



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE ARTES E COMUNICAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

**ALINE RODRIGUES DE FIGUEIREDO**

# **ENERGIA SOLAR**

**Captação e aproveitamento pela Arquitetura**

RECIFE

2023

ALINE RODRIGUES DE FIGUEIREDO

# **ENERGIA SOLAR**

## **Captação e aproveitamento pela Arquitetura**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Arquitetura e Urbanismo, sob orientação da prof. Jaucele Azerêdo.

RECIFE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Figueiredo, Aline Rodrigues de.  
ENERGIA SOLAR: Captação e aproveitamento pela Arquitetura. / Aline Rodrigues de Figueiredo. - Recife, 2023.  
116 p. : il., tab.

Orientador(a): Jaucele de Fátima Ferreira Alves de Azeredo  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Artes e Comunicação, Arquitetura e Urbanismo - Bacharelado, 2023.

1. Energia Solar. 2. Arquitetura Sustentável. 3. Eficiência Energética. 4. Edifício Charles Darwin. I. Azeredo, Jaucele de Fátima Ferreira Alves de. (Orientação). II. Título.

720 CDD (22.ed.)

ALINE RODRIGUES DE FIGUEIREDO

**ENERGIA SOLAR: Captação e aproveitamento pela Arquitetura**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pernambuco, como parte das exigências para obtenção do título de bacharel em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovado em: 03/10/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Jaucele de Fátima Ferreira Alves de Azeredo (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Larissa Maria Argollo de Arruda Falcão (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Lívia Melo de Lima (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus, por ter permanecido ao meu lado durante todo o processo da graduação e, principalmente, nos momentos finais.

A minha mãe, Linda Maria, que me apoiou em toda e qualquer decisão tomada ao longo do curso, além de todo o esforço prestado por ela para que eu conseguisse chegar aonde cheguei. Ao meu pai, Rildo Chaves, que pôde me proporcionar todo o aparato que precisei todos esses anos. E a minha irmã, Amanda Rodrigues, que, sem pestanejar, esteve ao meu lado nas piores situações e sempre torcendo por mim.

A um dos meus maiores inspiradores na escolha do meu tema e encantamento, Igor Luiz, que, durante sete longos anos, esteve ao meu lado, e me apoiou durante toda a construção deste trabalho; sem ele, eu não teria tido tanta certeza no que seguir.

Aos meus amigos, em especial André Luís, Mariana Siqueira, Luara Vitória, Eduarda Carneiro, Wendell Alves, Alana Guimarães e Adônis Cordeiro, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade além de qualquer coisa e por todo o apoio que me prestaram ao longo de todo o período de tempo que me dediquei a este trabalho de graduação.

À professora Jaucele Azerêdo, por ter aceitado ser minha orientadora e ter desempenhado tal função com dedicação, companheirismo e compreensão. E a todos os demais professores, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram meu aprendizado.

Aos amigos conquistados na graduação, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências, que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formanda, em especial, a Elisa Soares, Vivian Moraes, Alice Moreira e Assíria Santos.

As minhas queridas líderes, Suenne Cunha e Silvana Paes Barreto, que me apoiaram de forma imensa nesse processo de conclusão de curso e foram sempre extremamente compreensivas e atenciosas.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram e participaram no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

## RESUMO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a escassez iminente das fontes tradicionais de energia tem impulsionado a busca por alternativas renováveis e sustentáveis. A arquitetura pode desempenhar um papel crucial ao integrar sistemas solares eficientes em edificações, promovendo a geração de energia limpa e a harmonia com o meio ambiente. A energia solar é vista como uma das melhores fontes de energia renovável, superando a demanda global de consumo energético ao longo do ano. Os sistemas solares fotovoltaicos são apenas um exemplo das soluções para tornar a arquitetura mais sustentável, reduzindo a dependência de fontes não renováveis de energia. O objetivo geral deste trabalho foi investigar e propor soluções para a captação e aproveitamento da energia solar pela arquitetura. Foi dado o enfoque na aplicação de dispositivos de captação solar em fachadas de edificações verticalizadas, utilizando conceitos de sustentabilidade e arquitetura bioclimática. Foi realizado um breve estudo de caso sobre o Edifício Charles Darwin, no Recife, utilizando placas solares de silício monocristalinas e vidro de silicógeno amorfo. A integração efetiva dessas tecnologias não apenas impulsiona a eficiência energética dos edifícios, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais gerados pela geração de energia convencional. Portanto, a adoção da energia solar na arquitetura representa um passo significativo em direção a um futuro mais sustentável e resistente.

Palavras-chave: Energia solar. Arquitetura Sustentável. Eficiência Energética. Edifício Charles Darwin.

## **ABSTRACT**

The growing concern about climate change and the imminent scarcity of traditional energy sources has driven the search for renewable and sustainable alternatives. Architecture can play a crucial role by integrating efficient solar systems into buildings, promoting clean energy generation, and harmony with the environment. Solar energy is seen as one of the best sources of renewable energy, surpassing global energy consumption demand throughout the year. Photovoltaic solar systems are just one example of solutions to make architecture more sustainable, reducing reliance on non-renewable energy sources. The overall aim of this work was to investigate and propose solutions for the capture and utilization of solar energy by architecture. The focus was on the application of solar capture devices on facades of high-rise buildings, using sustainability and bioclimatic architecture concepts. A brief case study was conducted on the Charles Darwin Building in Recife, using monocrystalline silicon solar panels and amorphous silicone glass. The effective integration of these technologies not only boosts the energy efficiency of buildings but also contributes to mitigating the environmental impacts generated by conventional energy generation. Therefore, the adoption of solar energy in architecture represents a significant step towards a more sustainable and resilient future.

**Keywords:** Solar energy. Sustainable Architecture. Energy Efficiency. Charles Darwin Building.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Componentes da radiação solar.	19
<b>Figura 2.</b> Mapa da disponibilidade de irradiância solar global horizontal.	20
<b>Figura 3.</b> Demonstração da composição de radiação solar em uma região.	21
<b>Figura 4.</b> O Cinturão do Sol localizado entre os trópicos na superfície terrestre.	22
<b>Figura 5.</b> Centrais elétricas, identificadas pelos pontos amarelos, que compõem os Sistemas Isolados, 2022.	23
<b>Figura 6.</b> Gráfico comparativo da matriz energética renovável mundial e Brasil.	25
<b>Figura 7.</b> Gráfico comparativo da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia.	26
<b>Figura 8.</b> Mapa de radiação solar global diária, média anual ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ).	26
<b>Figura 9.</b> Gráfico de Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil por fonte.	28
<b>Figura 10.</b> Inversor, String Box e Quadro de CA.	29
<b>Figura 11.</b> Microinversor.	30
<b>Figura 12.</b> Matriz elétrica brasileira em 2009.	31
<b>Figura 13.</b> Geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo.	32
<b>Figura 14.</b> Ranking nacional de geração solar distribuída fotovoltaica.	33
<b>Figura 15.</b> Organização de um sistema fotovoltaico.	47
<b>Figura 16.</b> Coletor solar com um reservatório de capacidade de 200 litros.	48
<b>Figura 17.</b> Sistema de aquecimento de água, com coletores solares.	49
<b>Figura 18.</b> Esquerda: Exemplo de BAPV. Sistema fotovoltaico aplicado à cobertura de uma edificação existente na Alemanha. Direita: Exemplo de BIPV. Edifício no Quai de Valmy 179, Paris, França.	52
<b>Figura 19.</b> Parcelas do espectro da radiação solar direta incidente convertida em eletricidade ou calor, em função do comprimento de onda.	56
<b>Figura 20.</b> Edifício Solar XXI, Lisboa Portugal, e a fachada composta por sistemas BIPV/T.	57
<b>Figura 21.</b> Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis [Siemens Solar Industries].	59
<b>Figura 22.</b> Módulo Monocristalino da BYD de 385Wp.	60
<b>Figura 23.</b> Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si em substrato de vidro e sem moldura comercialmente disponíveis.	61

- Figura 24.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si flexíveis em substrato de aço inox, produzidos sob a forma de rolos que podem ser colados diretamente sobre telhados metálicos ou de concreto e telhas do tipo shingles. 62
- Figura 25.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si flexíveis em substrato plástico. 63
- Figura 26.** Exemplo de módulos solares fotovoltaicos de CdTe em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas. 64
- Figura 27.** Exemplo de módulos solares fotovoltaicos de CIGS em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas. 65
- Figura 28.** *Copenhagen International School* um dos maiores edifícios da Dinamarca com centrais de energia solar integradas, Nordhavn, Copenhague, Dinamarca. 66
- Figura 29.** Módulos solares fotovoltaicos coloridos já existem comercialmente disponíveis para uso como material de revestimento, para compor fachadas como esta, localizada em Copenhague na Dinamarca. 68
- Figura 30.** Edifício Sede da Eletrosul, em Florianópolis-SC, onde opera desde 2014 o gerador Eletrosul Megawatt Solar. Com 1 MWp de potência, foi o primeiro sistema fotovoltaico integrado a prédio público no Brasil com potência da ordem de MWp. 69
- Figura 31.** Estádio de Futebol Mineiro Solar, que possui um gerador solar fotovoltaico integrado de 1,5 MWp instalado sobre uma cobertura de concreto em Belo Horizonte, MG. Poderia estar junto do texto sobre o estádio. 69
- Figura 32.** Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis, com suas coberturas planas e curvas com módulos fotovoltaicos integrados sobre cobertura metálica, e instalação coberta utilizando módulos fotovoltaicos próprios como cobertura. 70
- Figura 33.** Sistema solar fotovoltaico interligado à rede elétrica pública utilizando módulos de silício policristalino (p-Si) integrados ao telhado de uma residência unifamiliar [Ecofys]. 73
- Figura 34.** Sistema fotovoltaico instalado em retrofit sobre telhado de residência unifamiliar, utilizando módulos solares de silício amorfo (a-Si). 74
- Figura 35.** Instalação fotovoltaica integrada ao telhado de uma edificação centenária. 74
- Figura 36.** Integração de módulos solares fotovoltaicos de filmes finos de a-Si colados diretamente sobre telhas metálicas. 75

<b>Figura 37.</b> Módulos solares integrados à fachada de um edifício, mostrando duas diferentes formas de aplicação.	76
<b>Figura 38.</b> Aplicação de módulos solares de filmes finos de silício amorfo (a-Si) semitransparentes à cobertura de uma edificação comercial.	77
<b>Figura 39.</b> Edifício solar fotovoltaico, onde módulos solares de p-Si foram integrados à fachada principal deste prédio de escritórios na Inglaterra.	78
<b>Figura 40.</b> Utilização de módulos solares fotovoltaicos de filmes finos de silício amorfo (a-Si) integrados a uma edificação industrial.	79
<b>Figura 41.</b> Casa Pacheco Leão AL.	80
<b>Figura 42.</b> Casa Vértice / Nommo Arquitetos.	81
<b>Figura 43.</b> Casa Anima / 24 7 Arquitetura.	82
<b>Figura 44.</b> Refúgio no Vale / Oazo + Zanesco Arquitetura.	83
<b>Figura 45.</b> Casa Bauer / Luiz Paulo Andrade Arquitetos.	84
<b>Figura 46.</b> Casa Muxarabi / Studio Heloisa Fogaça.	85
<b>Figura 47.</b> Sistema com inversor string.	87
<b>Figura 48.</b> Sistema com microinversor.	87
<b>Figura 49.</b> Ganhos de energia exportada em relação à orientação e à inclinação, para a cidade de Petrolina. O máximo de geração acontece para inclinação de 10° e orientação 7,5° para o Leste.	89
<b>Figura 50.</b> Preço médio de kits fotovoltaicos.	92
<b>Figura 51.</b> Impacto visual da edificação no entorno.	93
<b>Figura 52.</b> Fachada sul da edificação.	94
<b>Figura 53.</b> Fachada leste (laranja) e norte (vermelho) da edificação.	96
<b>Figura 54.</b> Esquadria para elevador panorâmico voltada para Oeste.	97
<b>Figura 55.</b> Detalhe esquadria que se repete por toda a edificação.	98
<b>Figura 56.</b> Módulo fotovoltaico com células cortadas ao meio (half-cell) com as mesmas dimensões de um módulo comum.	99
<b>Figura 57.</b> Fachada norte com melhor aproveitamento solar.	100
<b>Figura 58.</b> Aplicação do painel de silício amorfo em fachada.	101
<b>Figura 59.</b> Diferentes transparências do painel de silício amorfo aplicado nas esquadrias de formas variadas.	102

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1.** Países que mais investiram em energia solar fotovoltaica em 2018.....24

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ANEEL	Atlas de Energia Elétrica
A-SI	Silício Amorfo
BEN	Balanco Energético
BIPV	Integração Fotovoltaica Na Arquitetura ( <i>Building Integrated Photovoltaics</i> )
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Corrente Contínua
CDTE	Telureto de Cádmio
CIGS	Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio
CIS	Disseleneto de Cobre e Índio
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
C-SI	Monocristalino
CSP	Concentrador Solar Térmico
DNI	Irradiação Normal Direta ( <i>Direct Normal Irradiance</i> )
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
GECEX	Comitê Executivo de Gestão da Câmara de Comércio Exterior
GW	GigaWatt
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
KWH	KiloWatt-Hora
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	MegaWatt
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NCM	Nomenclatura Comum do Mercosul
OIE	Oferta Interna de Energia Elétrica
P-SI	Policristalino
PROINFA	Programa de Incentivo a Fontes Alternativas
TE	Tarifa de Energia
TIR	Taxa Interna de Retorno

TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VPL	Valor Presente Líquido
WCED	<i>World Commision on Evironment and Developmentl</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. ENERGIA SOLAR.....	18
2.1 BREVES CONSIDERAÇÕES DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO.....	24
2.2. LEGISLAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL.....	33
3. INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA ARQUITETURA.....	38
3.1 APROVEITAMENTO SOLAR PASSIVO.....	38
3.2 APROVEITAMENTO SOLAR ATIVO – Sistemas Fotovoltaicos.....	44
3.2.1 Tecnologia de captação de energia solar fotovoltaica e térmica.....	46
3.2.2 Aplicações e tecnologias para aproveitamento da energia solar direta. 49	
3.2.2.1 Building-Integrated Photovoltaics BIPV.....	54
3.2.3 Módulos fotovoltaicos.....	58
3.2.3.1 Silício cristalino (c-Si).....	59
3.2.3.2 Silício amorfo hidrogenado (a-Si).....	60
3.2.3.3 Telureto de cádmio (CdTe).....	63
3.2.3.4 Disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS).....	65
4. USO DE TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS, VISANDO À SUSTENTABILIDADE NA ARQUITETURA.....	66
4.1 TECNOLOGIAS FV MAIS ADEQUADAS PARA A ARQUITETURA .....	67
4.2 ARQUITETURA SUSTENTÁVEL.....	71
4.2.1 Desafios e oportunidades.....	86
4.2.2 Relação de custo-benefício.....	90
5. ANÁLISE DE EDIFICAÇÃO EXISTENTE – BREVE ESTUDO DE CASO.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e o iminente esgotamento das fontes tradicionais de energia têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e renováveis. Nesse contexto, a energia solar emerge como uma das soluções mais promissoras para enfrentar os desafios energéticos do século XXI. Sua abundância, disponibilidade e natureza renovável a tornam uma opção atrativa para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais negativos em nosso planeta Terra (Santos, 2013).

