (VILLALVA e GAZOLI, 2012).

Dentre as maiores vantagens do uso da telha solar destaca-se a estética. Existe provável diminuição no custo total de instalação, decorrente da mão de obra unificada. A telha da Eternit é a primeira versão produzida no Brasil, ou seja, abre um mercado no país com grandes oportunidades de ser impulsionado e de gerar, no futuro próximo, produtos mais competitivos com o painel comum nos aspectos técnicos.

ESTUDO DE CASO

O estudo buscou, a partir de considerações simples, prever alguns aspectos de telhas solares para uma determinada edificação. A localidade escolhida é de elevada

concentração populacional na região Sudeste, de maior consumo médio elétrico, e que não apresenta tantas regiões de sombreamento, causadas por edificações altas.

- Localização: Campinas – SP (22,901° S e 47,049° O);
- Consumo médio mensal: 300 kWh;
- Dimensões em planta: largura: 15 m e comprimento: 20 m;
- Ângulo de inclinação recomendado (Latitude: ~23°): $23 + 5 = 28^\circ$

Irradiância e Temperatura

Os dados de desempenho do produto pelo Inmetro consideram as condições STC (*Standard Test Conditions*), temperatura referência ($T_{REF} = 25^\circ\text{C}$), temperatura do módulo ($T_{REF} = 23,64^\circ\text{C}$) e intensidade referência ($G_{REF} = 1000 \text{ W/m}^2$). A partir da localização escolhida foi extraído o gráfico de Irradiação Solar, disponível no site da CRESESB para as coordenadas respectivas. Valores médios de irradiação em kWh/m².dia para os 12 meses do ano em quatro planos diferentes (horizontal 0°, 23°N, 21°N e 30°N). Para sistemas fotovoltaicos, a curva de ângulo igual a latitude representa melhor os valores de irradiação, já que existe a inclinação do telhado. A maior e menor médias anuais varia entre 5,53 kWh/m². dia e 4,54 kWh/m².dia, respectivamente.

Considerando que a mínima irradiação média é maior que a referência no STC ($G_{REF} = 1000 \text{ W/m}^2$), é possível desprezar o impacto negativo da variação de irradiação. A temperatura, no entanto, possui efeito negativo em relação ao valor esperado de potência quando ultrapassa os 25°C estabelecidos no STC. No caso de Campinas, a máxima média é de 29°C no mês de fevereiro.

Telhas e área necessária

A produção mensal de uma telha é em média de 1,15 kWh para 5 horas por dia.

$$N = (300 \text{ kWh}) / (1,15 \text{ kWh/telha}) \cong 260 \text{ telhas}$$

A área necessária para abrigar a quantidade de telhas calculada pode ser estimada segundo a área de cada telha.

$$\text{Área telha} = 0,365\text{m} \times 0,475\text{m} = 0,1734 \text{ m}^2$$

$$\text{Área necessária (300 kWh)} = 260 \text{ telhas} \times 0,1734\text{m}^2 \cong 45,08\text{m}^2$$

Supondo um telhado de duas águas com a inclinação calculada (28°), é possível calcular a área de um lado e verificar se atende à área necessária para 300 kWh.

$$\text{Área de uma água} = (15/2)/(\cos(28^\circ)) \times 20 = 169 \text{ m}^2$$

Verifica-se que a área formada pelo conjunto de telhas geradoras é facilmente abrigada pela área total de um lado do telhado da edificação, não precisando ser totalmente coberto por telhas fotovoltaicas e pode ter mistura de telhas comuns e solares.

Comportamento esperado do sistema com bateria

É possível realizar uma simulação do sistema fotovoltaico com as telhas, acoplado a uma bateria, para visualizar o balanço energético de uma edificação. Foram considerados:

- Curva de carga de Francisquini (2006) para se obter o consumo em cada hora;
- Quantidade de telhas obtidas para 300 kWh de consumo mensal;
- Geração em Ampere-hora (Ah) para possibilitar comparação com carga de bateria;
- Fator de redução da potência de módulos fotovoltaicos adotado igual a 0,75;
- Fator de redução da potência devido as perdas do sistema adotado igual a 0,9;
- Bateria de 100 Ah com carga inicial de 25 Ah de capacidade para 12 V.

As telhas solares não geram 1,15 kWh em todas as horas do dia, por isso foi aplicado um fator às horas de geração de energia, sendo 1 kWh o máximo, ao meio dia. Na Tabela 03 são apresentados os resultados para o balanço energético de um dia.

Tabela 3 – Balanço energético de um dia no estudo de caso.