A arquitetura pode servir de base e desempenhar um papel crucial na adoção e na disseminação da energia solar. A capacidade de projetar edificações que integrem sistemas solares eficientes abre um caminho significativo para a geração de energia limpa e sustentável, ao mesmo tempo que promove a harmonia entre o ser humano e o meio ambiente. Nesse sentido, a arquitetura solar não apenas abraça tecnologias inovadoras de captação, mas também busca incorporar princípios de desenho que maximizem o aproveitamento da luz solar e o uso da energia térmica, criando espaços habitáveis que sejam energeticamente eficientes e ecologicamente responsáveis (Santos, 2013).

Parafraseando Godoi, et al (2018, p.3), na arquitetura, a utilização eficiente do calor e da luz solar sempre foi uma prática comum, devido à frequente utilização da orientação solar, ao se projetar uma edificação, com o intuito de otimizar o aproveitamento desses recursos a fim de economizar energia e melhorar o conforto térmico. Com a crescente necessidade de fontes de energia mais sustentáveis, as pessoas terminaram por explorar ainda mais a energia solar como uma alternativa viável. A radiação solar é vista como uma das melhores fontes de energia renovável disponíveis atualmente, uma vez que a quantidade diária de energia solar incidente na superfície da Terra supera a demanda global de energia ao longo de um ano (Rüther, 2004).

É válido pontuar que os sistemas solares fotovoltaicos representam apenas um exemplo das soluções que visam contribuir para a sustentabilidade na arquitetura. Essas soluções são pensadas a fim de reduzir a dependência de fontes não renováveis de energia. Outrora, existem outras medidas que podem ser aplicadas para tornar um edifício mais sustentável. Por exemplo, a implementação de sistemas automatizados voltados para a eficiência energética pode reduzir

significativamente o consumo de energia e, conseqüentemente, os custos associados. Além disso, é importante considerar soluções ecológicas que causem baixo ou nenhum impacto ambiental, desde que atendam aos mesmos critérios funcionais e sejam economicamente viáveis (Ching; Shapiro, 2017).

É imprescindível analisar corretamente a influência das condições climáticas locais sobre a eficiência dos sistemas de energia solar e, também, do aproveitamento passivo do local. Características climáticas, como a quantidade de luz solar disponível e a temperatura ambiente, são capazes de afetar significativamente o desempenho da arquitetura solar passiva e ativa (Canton, 2018). Além disso, o adensamento urbano, a forma e os materiais utilizados nas edificações são, muitas vezes, inadequados à região. Somado a isso, tem-se que a utilização de equipamentos de climatização artificial, a fim de amenizar o calor interno das edificações em períodos quentes, prejudica ainda mais a situação das cidades, contribuindo para o aumento do consumo energético (Canton, 2018).

Mascaró (2004) cita que o país está passando por diversas contradições, em que estratégias conscientes de aproveitamento e utilização dos recursos naturais colidem em ações inconscientes relacionadas à luta pela sobrevivência ou à realização de interesses pessoais. Além disso, há o destaque para a prática democrática – ou seja, promover o diálogo, a participação e o compartilhamento de decisões pela sociedade –, onde essa deve se despir dos interesses particulares e, por meio das práticas ambientais e estratégias conscientes de utilização dos recursos naturais, atingir camadas insignificantes de degradação ambiental.

Nesse ínterim, há que se discutir a integração da arquitetura às condições do sítio onde ela será inserida. Para Barbosa (2010, p.1), a arquitetura bioclimática é definida como sendo “[...] o estudo que busca a harmonização das construções ao clima e características locais.” Já de acordo com Lanham, Gama e Braz (2004, p. 10), tal abordagem arquitetônica implica dois fatores fundamentais: a multidisciplinaridade na concepção de um projeto eficiente e a integração do conceito de sustentabilidade. Lima (2005), por sua vez, argumenta que adaptar o urbanismo e a arquitetura às condições climáticas de uma determinada região significa criar espaços que proporcionem conforto ao ser humano. Dessa forma, alguns benefícios desse tipo de aplicação incluem a obtenção de conforto ambiental e a minimização dos custos de manutenção relacionados à iluminação e à ventilação

naturais durante a fase de uso de uma edificação projetada com os conceitos de arquitetura bioclimática.

Entende-se que o bioclimatismo se relaciona à sustentabilidade, pois busca fazer uso de meios passivos para a obtenção do conforto ambiental, a partir de fontes naturais (ventilação, sombreamento, iluminação).

Atualmente, o conceito de sustentabilidade adquiriu inúmeras visões ao longo dos anos. A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento define sustentabilidade como “o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro” (WWF Brasil, 2023).

Quando se fala em construção sustentável, de acordo com Araújo (2008), se busca realizar intervenções no ambiente, com o objetivo de suprir as necessidades contemporâneas de edificação, habitação e uso humano, enquanto preserva o meio ambiente e os recursos naturais. Isso se traduz em garantir uma qualidade de vida satisfatória tanto para as gerações atuais quanto para as futuras.

Essa definição está diretamente relacionada com o conceito de sustentabilidade estabelecido pelo relatório *Brundtland* da ONU, que estabeleceu as bases para a economia sustentável ao afirmar que “Desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações em satisfazer suas próprias necessidades” (ONU, 1987).

A construção sustentável está diretamente ligada à fase de concepção da edificação, correlacionando-a aos conceitos bioclimáticos mencionados anteriormente. De acordo com Freitas (2008), a construção sustentável se baseia em soluções passivas, as quais dependem de tecnologias complexas, apenas quando necessário, buscando minimizar o uso de tecnologias ativas para preservar os recursos fósseis.

Entende-se que, dentre os requisitos básicos de projetos arquitetônicos e urbanísticos, há que se considerar os fatores ambientais, visando à redução do consumo energético, minimização dos impactos ambientais e, conseqüentemente, aprimoramento da qualidade de vida dos usuários. Nesse contexto, levanta-se a necessidade em se compreender acerca dos benefícios da aplicação de projetos solares sustentáveis em projetos arquitetônicos, como a redução dos custos energéticos a curto e longo prazo. Além disso, ressalta-se a importância em se estudar o tipo climático das localidades onde serão inseridos os projetos, a fim de se obter o máximo de aproveitamento de todo sistema energético.

O objetivo geral do trabalho é investigar estratégias de captação e aproveitamento da energia solar por meio de soluções arquitetônicas sustentáveis, visando promover edifícios mais eficientes.

Como objetivos específicos, foram delimitados os seguintes:

- I. Caracterizar os fundamentos da arquitetura solar passiva, sistemas de captação de energia solar fotovoltaica e estratégias de projeto bioclimático, visando à sustentabilidade da edificação;
- II. Propor soluções de uso de energia solar em edificações, principalmente comerciais, visando mitigar efeitos relativos às mudanças climáticas;
- III. Realizar um estudo acerca da redução dos impactos ambientais de edificações comerciais e residenciais, analisando a aplicação de técnicas de captação solar ativa e passiva;
- IV. Conceituar a energia solar, delineando as tecnologias mais relevantes para a captação e o aproveitamento dessa energia;
- V. Discutir as diferenças e as aplicações dos sistemas fotovoltaicos e térmicos, bem como as estratégias de incorporação dessas tecnologias nas edificações

O presente trabalho possui caráter investigativo/propositivo, com o intuito de abordar a aplicação de dispositivos de captação solar em fachadas de edificações verticalizadas, a partir da utilização de conceitos de sustentabilidade e de arquitetura bioclimática, abordando por fim estudo de caso acerca do Edifício Charles Darwin, no Recife.

O trabalho se configura a partir de questionamentos sobre quais as dificuldades encontradas ao se aplicar elementos da arquitetura solar ativa em edificações verticalizadas, e quais as vantagens e desvantagens desse tipo de instalação, associada à aplicação de materiais sustentáveis e ao aproveitamento do clima local, com o intuito de reduzir os impactos ambientais das edificações apresentadas e no entorno.

Pretendeu-se abordar como a integração de sistemas solares em projetos arquitetônicos pode contribuir para a sustentabilidade do setor de construção civil, ao mesmo tempo que atende às necessidades energéticas da sociedade. Como procedimentos metodológicos, efetuou-se uma pesquisa bibliográfica e documental, para que os objetivos contemplados pudessem ser atingidos. Assim, foram apresentados os conceitos da energia solar, delineando as tecnologias mais

relevantes para a captação e o aproveitamento dessa energia, bem como, foram discutidas as diferenças e as aplicações dos sistemas fotovoltaicos e térmicos, bem como as estratégias de incorporação dessas tecnologias nas edificações. Além disso, foram abordadas questões econômicas e ambientais relacionadas à energia solar na arquitetura, incluindo os custos de implantação, o retorno financeiro e o impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa.

Foram realizadas buscas em plataformas digitais, como Portal CAPES e Google Acadêmico, além de livros, artigos, dissertações e portais eletrônicos diversos.

Este trabalho busca contribuir para a compreensão dos desafios e das oportunidades que a energia solar proporciona à arquitetura, promovendo uma visão mais abrangente e consciente sobre a importância da adoção de soluções energéticas sustentáveis em projetos, em escala arquitetônica.

A busca pela harmonia entre a natureza e o espaço construído é um compromisso que deve ser assumido por todos nós, e a energia solar se apresenta como um caminho promissor para alcançarmos esse objetivo comum.

## 2. ENERGIA SOLAR

Em todos os lugares do planeta, em maior ou menor intensidade, a energia solar está disponível para uso direto ou indireto. Uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios do futuro é a energia solar direta devido à sua disponibilidade.

Entende-se que a energia solar direta não é renovável, mas sim uma fonte inesgotável, e suas propriedades eletromagnéticas de espectro e alguns tipos de comprimento de onda são diretamente benéficas e necessárias para os seres vivos, sejam eles usados como fonte de luz (luz visível) ou fonte de calor (ondas/radiação infravermelha) (Pereira et al., 2017).

A energia solar é o resultado de diversos fenômenos físicos responsáveis pelos ciclos energéticos terrestres. A energia solar contribui para a dinâmica de longo prazo dos gases na atmosfera (massas de ar) e oceanos (correntes oceânicas), ciclos hidrológicos (evaporação e precipitação) (Kaltmaier Junior, 2020) e é inadvertidamente incorporada na matéria orgânica de plantas e animais, bem como, em recursos energéticos fósseis (petróleo, carvão e gás natural). Essa energia é utilizada e compartilhada por seres e fenômenos a posteriori, ou seja, de forma indireta.

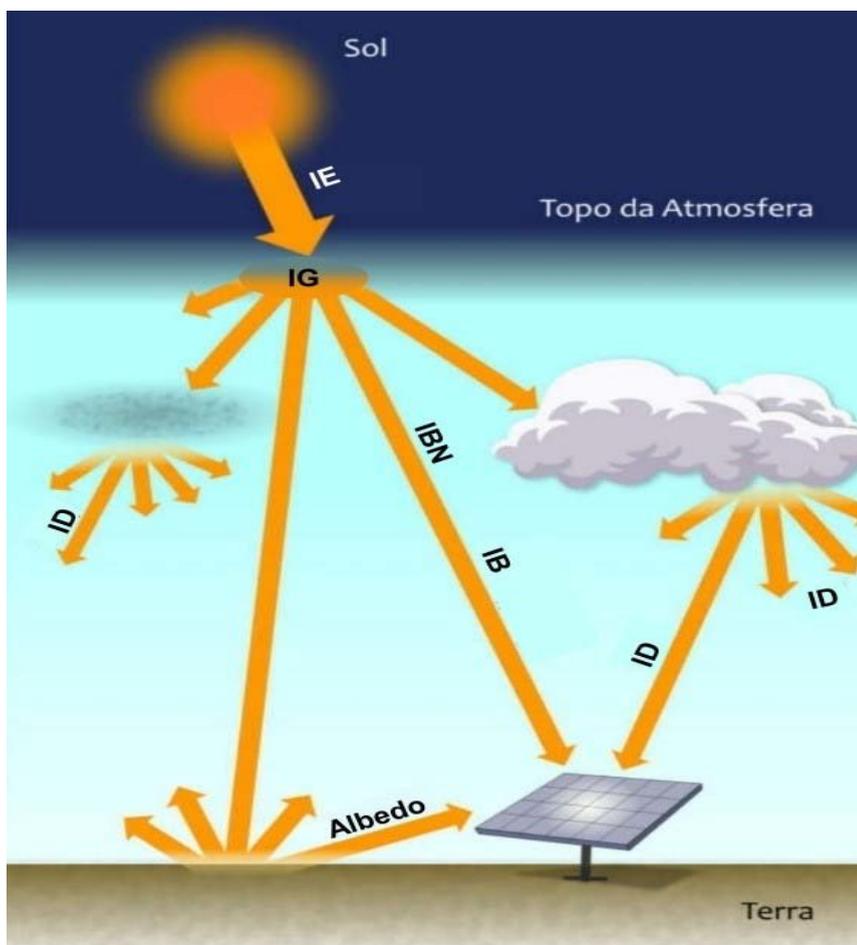
A energia do Sol é liberada como radiação eletromagnética, e quando parte dessa energia é captada pela Terra, ela sofre processos de absorção e de expansão devido às interações entre os vários comprimentos de onda da radiação e os gases constituintes da atmosfera. Os processos físicos que fazem com que a radiação solar se espalhe são provocados por moléculas de gases atmosféricos e partículas suspensas (Kaltmaier Junior, 2020).

Em geral, os processos físicos reduzem a radiação solar, fazendo com que ela atinja um pico máximo de cerca de 1.000 W/m<sup>2</sup> durante o meio-dia solar (a hora do dia em que o Sol está em sua maior elevação, permitindo que a radiação solar passe pela camada mais fina da atmosfera) quando o céu está sem nuvens (Pereira et al., 2017).

A radiação solar que atinge uma superfície é composta por componentes diretos e difusos. A radiação solar direta mostra a direção de incidência na linha imaginária entre a Terra e o Sol. A radiação proveniente de todas as outras direções que resulta de processos de espalhamento de gases e particulados na atmosfera

está incluída no componente difuso (Kaltmaier Junior, 2020). As componentes da radiação solar estão esquematicamente ilustradas na Figura 1, de acordo com a interação terrestre atmosférica.

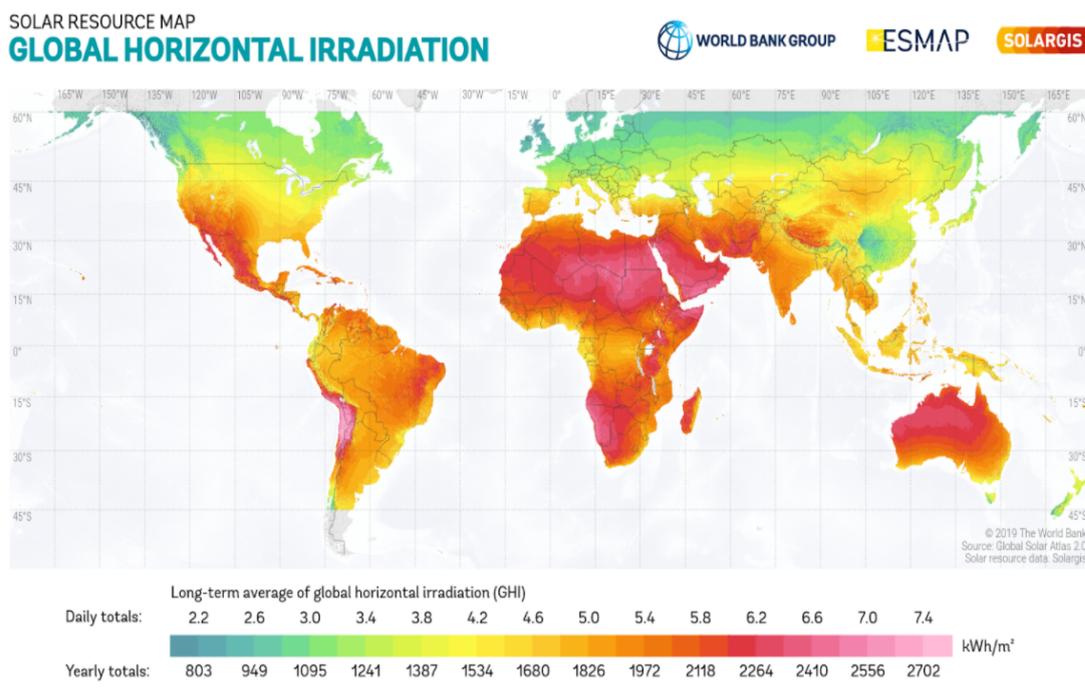
**Figura 1.** Componentes da radiação solar.



Fonte: Calca (2019).

É possível encontrar na literatura muitos mapas que mostram os diversos parâmetros da radiação solar. A disponibilidade de irradiância horizontal mundial na Terra é mostrada na Figura 2, juntamente com as quantidades médias diárias e anuais, destacando o potencial do sol em relação a um mapa do mundo.

**Figura 2.** Mapa da disponibilidade de irradiância solar global horizontal.



Fonte: Global Solar Atlas (2019).

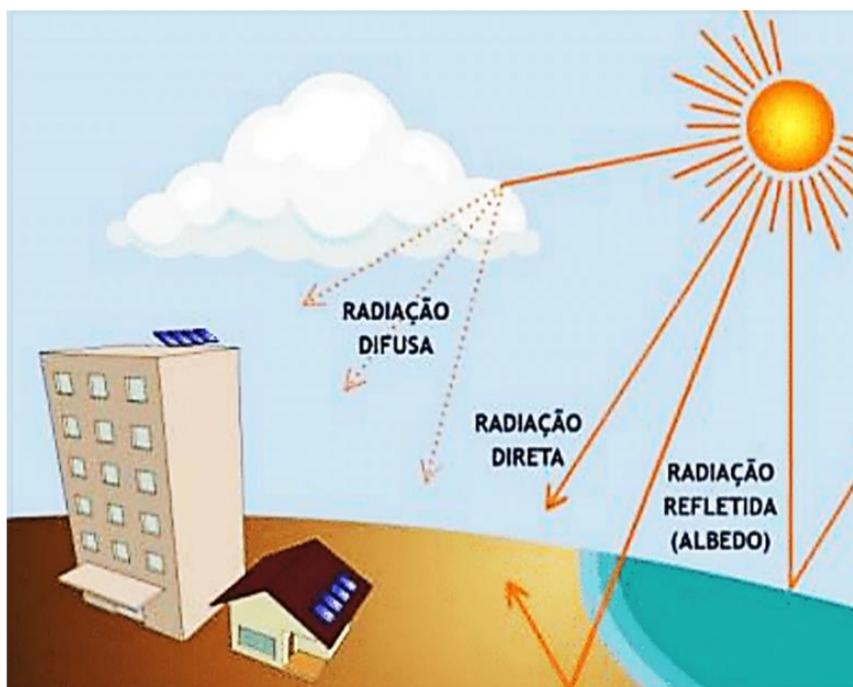
O maior potencial solar encontra-se nas regiões entre as latitudes 30° S e 35° N, ou seja, zona tropical da Terra, entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio, com destaque especial para o norte e sul do continente africano, a porção norte do continente australiano, a Península do Oriente Médio, a parte mais meridional da América do Norte, México, a parte mais setentrional do Brasil e a parte mais a sotavento da América do Sul. Nessas regiões, a irradiação anual pode chegar a 2.700 kWh/m<sup>2</sup> (Kaltmaier Junior, 2020).

A quantidade de radiação varia de acordo com o clima e com a localização em relação à Linha do Equador (portanto, tem relação direta com a latitude). Outros fatores, como os relacionados à viabilidade de fatores sociais, ambientais, técnicos, topográficos e ambientais imediatos, bem como a disponibilidade de irradiação, também são importantes e devem ser levados em consideração na avaliação da viabilidade do uso da energia solar direta.

A incidência da radiação solar sobre um material localizado na superfície é um resultado da soma das componentes: direta, difusa e refletida. De acordo com Silva, et al (2019), a radiação direta ou Irradiação Normal Direta (DNI, sigla em inglês) se caracteriza por ser proveniente diretamente do Sol, que não é dispersada, ou seja, não sofre qualquer mudança em sua direção além da que é provocada pela refração atmosférica. Por outro lado, a radiação difusa é dispersada devido às

moléculas de ar, aerossóis e nuvens. A radiação que é refletida varia de acordo com as propriedades do solo e da inclinação do equipamento captador. O produto das radiações direta, difusa e da radiação refletida do solo que chega na superfície é denominado de radiação solar total ou global (NREL, 2015), como apresentado na Figura 3.

**Figura 3.** Demonstração da composição de radiação solar em uma região.



Fonte: Cassiano (2020 p.16).

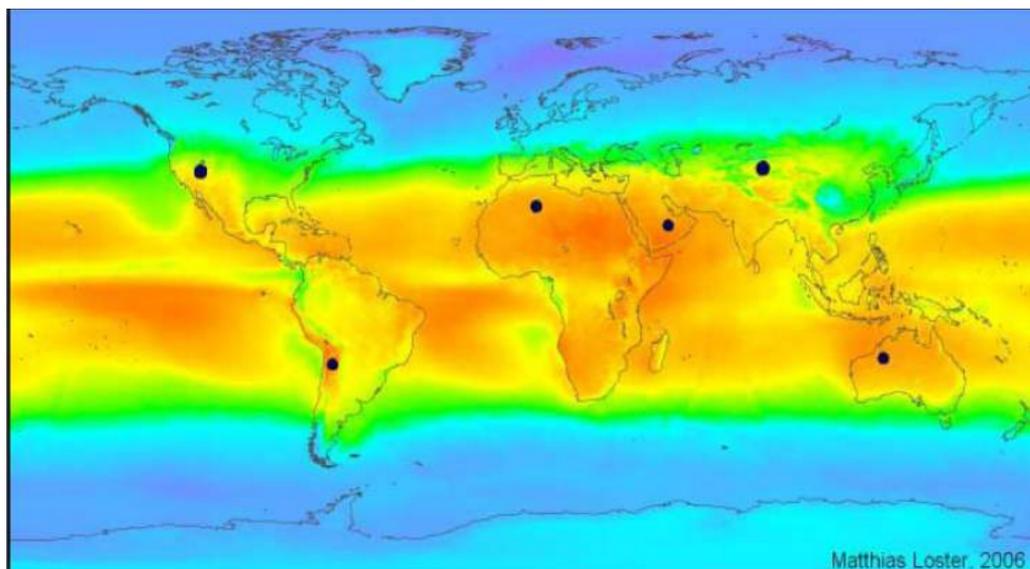
De acordo com informações do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL, 2006), a energia proveniente do sol incidente na superfície da Terra é 10.000 vezes maior que o seu consumo global atual de energia primária. A principal vantagem da energia solar é sua abundância e disponibilidade por todo o planeta. O Sol se caracteriza como uma “fonte de energia renovável, o aproveitamento desta energia tanto como fonte de calor quanto de luz é uma das alternativas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio” (Loys, 2012). O cinturão solar<sup>1</sup> (Figura 4) do planeta evidencia a posição geográfica privilegiada que o Brasil possui, o que favorece ainda mais a adoção de tecnologias solares, como a solar térmica, a fotovoltaica e a heliotérmica.

<sup>1</sup> Expressão definida pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar, elaborado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A energia solar térmica tem como princípio o aproveitamento da radiação solar em forma de calor, que é absorvida por um material, a exemplo da torre solar, utilizada em sistemas heliotérmicos. Já na fotovoltaica, a energia é obtida por meio da conversão da energia proveniente do sol com a aplicação de um material semicondutor<sup>2</sup> (Canton, 2018).

No caso das tecnologias heliotérmicas, há o funcionamento a partir da concentração da radiação solar com a utilização de refletores ou lentes que focalizam os raios solares em um receptor. Isso permite que haja a geração de calor que pode ser convertido em eletricidade ou usado na produção de energia química, como o gás de síntese<sup>3</sup> (Camêlo Cavalcanti; Brito, 1999).

**Figura 4.** O Cinturão do Sol localizado entre os trópicos na superfície terrestre.



Fonte: CEPEL (2007).