Tempo	Demanda Horária (kW)	Corrente (A)	Fator de geração	Geração (Ah)	Consumo bateria (Ah)	Carga Bateria (Ah)
0h - 1h	0,40	3,15	0	0,00	3,15	21,85
1h - 2h	0,30	2,36	0	0,00	2,36	19,49
2h - 3h	0,30	2,36	0	0,00	2,36	17,13
3h - 4h	0,20	1,57	0	0,00	1,57	15,55
4h - 5h	0,30	2,36	0	0,00	2,36	13,19
5h - 6h	0,35	2,76	0	0,00	2,76	10,43
6h - 7h	0,45	3,54	0	0,00	3,54	6,89
7h - 8h	0,50	3,94	0,03	0,51	3,43	3,46
8h - 9h	0,30	2,36	0,25	4,22	-1,86	5,32
9h - 10h	0,45	3,54	0,5	8,44	-4,89	10,21
10h - 11h	0,45	3,54	0,8	13,50	-9,96	20,17
11h - 12h	0,48	3,78	0,9	15,19	-11,41	31,57
12h - 13h	0,45	3,54	1	16,88	-13,33	44,91
13h - 14h	0,48	3,78	0,9	15,19	-11,41	56,31
14h - 15h	0,50	3,94	0,8	13,50	-9,56	65,88
15h - 16h	0,50	3,94	0,5	8,44	-4,50	70,38
16h - 17h	0,50	3,94	0,25	4,22	-0,28	70,66
17h - 18h	1,10	8,66	0,03	0,51	8,16	62,50
18h - 19h	1,20	9,45	0	0,00	9,45	53,06
19h - 20h	0,90	7,09	0	0,00	7,09	45,97
20h - 21h	1,60	12,60	0	0,00	12,60	33,37
21h - 22h	0,80	6,30	0	0,00	6,30	27,07
22h - 23h	0,60	4,72	0	0,00	4,72	22,35
23h - 24h	0,50	3,94	0	0,00	3,94	18,41

A simulação mostra um possível comportamento de sistema com bateria. A geração, considerando produção indicada pelo fabricante da telha e boas condições climáticas, atenderia de forma satisfatória uma residência de consumo médio mensal 300 kWh. Valores negativos de consumo significam que a geração naquele instante é maior que o consumo, portanto, a bateria recebe carga.

Observa-se que a carga da bateria varia bastante e chega próximo de zero. Caso a carga inicial fosse inferior ao indicado (25 Ah), haveria uma hora do dia em que a bateria teria 0% de carga. Por isso, é importante a conexão do sistema com a rede da distribuidora.

CONCLUSÕES

Os aspectos estudados para Building Integrated Photovoltaics mostram que a tecnologia possui grande potencial de aplicação no Brasil e já é mais explorada e divulgada em outros países. A inserção desse tipo de sistema em edificações não deve ser tratada como uma adição, e sim, integração, por isso um projeto com energia fotovoltaica integrada à construção necessita de concepção prévia à própria construção da edificação. O trabalho conjunto de engenharia e de arquitetura é imprescindível para obtenção dos melhores resultados possíveis.

Os crescentes investimentos realizados na tecnologia de BIPVS têm melhorado desempenho a cada nova versão de produto lançado e é possível que logo alcancem eficiência e níveis de produção dos painéis comuns.

Para futuros trabalhos concernindo BIPVs, é interessante analisar o potencial aumento de falhas devido à maior quantidade de conexões necessárias entre as telhas solares. Outras oportunidades de estudo estão na integração em fachadas e os aspectos que estariam envolvidos neste caso, ou então, o estudo aprofundado dos elementos capazes de gerar energia elétrica e cumprir função térmica como no aquecimento de água.

REFERÊNCIAS

BENEMANN, J., CHEHAB, O., SCHAAR-GABRIEL, E. **Building-integrated PV modules**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 67, n. 1-4, p. 345-354, 2001.

CARNEIRO, J. **Electromagnetismo b módulos fotovoltaicos características e associações**. Universidade do Minho Escola de Ciências Departamento de Física Campus de Azurém, Guimarães, 2010.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE S. BRITO (CRESESB). Potencial Solar – SunData v.30. Disponível em: < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em 20 de outubro 2019.

DEBBARMA, M., SUDHAKAR, K., BARENDAR, P. **Comparison of BIPV and BIPVT: a review**. *Resource-Efficient Technologies*, v. 3, n. 3, p. 263-271, 2017.

DIAS, L. S. **Incorporação de sistemas fotovoltaicos em envoltórias de Edificações: tecnologia e arquitetura**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional: Relatório Síntese – Ano base 2022**, 2023.

FRANCISQUINI, A. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição**. xiv, 94 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

VILLALVA, M. G., GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. São Paulo: Érica. 2012.

KUHN, R. L. **Rastreamento diário e anual dos níveis máximos de radiação solar para otimização da produção fotovoltaica**. 2013.

MACHADO, C. T., MIRANDA, F. S. **Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão**. *Revista virtual de química*, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2014.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltáicos**, 2014.

WELLER, B. **Detail Practice: Photovoltaics: Technology**. Architecture, Installation, 2010.