A energia solar, extremamente abundante, não emite gases de efeito estufa durante sua utilização, o que contribui para a redução das emissões de carbono e para o combate às mudanças climáticas, não prejudicando o ecossistema do planeta. Muitas vezes, ela pode ser aplicada como solução para fornecer energia para zonas periféricas e ainda não eletrificadas, principalmente em países como o Brasil, o qual possui elevados índices de insolação por todo seu território (Pereira,

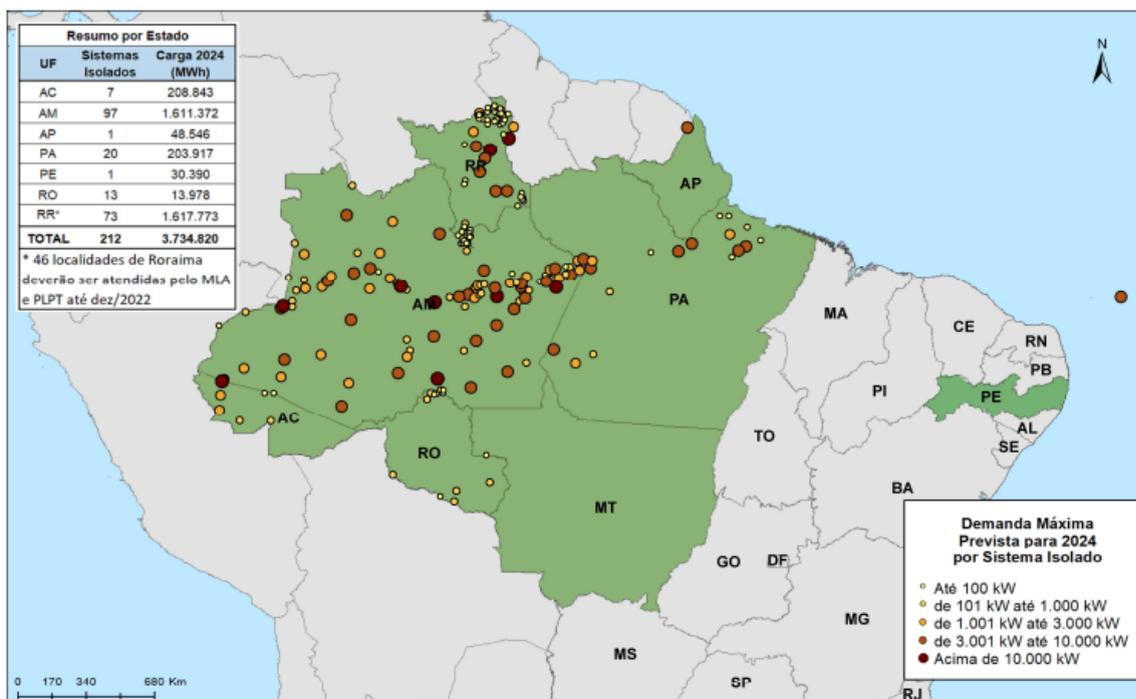
---

<sup>2</sup> Materiais semicondutores se caracterizam por serem capazes de conduzir eletricidade, quando aquecidos ou associados com outros materiais. No caso de células fotovoltaicas, o material semicondutor mais usual é o silício (Pinho; Galdino, 2014).

<sup>3</sup> É uma mistura combustível de gases, produzida a partir de processos de gaseificação, ou seja, de combustão incompleta de combustíveis sólidos.

2006). O mapa a seguir (Figura 5) evidencia as gerações elétricas de sistemas isolados no Brasil, identificados pelos pontos amarelos.

**Figura 5.** Centrais elétricas, identificadas pelos pontos amarelos, que compõem os Sistemas Isolados, 2022.



Fonte: EPE (2022).

A utilização da energia solar na arquitetura apresenta inúmeros benefícios que são bastante significativos, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Ao adicionar a captação e o aproveitamento da energia solar nas edificações, é possível reduzir a dependência de fontes de energia convencionais, diminuir os custos de energia e promover um uso mais eficiente dos recursos naturais.

Os usos da energia solar direta são divididos em cinco categorias com base na tecnologia empregada: iluminação solar passiva e natural, aquecimento e refrigeração, geração elétrica fotovoltaica, geração elétrica indireta por meio de concentradores solares térmicos e produção de combustível químico solar. As duas principais aplicações da energia solar direta são a energia solar térmica e a energia solar fotovoltaica. A energia térmica converte a radiação solar em calor utilizável (como exemplo, tem-se os coletores solares térmicos), enquanto a energia fotovoltaica transforma diretamente a energia solar em energia elétrica através de um efeito fotovoltaico (Kaltmaier Junior, 2020).

O sistema de energia solar fotovoltaica utiliza painéis solares que absorvem a radiação solar e produzem correntes elétricas que são transformadas em correntes contínuas por inversores solares. Como resultado, a eletricidade está pronta para ser usada localmente, para criar créditos de energia ou para ser armazenada (Canton, 2018).

## 2.1 BREVES CONSIDERAÇÕES DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL E NO MUNDO

É notório que a energia solar está se tornando cada vez mais importante para todo o mundo devido ao aumento do custo da energia elétrica e à emissão de gases nocivos à saúde da população. A procura deste recurso renovável tem resultado num aumento cada vez maior do investimento em sistemas fotovoltaicos (Novais; Assunção; Nascimento, 2021).

De acordo com o quadro 1, a China se destacou como o país que mais investiu nessa fonte de energia renovável em 2019, enquanto a Índia se destacou como o segundo maior país a investir nessa fonte de energia, com uma diferença de 34,2 GW, em relação à China.

**Quadro 1.** Países que mais investiram em energia solar fotovoltaica em 2018.

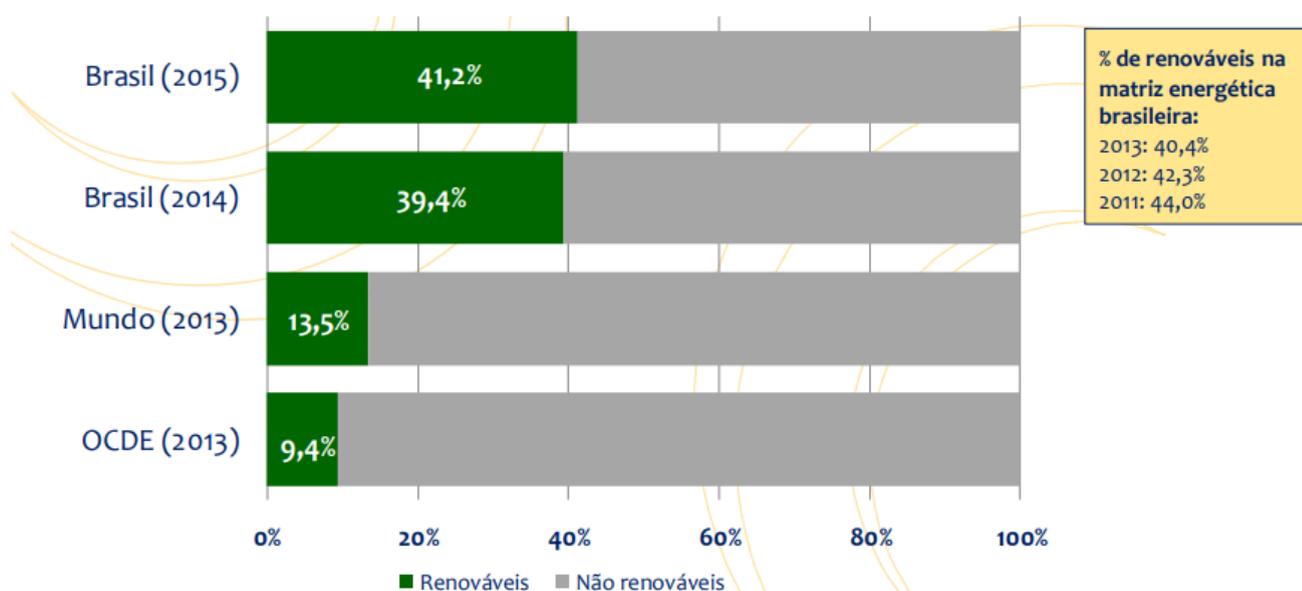
1º	China	45,0 GW
2º	Índia	10,8 GW
3º	USA	10,6 GW
4º	Japão	6,5 GW
5º	Austrália	3,8 GW
6º	Alemanha	3,0 GW
7º	México	2,7 GW
8º	Coreia do Sul	2,0 GW
9º	Turquia	1,6 GW
10º	Holanda	1,3 GW

Fonte: Novais; Assunção; Nascimento (2021).

Atualmente, no cenário mundial, é possível notar uma crescente necessidade na utilização de alternativas mais eficientes, tecnológicas, sustentáveis e viáveis em diversos setores da sociedade, dentre os quais, no setor da construção civil.

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional – Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), a matriz energética mundial considerada renovável chegava a 13,5%, enquanto a nacional estava em 41,2%, no ano de 2015 (Figura 6).

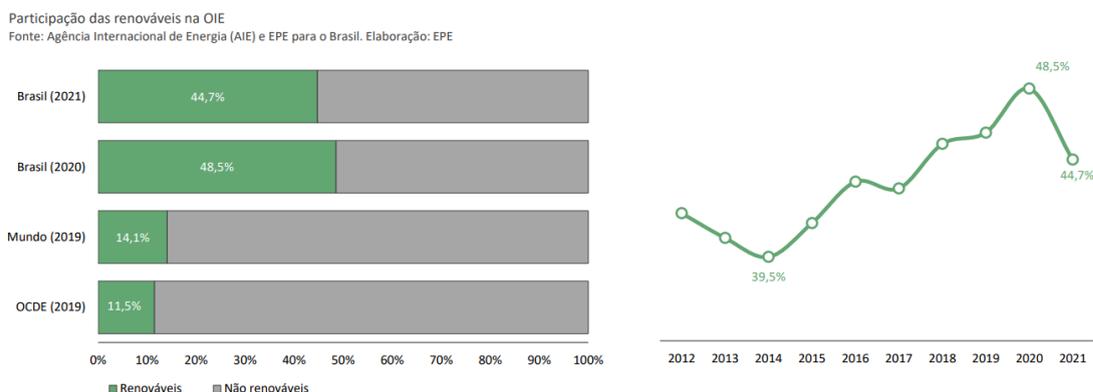
**Figura 6.** Gráfico comparativo da matriz energética renovável mundial e Brasil.



Trazendo como comparativo o ano de 2022, dados do Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN), produzido anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022<sup>4</sup>), apresentam que o aumento do uso das fontes eólica e solar na geração de energia elétrica e o biodiesel puderam garantir a manutenção do nível renovável da matriz energética no Brasil em 44,7%, bastante superior ao nível mundial, que apresentou o percentual de 14,1%, no ano de 2019 (Figura 2).

<sup>4</sup> Ano base 2021, em que foram fornecidas as informações consolidadas acerca da quantidade e da maneira que foi utilizada a energia no Brasil, em 2021.

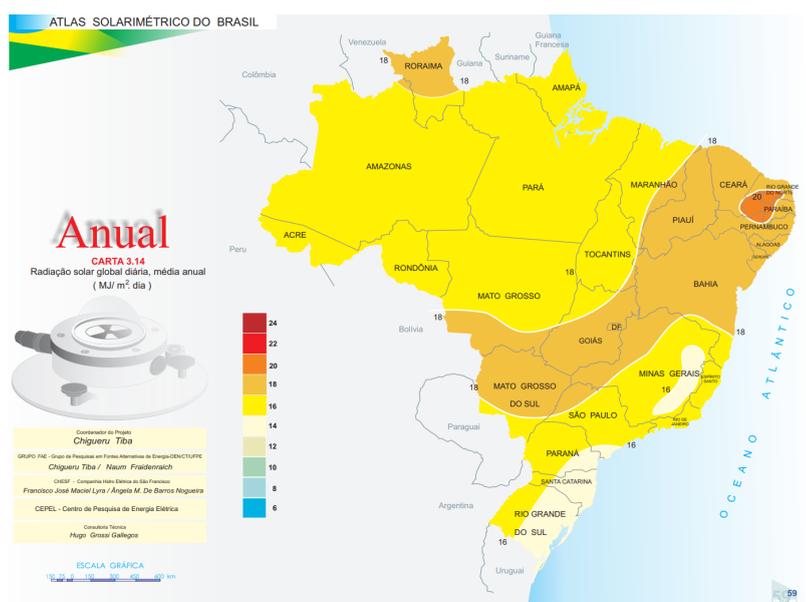
**Figura 7.** Gráfico comparativo da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia.



Fonte: MME (2022).

Não obstante, vale indicar o grande potencial de aproveitamento da radiação solar em sistemas de captação solar por todo o território brasileiro – como pode-se notar no mapa de radiação solar anual brasileiro, disponibilizado pelo Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos, 2000 (Figura 8) –, o que torna bastante oportuna a aplicação desse tipo de captação, não só no modelo convencional, nas cobertas das edificações, mas, também, a partir da exploração de diversas possibilidades, aplicando esse sistema em estruturas e em elementos arquitetônicos.

**Figura 8.** Mapa de radiação solar global diária, média anual ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ).



Fonte: Chigueru Tiba et al. (2000, p. 59).

Na Figura 8, pode-se notar que a região Nordeste possui os maiores índices solares anuais, o que evidencia o potencial energético da região, possibilitando aplicar diversos projetos de captação solar em edificações verticalizadas, buscando gerar energia que seja capaz de suprir as necessidades de conforto ambiental dos usuários e a eficiência energética.

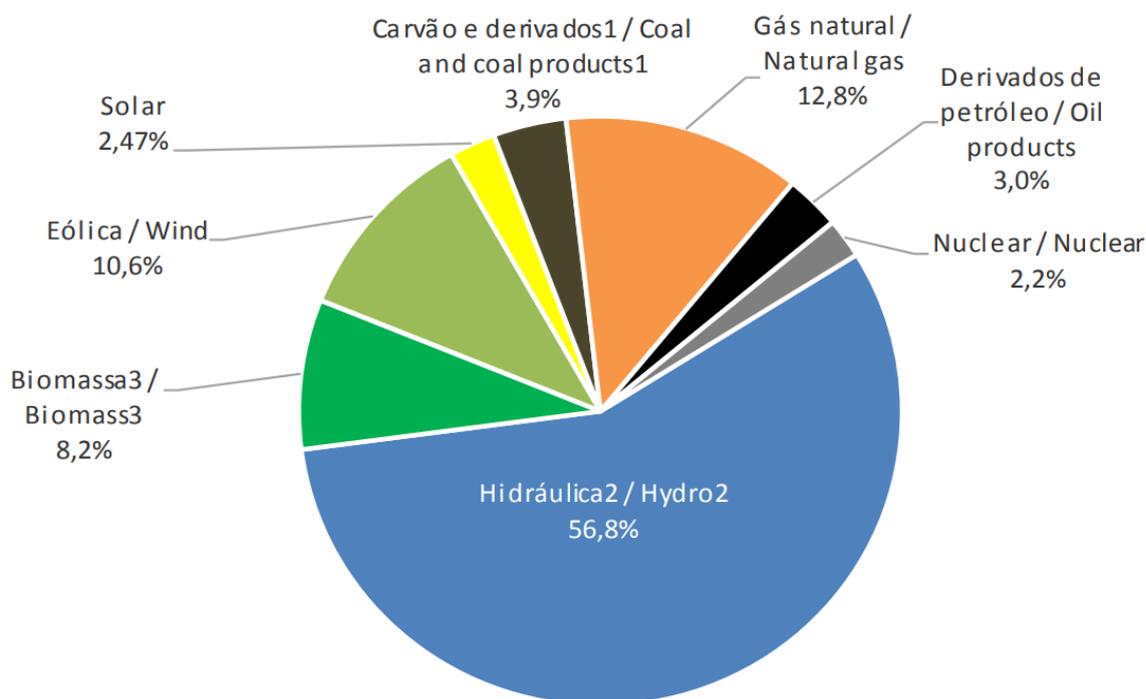
É necessário enfatizar que, em projetos fotovoltaicos, é também responsabilidade dos arquitetos proporcionar maior eficiência na captação dos raios solares pelos módulos, incorporando o sistema na edificação, sem sacrificar o viés da estética.

De acordo com o Relatório Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática (IPCC, 2007), publicado originalmente pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), a energia solar pode ser dividida em três categorias: solar ativa, solar passiva e solar fotovoltaica, diferenciadas em sua implementação e função.

A arquitetura solar ativa se utiliza da tecnologia fotovoltaica a fim de coletar, armazenar e distribuir energia solar. Nesse tipo de categoria, inclui-se a instalação de painéis solares, sistemas de aquecimento solar e refrigeração solar, dentre outros métodos ou dispositivos que maximizem a geração e o uso de energia solar (Santos, 2013). A arquitetura solar passiva incorpora elementos construtivos e estéticos que ampliam a utilização da energia solar sem a utilização da tecnologia. Por exemplo, a utilização de materiais de construção adequados para cada zona climática, a orientação da edificação em relação ao sol e a utilização de técnicas que aproveitem a ventilação e iluminação naturais (Canton, 2018).

Apesar da grande capacidade de irradiação solar do Brasil, a grande maior parte da Oferta Interna de Energia Elétrica (OIE) no país é oriunda da geração hidráulica, sendo essa 56,8% (MME, 2022), que, apesar de ser considerada renovável, aporta muitos malefícios sociais e ambientais, como, por exemplo, a necessidade de alagamento de grandes áreas e a relocação de populações ribeirinhas nos locais das hidrelétricas e nas regiões próximas. Enquanto isso, a energia solar representou apenas 2,47% desta oferta de energia no ano de 2022 (Figura 9). As Figuras 10 e 11 mostram equipamentos utilizados para gerar energia elétrica a partir da energia solar.

**Figura 9.** Gráfico de Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil por fonte.



Fonte: MME (2022).

A fim de se obter a energia elétrica como produto a partir da energia proveniente do Sol, existe um processo de captação e conversão da radiação que ocorre por meio de um kit de energia solar. Esse kit conta com os módulos fotovoltaicos – ou painéis solares –, compostos pelas “células” que absorvem a radiação solar, sendo estes o ponto principal e inicial do sistema. Após a captação dos raios solares e a transformação pelos módulos, há a necessidade de ser convertida de maneira que possa atuar nos aparelhos eletrônicos, sendo o inversor de frequência responsável por transformar a corrente contínua em corrente alternada, de acordo com a necessidade da edificação (110 ou 220 volts). No caso de sistema *on-grid* (conectado à rede elétrica), o inversor faz o direcionamento da energia excedente (que não é utilizada) para a rede, gerando créditos, e em sistemas *off-grid* (não conectado à rede elétrica), a energia é injetada no banco de baterias (HCC Energia Solar, 2022).

**Figura 10.** Inversor, String Box e Quadro de CA.



Fonte: Foto: Aline Rodrigues (2023).

No caso de sistemas *on-grid*, existe, ainda, um medidor bidirecional, o qual codifica qual é o destino da energia gerada nos dois sentidos: da rede de distribuição para o imóvel e do sistema para a área da distribuidora. Isso ocorre porque, caso a energia gerada não seja consumida de imediato, ela se torna excedente, sendo aplicada na rede elétrica. O *string box*, ou caixa de junção (Figura 10), entra como um equipamento de segurança para o sistema, protegendo os módulos contra qualquer tipo de impacto que prejudique o funcionamento das células, atuando como um disjuntor para qualquer tipo de reparação do sistema. Contudo, vale pontuar que o *string box* é utilizado apenas em sistemas que se utilizam de inversores comuns. Os sistemas instalados com microinversores (Figura 11) não necessitam da caixa de junção, pois esta já vem acoplada (HCC Energia Solar, 2022).

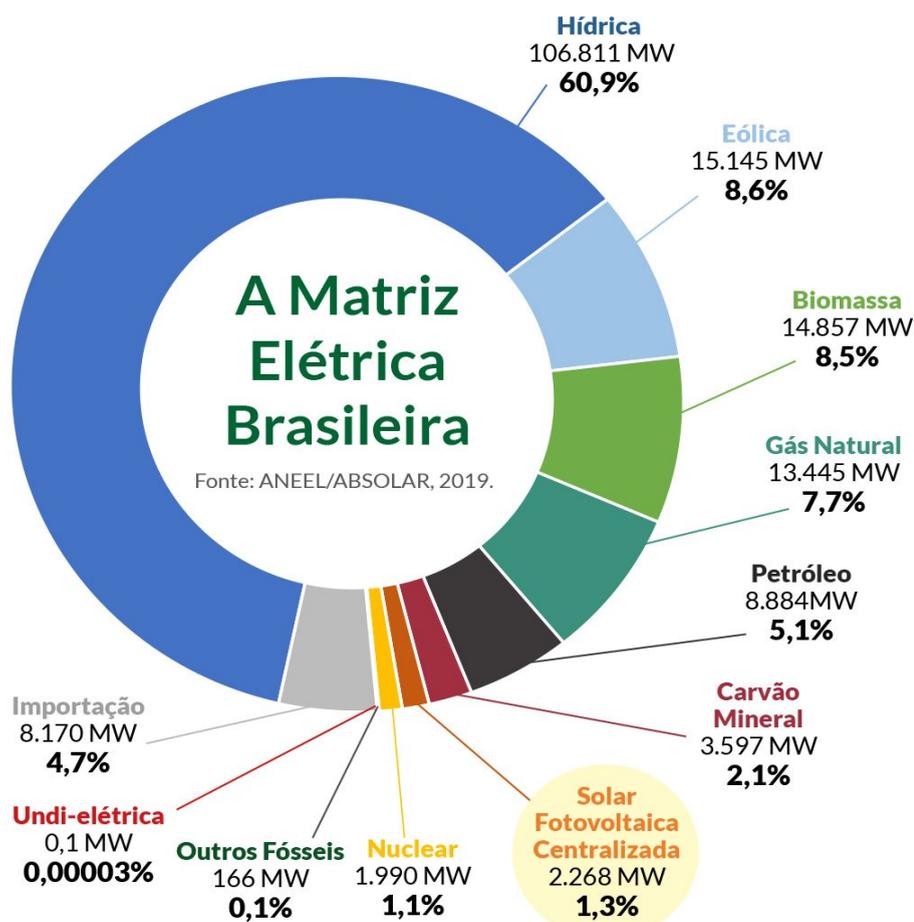
**Figura 11.** Microinversor.

Fonte: Foto: Aline Rodrigues (2022).

Tratando-se da captação da energia através do sol e sua aplicação à arquitetura, além da capacidade de fornecer energia limpa e renovável, os painéis solares são capazes de proporcionar outros benefícios para um projeto arquitetônico. Por exemplo, eles podem ser incorporados à edificação, tornando-se elementos estéticos, como diferentes formas de cobertura ou ainda sendo utilizados como substituição dos vidros de janelas, entre outros, e podem reduzir os custos energéticos a longo prazo, tornando-se vantajoso para os proprietários e usuários do edifício.

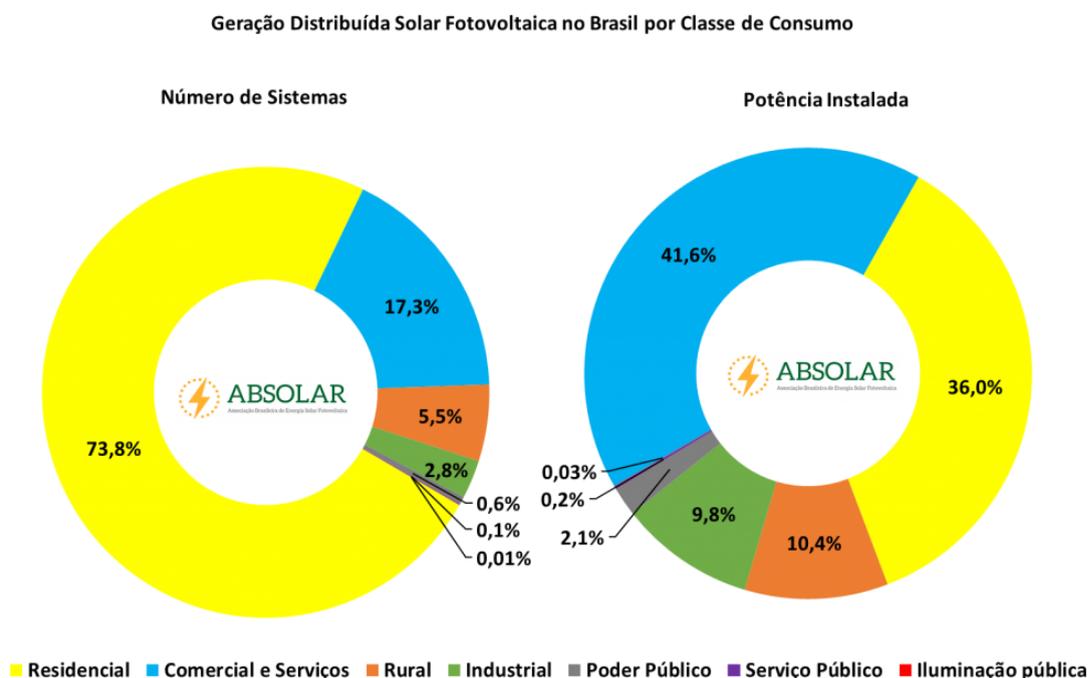
Como pode ser visto na Figura 12, o Brasil tem acesso a uma variedade de fontes de energia elétrica, com destaque para as fontes de hidrocarbonetos, eólica, biomassa, gás natural e petróleo. Com 1.268 MW de potência acumulada, a produção centralizada de energia solar fotovoltaica ainda ocupa 1,3% da rede elétrica (Portal Solar, 2019).

**Figura 12.** Matriz elétrica brasileira em 2009.



Fonte: Absolar (2019).

De acordo com os dados da Absolar, o Brasil possui atualmente 93.597 sistemas de energia solar fotovoltaica conectados à rede, representando um montante de investimentos acumulados que ultrapassam os R\$5,6 bilhões. Essa significativa injeção de recursos permitiu ao país alcançar um marco histórico, atingindo a marca de 1 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica. Esses sistemas estão distribuídos em diversos tipos de edifícios, incluindo residenciais, comerciais, industriais, propriedades rurais, prédios públicos e pequenas propriedades (Portal Solar, 2019).

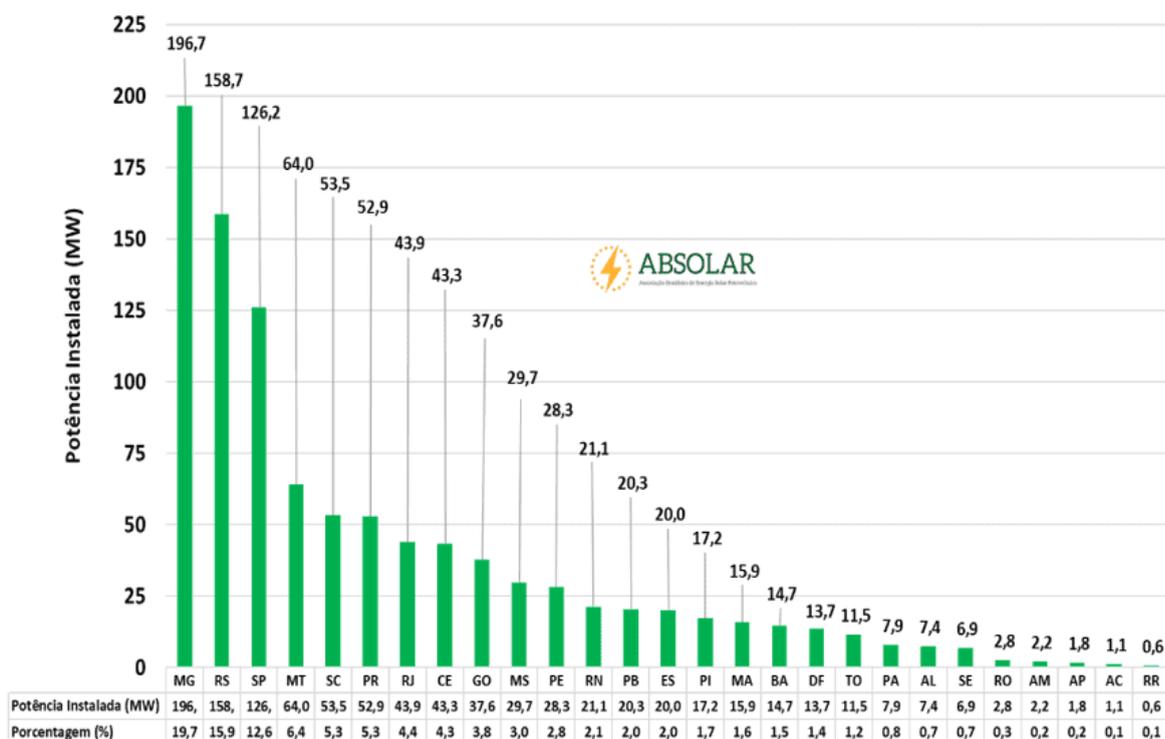
**Figura 13.** Geração distribuída solar fotovoltaica no Brasil por classe de consumo.

Fonte: Portal Solar (2019).

Conforme ilustrado na Figura 13, é evidente que os consumidores residenciais representam a maior fatia do consumo, com 73,8% dos sistemas instalados. Em seguida, o setor comercial e de serviços compreende 17,3%, enquanto a zona rural contribui com 5,5%. As indústrias ocupam uma parcela de 2,8%, seguidas pelo poder público com 0,6%, serviço público com 0,1% e iluminação pública também com 0,1% (Portal Solar, 2019).

Quando comparados os valores percentuais com a potência instalada, têm-se que, apesar do Brasil ainda possuir uma pequena parcela na matriz energética em energia solar fotovoltaica, quando comparada com as demais fontes energéticas, apresenta alto índice de crescimento.

Por intermédio de sua localização geográfica favorável, que resulta em altos índices de irradiação solar, o Brasil se destaca como um dos países mais propícios para a geração de energia solar. É notável que o estado de Minas Gerais, com sua capacidade instalada de 196,7 GW, se destaque como um importante produtor de energia solar no país, como apresentado na Figura 14 (Portal Solar, 2019).

**Figura 14.** Ranking nacional de geração solar distribuída fotovoltaica.

Fonte: Portal Solar (2019).

## 2.2. LEGISLAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

O governo brasileiro criou a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 1996, com a tarefa de regular o uso de energia no país. Essa lei ficou conhecida como Lei 2.427/96. Desde então, a agência estabelece as regras e pré-requisitos para a utilização de qualquer fonte de energia elétrica no país. De acordo com a lei, a ANEEL é responsável por regular e tributar qualquer produção, transmissão, distribuição e comercialização relacionada à ingestão (Miranda, 2022).

O Decreto 2.335/97 foi desenvolvido como um acréscimo à lei e trata da organização interna da agência, incluindo suas capacidades, responsabilidades, status e autonomia, entre outras coisas. As leis que regem a energia solar provêm tanto de resoluções da ANEEL quanto de leis elaboradas e redigidas pelo Governo Federal (Miranda, 2022).

A experiência nacional sugere que o Brasil está tentando introduzir o uso da energia solar fotovoltaica ao longo de vários anos por meio de programas de incentivo. No entanto, o que foi feito até agora não foi suficiente para garantir o desenvolvimento de um mercado para este tipo de aplicação, porque a energia solar

fotovoltaica não foi efetivamente tida em conta pelas políticas públicas de longo prazo ou pela legislação atual, apesar de que o país já começou a fornecer incentivos para outras fontes de energia renováveis através do PROINFA<sup>5</sup> e tem um potencial significativo para a sua utilização (Jannuzzi; Varella; Gomes, 2009).

Os incentivos financeiros para alguns equipamentos e o Centro Brasileiro para Desenvolvimento de Energia Solar Fotovoltaica (CB-Solar) contribuem com o uso da energia solar fotovoltaica em sistemas conectados à rede. Existem projetos de pesquisa em andamento no país, a maioria deles em instituições de ensino e pesquisa e alguns deles em empresas, mas não constituem um esforço coordenado focado em uma política pública específica, bem estruturada e de longo prazo (Jannuzzi; Varella; Gomes, 2009).

Um passo significativo foi dado em novembro de 2008, quando foi criado o Grupo de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos (GT-GDSF), sob a responsabilidade do Ministério de Minas e Energia (MME), com o objetivo de desenvolver um programa com proposta de políticas públicas de curto, médio e longo prazo para introdução da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica do país (Jannuzzi; Varella; Gomes, 2009).

Embora o Brasil não tenha feito muito progresso na introdução da tecnologia solar fotovoltaica, já existem alguns incentivos financeiros para alguns equipamentos fotovoltaicos. Os dois tributos mais significativos que incentivam o uso de determinados equipamentos fotovoltaicos são o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) federal e o ICMS estadual sobre circulação de mercadorias e preservação de serviços (Jannuzzi; Varella; Gomes, 2009).

Ademais, as deduções do Imposto de Transmissão de Bens Imóveis (ITBI), do Imposto sobre Serviços (ISS) e uma redução de até 20% do Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) também são fornecidas por muitas cidades como incentivos financeiros para usuários de sistemas fotovoltaicos de micro ou minigeração (Santos Guimarães; Minari Junior; Florian, 2022).

Uma das resoluções mais significativas para a indústria solar brasileira foi divulgada pela ANEEL em 2012, e é conhecida como REN 482. A medida permitiu que a cidade gerasse sua própria energia. Como resultado desta legislação, as concessionárias geradoras de energia elétrica são agora obrigadas a desenvolver mecanismos que permitam aos consumidores gerar a sua própria energia, seja nas

---

<sup>5</sup> Programa de Incentivo a Fontes Alternativas.

suas residências ou empresas. Isto é, uma troca: produção excedente produzida por equipamentos de energia solar em troca de benefícios relacionados à luz (Miranda, 2022).

Se for produzida mais energia do que realmente será utilizada e não forem utilizados métodos de armazenamento de energia solar, o excesso poderá ser injetado na rede de distribuição. O resultado é a geração de créditos energéticos. Trata-se de uma espécie de bônus de energia elétrica que poderá ser aproveitada posteriormente caso não seja possível gerar energia suficiente para abastecer uma empresa ou uma residência. O uso de cartões de crédito de energia solar no Brasil foi regulamentado pela REN 482. No entanto, a ANEEL criou a Resolução Normativa 687 (REN 687) em 2015, juntamente com algumas modificações. A nova resolução trouxe muitas mudanças; alguns consideram isso um avanço significativo para a indústria solar (Miranda, 2022).

O legislador brasileiro instituiu o PRONASOLAR (Política Nacional de Energia Solar e Fotovoltaica), em 2018. O objetivo desse programa é aumentar o uso de fontes de energia renováveis no país, com foco na energia solar e fotovoltaica. O estabelecimento de linhas de crédito para energia solar é um dos benefícios desta legislação (Miranda, 2022).

A NCM (Nomenclatura Comum do Mercosul para categorização de Mercadorias) e a Tabela IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) de equipamentos e produtos foram atualizadas pelo Ministério da Economia por meio do Decreto nº 10.923/2021. As mudanças, que levariam a um aumento da carga tributária sobre os painéis solares importados, causaram preocupação na indústria solar, e a ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica) imediatamente entrou na defesa (Brasil Solar, 2022).

O Projeto de Lei PL5829/19 foi aprovado pelo Presidente da República em 6 de janeiro de 2022, tornando-se o novo Marco Solar no Brasil pela Lei 14.300/22. A nova lei trouxe muitas mudanças para o setor de energia solar, sendo elas:

1. Aquele que já possui o sistema solar instalado e quem instalar o novo sistema solar até final deste ano, terá os créditos de energia sem alterações até final de 2045 (1kWh de crédito para cada 1 kWh injetado na rede).
2. Maior segurança jurídica, Resolução Normativa 482/12 poderia ser alterada a qualquer momento pela Aneel.
3. Permissão para instalar sistemas híbridos com baterias de forma legal, item ainda em análise para regulação pela ANEEL.

4. Permissão para venda dos créditos de energia para concessionária, item ainda em análise para regulação pela ANEEL.
5. Não haverá mais cobrança em duplicidade da taxa mínima.
6. Maior possibilidade de criação de usinas solares compartilhadas.
7. Mais facilidade para distribuir créditos de energia, o prazo para alterações reduziu de 60 para 30 dias.
8. Permite o abatimento de créditos entre concessionárias e permissionárias de energia.
9. Benefícios ambientais dos sistemas solares serão valorados e remunerados, a partir de março de 2022.

A existência de leis e regulamentações específicas para sistemas fotovoltaicos no Brasil é de extrema importância por diversas razões, que abrangem aspectos técnicos, econômicos e ambientais. É válido pontuar alguns pontos-chave que ilustram essa importância:

1. **Padronização e Segurança:** Leis e regulamentos estabelecem padrões técnicos e de segurança para a instalação de sistemas fotovoltaicos. Isso garante que esses sistemas sejam instalados corretamente, minimizando riscos de incêndios, choques elétricos e outros problemas potencialmente perigosos (Silva; Araújo, 2017).
2. **Incentivo ao investimento:** Regulamentações claras podem oferecer incentivos fiscais para a instalação de sistemas fotovoltaicos, tornando o investimento mais atraente para proprietários residenciais e comerciais. Esses incentivos podem ajudar a acelerar a adoção da energia solar no país (INMETRO, 2020).
3. **Interconexão com a rede elétrica:** Leis definem os procedimentos de interconexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. Isso é essencial para garantir a estabilidade do sistema elétrico e permitir que os proprietários de sistemas solares vendam o excesso de energia gerada de volta à rede (*net metering*<sup>6</sup>) (ANEEL, 2021).
4. **Proteção dos consumidores:** Regulamentações também protegem os consumidores, garantindo que eles tenham informações claras sobre os custos, benefícios e responsabilidades associadas à instalação e à operação de sistemas fotovoltaicos. Isso evita práticas enganosas no mercado solar (IDEC, 2020).

---

<sup>6</sup> **Net metering** é um sistema de medição de energia que permite que proprietários de sistemas de geração, como painéis solares, meçam a energia consumida e gerada, compensando os excedentes (EIA - U.S. Energy Information Administration, 2023).

5. Sustentabilidade Ambiental: A regulação pode promover práticas sustentáveis na indústria solar, como o descarte adequado dos painéis solares no final de sua vida útil e o uso de materiais ecologicamente corretos na fabricação de componentes fotovoltaicos. Isso contribui para a redução da pegada de carbono (INEE, 2019).

### 3. INTEGRAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA ARQUITETURA

As preocupações com a sustentabilidade do mundo e os desafios colocados pelas alterações climáticas têm-se refletido nas propostas de projetos dos edifícios. Em países desenvolvidos, que utilizam frequentemente combustíveis para geração de energia, os edifícios respondem por cerca de 40% do uso de energia primária (Ferrer; Garrido; 2013).

A energia mais barata e menos poluente é aquela que não se gera, que não se produz. Assim, as medidas destinadas a reduzir a procura por meio de intervenções arquitetônicas, em outras palavras, projetando uma “arquitetura bioclimática”, devem servir de ponto de partida para qualquer reabilitação ou para projetos novos. Quando falamos de arquitetura bioclimática, trazemos à tona a necessidade do aproveitamento dos recursos naturais próximos e a adequação da edificação ao clima, satisfazendo as necessidades dos usuários. Nesse contexto, recomenda-se fazer uso significativo da energia solar nas edificações. Como premissa, é necessário levar em consideração os requisitos térmicos e elétricos. Para isso, devem ser consideradas as aplicações de energia solar passiva e os sistemas fotovoltaicos que devem ser integrados ao edifício (Ferrer; Garrido, 2013).

Há dois fatores a serem considerados: o uso passivo de energia solar e o uso ativo de energia solar baseado em sistemas solares térmicos ativos, ou seja, sistemas que convertem a radiação solar em energia térmica usando mecanismos ativos. O avanço tecnológico que levou ao coletor solar de placa plana e aos sistemas de armazenamento demonstrou sua ampla aplicação. A produção de água quente sanitária é muitas vezes a aplicação mais utilizada. Captor, armazenador e transferência de energia (condutos, bombas, trocadores) são todos componentes de uma instalação solar, e integrá-los ao sistema é tão crucial quanto escolher os componentes certos para ele (Ferrer; Garrido, 2013).

#### 3.1 APROVEITAMENTO SOLAR PASSIVO

O aproveitamento solar passivo e a eficiência energética estão intimamente relacionados. Para atingir este objetivo em termos de eficiência energética dos edifícios sem reduzir o nível de conforto térmico exigido pelas pessoas que os ocupam, surgiu um conceito mais abrangente conhecido como “arquitetura

bioclimática” ou “arquitetura energeticamente consciente” (Ferrer; Garrido, 2013). Na verdade, mesmo que o conceito tenha sido cunhado no século XX, os preceitos da arquitetura bioclimática são muito antigos. Os povos antigos já faziam uso de recursos naturais para obtenção do conforto dos usuários.

O objetivo da arquitetura bioclimática é lançar as bases para a construção de edifícios racionalmente construídos, de modo que os níveis de conforto necessários sejam mantidos com o mínimo de uso de energia convencional. Como resultado, estratégias de projeto que melhor aproveitam as condições ambientais locais (energia solar disponível, temperatura externa, direção dominante do vento, etc.) devem ser levadas em consideração (Coelho; Cruz, 2017).

Ferrer e Garrido (2013) afirmam que é óbvio que este método de utilização da energia solar é o mais antigo e orgânico. Assim, os fundamentos da arquitetura bioclimática são encontrados em grande parte da arquitetura popular. O dilema, porém, mudou com o avanço da tecnologia, descobrindo novos materiais que estimularam o avanço das pesquisas na área da construção a fim de alcançar, dessa forma, um baixo consumo de energia.

No momento em que se está concebendo o projeto arquitetônico, é imperativo levar em consideração os recursos naturais disponíveis, que podem ser empregados como fontes ou dissipadores de calor, dependendo da finalidade desejada: seja para aquecimento ou refrigeração. As fontes englobam fatores climáticos externos, como radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa, direção e intensidade do vento. Já os dissipadores podem ser a própria terra (através de condutos enterrados), a atmosfera e o céu (mediante temperatura aparente) (Coelho; Cruz, 2017).

É fato que há diversos profissionais que buscam incorporar as estratégias bioclimáticas em seus projetos arquitetônicos, mas, muitas vezes, apenas em relação à iluminação e à ventilação naturais, o que, de certa forma, garante o básico aos usuários, a depender do tipo climático. Contudo, a arquitetura bioclimática vai muito além do conforto térmico e lumínico (França, 2018).

De acordo com Pietrobon (1999), denomina-se Arquitetura Bioclimática, considerando a tríade vitruviana (firmitas, utilitas e venustas), aquela que se baseia em aspectos físicos, climático-ambientais e na relação com as diversas funções humanas. Essa arquitetura é pautada na utilização correta dos elementos arquitetônicos, propondo fornecer ao ambiente edificado alto grau de conforto

higrotérmico, com o menor consumo energético possível, ou seja, potencializar as relações energéticas com o ambiente natural em sua volta através do projeto arquitetônico.

Contudo, de acordo com alguns teóricos, como Izard e Guyot (1983), Bardou e Arzoumanian (1984) e Mascaró (1983), o conceito de Arquitetura Bioclimática carrega consigo a necessidade de definição de alguns termos usuais nessa linha arquitetônica (UFSC, 02/94):

PASSIVO: “Princípio de captação de energia, armazenamento e/ou distribuição capaz de funcionar sozinho sem aportação de energia exterior e que implica técnicas simples”

ATIVO: “Princípio de captação de energia, armazenamento e/ou distribuição que necessita para o seu funcionamento de aportação de energia exterior e que implica alta tecnologia”

SOLAR: “Arquitetura em cuja concepção se integram realmente os elementos do sistema de utilização da radiação solar na envoltória edificada” (UFSC, 02/94).

O objetivo do projeto de Arquitetura Bioclimática é, portanto, prover um ambiente construído com conforto físico, sadio e agradável, adaptado ao clima local, que minimize o consumo de energia convencional e precise da instalação da menor potência elétrica possível, o que também leva à mínima produção de poluição (Corbella; Yannas, 2009).

Um projeto bioclimático é aquele que visa conferir aos ambientes construídos uma maior capacidade de permitir aos ocupantes usufruir do conforto ambiental (conforto térmico e luminoso). Isto é conseguido através da incorporação de estratégias e soluções de regulação térmica passiva na fase de projeto dos edifícios, com foco principalmente na orientação solar e na seleção de materiais e formas de construção (França, 2018).

Segundo França (2018), algumas das melhores maneiras de incentivar projetos de edifícios adequados ao clima incluem o gerenciamento da radiação solar, da umidade e da ventilação, por meio:

Do modo de implantação e orientação: as edificações recebem mais radiação solar pelo norte, no hemisfério sul, e pelo sul, no hemisfério norte, havendo ainda a variação de incidência solar leste-oeste ao longo do dia;

Da forma (relativamente ao grau de compactidade): as formas compactas conservam mais energia térmica, enquanto as formas alongadas a perdem com mais facilidade;

Das dimensões, orientação e proteção das aberturas: as aberturas determinam enormemente os ganhos térmicos de uma edificação, podendo

vir a determiná-los até mais que o grau de compacidade da forma. As aberturas determinam também a entrada de ventos e umidade;  
Das propriedades dos materiais das vedações e seus revestimentos (relativamente ao isolamento ou permeabilidade): as propriedades específicas dos materiais e das cores representam a porcentagem de energia térmica que eles absorvem e a velocidade com que permitem a passagem desse calor através de si para o interior da edificação;  
Do emprego da vegetação: as plantas absorvem a radiação solar em seus processos fisiológicos, utilizando parte daquela energia que viria a se tornar calor lançado no ambiente e, assim, contribuem para reduzir a temperatura do ar e das superfícies à sua volta (França, 2018, p. 33).

As decisões de projeto fazem a diferença na capacidade do edifício de se resfriar passivamente no verão e de se proteger do frio no inverno. É por isso que as estratégias bioclimáticas nascem do local e do clima, adaptadas a cada ambiente.

Ao longo da história, níveis adequados de conforto interior em edifícios foram obtidos através da exploração e aplicação cuidadosa dos materiais de construção e das suas propriedades físico-químicas, em conjunto com a dinâmica climática local, desde polares a desérticos, passando por climas temperados, tropicais e equatoriais (França, 2018).

Antes da descoberta e do uso generalizado da eletricidade, fontes de energia como fogo, petróleo e gás eram utilizadas para gerar calor para climatizar ambientes. Em termos de resfriamento, em climas quentes foram utilizadas técnicas como ventilação e sombreamento (essenciais em climas quentes e úmidos), bem como resfriamento evaporativo (adequados aos climas quentes e secos) Estas são o que chamamos em termos gerais de "estratégias bioclimáticas" ou "estratégias passivas de regulação climática" e têm sido utilizadas desde os primeiros assentamentos humanos até os dias atuais (França, 2018).

Em nações de climas muito frios, as residências apresentam uma estrutura compacta com aberturas minimizadas e posicionadas de modo a evitar a perda de calor para o exterior mais gélido. Nos iglus, situados em regiões polares, a utilização do gelo nas densas paredes explora as propriedades isolantes desse material, permitindo a manutenção de uma temperatura interna de 15°C, mesmo quando a temperatura exterior gira em torno de -45°C (Olgyay, 1998).

Em áreas caracterizadas por climas quentes, áridos e desérticos, onde a radiação solar é intensa e as flutuações térmicas entre dia e noite são amplas, adota-se uma abordagem semelhante. Nesse contexto, as construções devem possuir paredes espessas com alta capacidade térmica, retardando a transferência de calor durante o dia e liberando-o no interior durante a noite, quando esfria. O

princípio central é minimizar as áreas expostas ao sol, resultando na prevalência de arranjos arquitetônicos que criam sombras mutuamente e oferecem um isolamento térmico mais eficaz (Lamberts, 2016).

Nesse tipo de clima, onde os ventos são consistentemente quentes e tendem a reduzir ainda mais a já baixa umidade do ar, as aberturas devem ser minimizadas. Além disso, pátios internos sombreados são recomendados, protegendo contra os ventos secos. Para filtrar a iluminação natural, superfícies exteriores refletoras de tons claros são utilizadas (Mascaró, 1983). Materiais como pedra, barro, adobe e tijolo são frequentes nessas construções, devido às suas propriedades isolantes proporcionadas pela inércia térmica.

Por outro lado, em locais com clima tropical quente e úmido, a principal tarefa das edificações é controlar a intensa radiação solar e manter uma ventilação constante para dissipar a umidade e diminuir a temperatura. Isso demanda aberturas amplas, protegidas contra o sol e a chuva. Para facilitar a circulação de ventos, as construções devem estar espaçadas e incorporar vegetação, principalmente a arbórea, para sombreamento e resfriamento natural das brisas. Vedações finas e leves são preferidas para permitir trocas térmicas rápidas e evitar a retenção de umidade (Van Lengen, 2014). Em tal clima, as coberturas desempenham um papel crucial, mais significativo do que as paredes, proporcionando sombreamento eficiente, exaustão do ar quente interno e escoamento das chuvas frequentes, sendo necessário que sejam inclinadas. Madeira, telhas cerâmicas e palhas de palmeiras são materiais típicos das construções vernaculares nessas áreas.

Em climas temperados, onde as condições de temperatura e umidade são menos severas e as condições climáticas são mais propícias ao conforto humano, as estruturas podem ser construídas com maior liberdade e variedade expressiva. A correta orientação e atenção às aberturas devem promover tanto o acúmulo de calor no inverno quanto a redução do ganho climático no verão. Este último propósito é atendido pelas paredes em forma de trombe, que são estruturas acumuladoras de calor comumente encontradas nas regiões meridionais dos países temperados do hemisfério norte. Dependendo da região, pode haver maior ou menor necessidade de proteção contra ventos e chuvas (França, 2018).

É notório que as estratégias bioclimáticas devem ser originadas diretamente do clima existente, com o intuito de controlar e resguardar seus elementos, a fim de assegurar o conforto humano. Em sua essência, essa abordagem se trata de

alcançar uma permeabilidade seletiva. Isso se refere à habilidade dos arquitetos em projetar edifícios que respondam às necessidades dos usuários quanto à quantidade de calor, frio, ar (que pode estar impuro ou quente, sendo indesejável) e de luz natural externa, que será admitida em seu interior. Esta capacidade deve ser primordial na concepção de qualquer edificação, já que a negligência a esse aspecto resulta na incapacidade da envoltória de desempenhar seu papel intransferível como mediadora entre o espaço interno e externo.

As estratégias e as técnicas passivas operam com a premissa de que as construções devem ser projetadas para estabelecer um diálogo eficiente entre as condições ambientais externas e internas. Isso visa atingir níveis adequados de conforto ambiental ao longo do ano, de maneira natural. No entanto, é importante ressaltar que podem existir limitações e desafios inerentes a essa abordagem.

Contudo, um dos principais desafios enfrentados atualmente para a ampla adoção de edificações que empregam técnicas passivas de conforto ambiental reside na cultura, em constante crescimento, de recorrer a sistemas artificiais de climatização. Estes sistemas são amplamente utilizados em estruturas destinadas a atividades laborais e de lazer, como os complexos empresariais e comerciais de grande porte. Nessas edificações, a complexidade frequentemente contrasta com os princípios de condicionamento natural, especialmente quando comparados a residências, onde a abordagem bioclimática parece ser mais prontamente aceita e buscada, mesmo que não de maneira generalizada (Lamberts, 2016).

Adicionalmente, a falta de atenção à análise da adequação climática, presente em muitas construções contemporâneas, juntamente com a prática comum de adotar soluções que carecem de contexto climático, culmina no ingresso de uma carga térmica considerável nos espaços interiores. Isso gera uma maior demanda nos sistemas de climatização, resultando em um aumento no consumo energético.

A abordagem de utilizar a energia solar de maneira passiva se distingue substancialmente do uso ativo, onde é requerida uma instalação específica, que pode ser integrada ou não ao projeto do edifício. Geralmente, essa instalação é implementada após a conclusão da construção do edifício.

No contexto da utilização ativa da energia solar para fins térmicos, é essencial ter um sistema coletor, um fluido para transportar a energia térmica, um sistema de armazenamento, um trocador de calor e uma rede de dutos, válvulas, controles e outros componentes (Soria; Schaeffer; Szklo, 2014).

Manter essa instalação em funcionamento requer manutenção regular, e a vida útil dos componentes, bem como o retorno do investimento, devem ser considerados.

Ao elaborar o projeto, é crucial considerar as estratégias de aproveitamento passivo da energia solar, visando alcançar economia de energia e conforto térmico ambiental. Contudo, em certos casos, a abordagem passiva pode não proporcionar os níveis desejados de conforto térmico (Ferrer; Garrido, 2013). Nesses casos, é possível suplementar essa demanda energética adicional através do uso ativo da energia solar ou por meio de sistemas convencionais, como por exemplo, o aquecimento da água através de painéis solares.

Em essência, a aplicação da energia solar de forma passiva ou ativa em edifícios são abordagens complementares de aproveitamento da energia solar. A extensão dessa complementaridade varia de acordo com as especificidades de cada projeto individual, resultando em edifícios exclusivamente passivos ou em edifícios que adotam simultaneamente abordagens passivas e ativas. Esses atributos fundamentais estão encapsulados no conceito abrangente da Arquitetura Bioclimática.

Algumas estratégias de projeto, assim como os avanços tecnológicos, possibilitam a redução do uso de energia elétrica. É fundamental reduzir o consumo de energia, mas nem sempre é suficiente; assim, são necessárias fontes alternativas de energia limpa, que contribuam para o bem-estar da população. Nesse contexto, pode-se fazer uso da energia solar fotovoltaica.

### 3.2 APROVEITAMENTO SOLAR ATIVO – Sistemas Fotovoltaicos

Em 2020, houve um aumento no uso de fontes renováveis de energia no Brasil, sendo um exemplo a instalação de 7 GW de capacidade instalada de energia solar. Dada a maior procura deste recurso renovável, previa-se um aumento de 100% na utilização de painéis solares, uma vez que o aumento gradual dos custos da energia preocupava os consumidores (Novais; Assunção; Nascimento, 2021).

Em 2022, o Brasil conseguiu atingir a marca histórica de 14 GW de capacidade instalada de energia solar fotovoltaica, se equiparando com a potência da usina hidrelétrica de Itaipu, de acordo com a Absolar (2019). Ainda de acordo com a entidade, esse tipo de fonte energética já acumulou no Brasil, desde 2012,

mais de R\$74,6 bilhões em novos investimentos, R\$20,9 bilhões em arrecadação aos cofres públicos e gerou mais de 420 mil empregos. Possibilitou, também, a redução da emissão de 18 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na geração de eletricidade.

Em relação à energia solar, destacam-se as placas de transferência de calor (utilizadas no aquecimento de água) e os geradores de energia fotovoltaica, que podem ser divididos em modelos *on-grid* e *off-grid*. O sistema de energia solar fotovoltaica utiliza painéis solares que absorvem a luz e produzem correntes elétricas que são transformadas em correntes contínuas por inversores solares. Como resultado, a eletricidade está pronta para ser usada localmente, para criar créditos de energia ou para ser armazenada (Novais; Assunção; Nascimento, 2021). Os autores ainda afirmam que o sistema *on-grid* – abordado no capítulo 2.1 deste trabalho – também conhecido como sistema fotovoltaico conectado à rede, é aquele que converte o fluxo contínuo de energia do sol recebido dos painéis solares em uma corrente que pode ser direcionada diretamente para a rede elétrica residencial.

Ainda de acordo com Novais, Assunção e Nascimento (2021), os sistemas fotovoltaicos possuem as seguintes vantagens:

- É uma opção mais barata, pois não necessita de baterias para o armazenamento da energia produzida;
- É um sistema silencioso;
- Apresenta baixo custo de manutenção, pois as placas têm vida útil de 25 a 30 anos;
- Caso o proprietário possua outra residência ou empreendimento sob o mesmo CPF ou CNPJ, ele pode utilizar os créditos para abater a conta de energia desses locais (Novais; Assunção; Nascimento, 2021, p. 13-14).

A distribuição do sistema conectado à rede ocorre quando a incidência solar é captada pelos painéis solares instalados na cobertura da edificação como uma corrente contínua. Essa corrente é então repassada para um inversor, que converte a energia produzida em uma corrente alternada, que é ligada à eletricidade fornecida pela rede elétrica e disponível para uso em toda a edificação.

Qualquer aplicação de sistemas fotovoltaicos tem a vantagem de produzir energia limpa, tendo um impacto positivo que vai além do individual, considerando-se a redução com os custos de energia, a longo prazo, a partir de investimentos na produção de energia; atinge toda a população, por consequência, considerando-se os benefícios ao meio ambiente.

Apesar de haver discussões sendo realizadas atualmente acerca de temas relativos a edificações ditas inteligentes e à eficiência energética, como, por exemplo, no evento online 360 SOLAR<sup>7</sup>, que acontece anualmente em diferentes localidades do Brasil, na prática, o que pode ocorrer, em algumas situações, é a falta de experiência por parte dos arquitetos acerca dos benefícios da energia solar. Em inúmeros casos, a energia solar não é levada em consideração nas etapas iniciais do projeto – o que seria o ideal – e isso ocorre devido ao pouco conhecimento sobre as tecnologias e técnicas para maximizar sua utilização.

### **3.2.1 Tecnologia de captação de energia solar fotovoltaica e térmica**

O termo “energia fotovoltaica” refere-se à energia elétrica produzida pela conversão da energia da radiação solar com o auxílio de um material semicondutor<sup>8</sup>. O efeito de uma diferença de potencial causada pela absorção de luz é conhecido como efeito fotovoltaico e foi reconhecido pela primeira vez pelo físico francês Alexandre Becquerel em 1839. Uma célula fotovoltaica é um componente chave do processo de conversão de energia. Canton (2018, p.8) define um módulo fotovoltaico como “uma unidade básica composta por um conjunto de células fotovoltaicas conectadas eletricamente e encerradas com a finalidade de produzir energia elétrica [...]”.

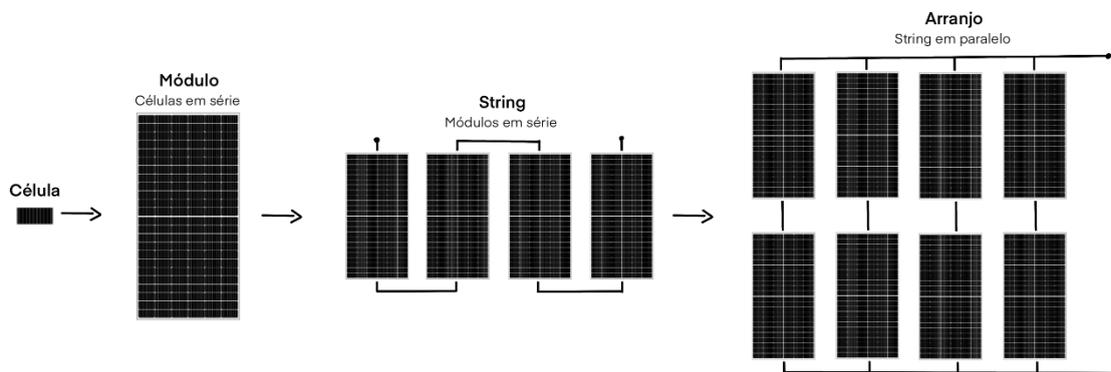
A Figura 15 mostra como as células fotovoltaicas são dispostas de modo que formam um único módulo e esse módulo passa a formar uma série de módulos conectados para aumentar a potência gerada.

---

<sup>7</sup> O 360 Solar é o maior evento de energia solar do sul do Brasil, acontece em Florianópolis/SC, Organizado pela ElektSolar, especializada em treinamentos para profissionais do mercado fotovoltaico, o evento, intitulado “360 Solar: Conectando a Energia Fotovoltaica com o Futuro”, contará com a presença de autoridades nacionais e internacionais, que debaterão o futuro da energia solar em áreas como mobilidade urbana, internet das coisas e inovação (Canal Energia, 2022).

<sup>8</sup> Materiais semicondutores são aqueles que, quando aquecidos ou combinados com outros materiais, são capazes de conduzir eletricidade. Para células fotovoltaicas, o material semicondutor mais comum é o Silício (Canton, 2018, p.8).

**Figura 15.** Organização de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Atualmente, as células solares primárias utilizadas na produção de energia fotovoltaica são células de silício ou película fina. O silício que compete com as células pode ser monocristalino (c-Si) ou policristalino (p-Si), e essa tecnologia é considerada consolidada por ser a de maior eficácia e dominar o mercado. Além de Silício Mono e Policristalino, a categoria de "*Finish Films*" também inclui Silício Amorfo (a-Si), Telureto de Cádmio (CdTe), Disseleneto de Cobre e Índio (CIS), ou Disseleneto[ de Cobre, Índio e Gálio (CIGS), todos com quotas de mercado mais baixas (Canton, 2018).

O tempo de vida útil de placas solares é considerado longo. Dias (2015) cita que o tempo de vida útil dos módulos solares varia de 20 a 25 anos, e que, geralmente, isso depende do fabricante e dos materiais utilizados em sua produção. Para Almeida (2017), as placas fotovoltaicas têm uma vida útil de 20 a 30 anos. Nesse ínterim, surge uma nova questão: o descarte adequado desse material após o fim de sua vida útil. Esse material, após o uso, eventualmente se torna resíduo sólido no meio ambiente, tornando necessário pensar em um destino apropriado para os anos seguintes.

Referindo-se à reciclagem das placas fotovoltaicas, percebe-se que, atualmente, há a existência de desafios significativos, principalmente na recuperação de todos os componentes, além dos semicondutores, tornando-se um campo que demanda pesquisas e avanços tecnológicos, a fim de otimizar o processo e reduzir seus custos (Pedroso; Santos; Pires, 2023). Esse cenário de descarte e a crescente necessidade de reciclagem estão criando oportunidades em

um novo mercado, com a perspectiva de gerar bilhões de dólares em receita, de acordo com alguns especialistas. Prevê-se que, até 2050, a China tenha acumulado uma impressionante quantidade de 13,5 milhões de toneladas de resíduos proveniente dessas placas. A urgência dessa questão é evidente, e é vital agir prontamente para evitar a acumulação massiva de placas à espera de soluções de reciclagem (Anami, 2017).

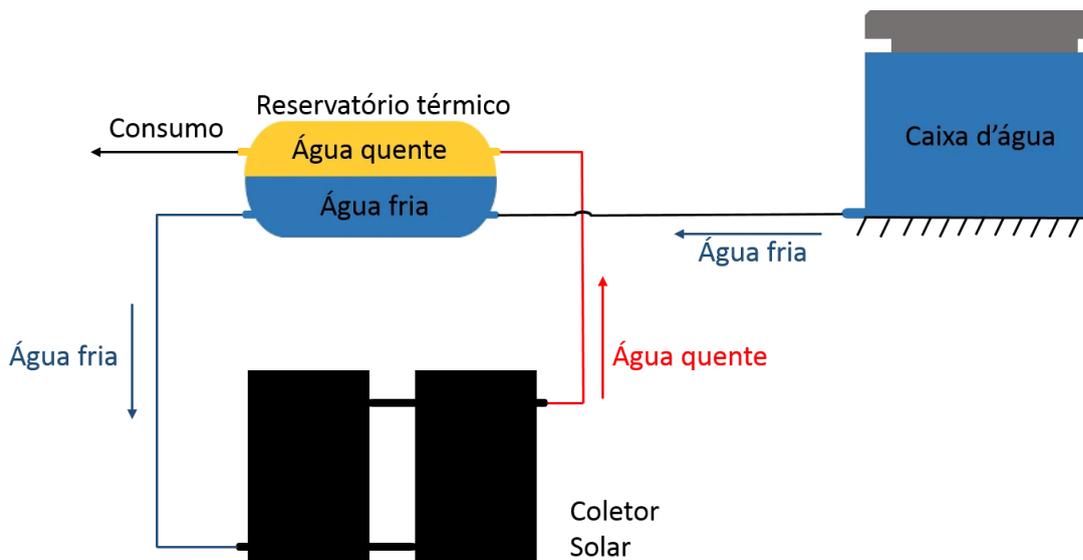
No caso da energia solar térmica, o foco está na quantidade de energia que um determinado corpo é capaz de absorver e transferir da radiação solar incidente sobre ele na forma de calor. Os equipamentos mais comuns e amplamente utilizados são conhecidos como coletores solares térmicos, que são aquecedores de fluidos líquidos ou gasosos e podem ser categorizados como coletores planos ou concentrados (Figura 16). A energia térmica coletada é utilizada principalmente para a aeração de água, como em sistemas separados e isolados, de uso predial, ou para climatização de ambientes por meio de sistemas internos de ar condicionado ou refrigeração predial (Figura 17). Aplicações de média e grande escala ocorrem em aplicações de Concentrador Solar Térmico (CSP) (Kaltmaier Junior, 2020).

**Figura 16.** Coletor solar com um reservatório de capacidade de 200 litros.



Fonte: Mundo Educação, UOL (2019).

**Figura 17.** Sistema de aquecimento de água, com coletores solares.



Fonte: Minha Casa Solar (2019).

### 3.2.2 Aplicações e tecnologias para aproveitamento da energia solar direta

O Painel Fotovoltaico Integrado à Edificação (BIPV, sigla em inglês para Building-Integrated Photovoltaics) surgiu como um meio de tornar as edificações menos agressivas ao meio ambiente (Santos, 2013).

Os BIPV são instalações de tecnologia Fotovoltaica nas edificações, constituindo uma parcela da mesma envoltória. A incorporação da geração de energia em equipamentos como escolas, escritórios, hospitais e outros edifícios é possibilitada pela integração arquitetônica, estrutural e formal dos módulos com os edifícios. Para regiões densamente povoadas, a integração em edifícios permite o uso de espaços existentes em vez de espaços vazios para germinação (Santos, 2013).

A integração das unidades geradoras e consumidoras de energia com o edifício consumidor de energia permite o aumento da eficiência energética (Rüther, 2010). De acordo com o perfil de consumo da edificação, geração e demanda podem coexistir. O que acontece nos casos em que os edifícios têm necessidade expressa de energia diurna (porque a geração fotovoltaica só ocorre durante o dia, pois se tem a presença da radiação solar).

A integração entre os módulos geradores de energia e a estrutura consumidora de energia na edificação também permite alcançar eficiência

energética (Rüther, 2010). Considerando o perfil de consumo da edificação, é possível que a geração e a demanda ocorram simultaneamente. Esse cenário é especialmente observado em edifícios com consumo predominantemente diurno, uma vez que a geração fotovoltaica ocorre durante as horas de sol.

Nos contextos em que não existem ainda incentivos fiscais, como no Brasil, a tecnologia dos BIPVs pode desempenhar um papel crucial na redução dos custos de construção, além disso, têm o potencial de diminuir os gastos energéticos ao longo da utilização da edificação. Dessa forma, os módulos solares têm uma dupla funcionalidade, tanto na geração de energia quanto na função de vedação, contribuindo para a redução do período de retorno do investimento (IEA, 1995). Quando incorporados às fachadas, esses módulos podem substituir materiais mais dispendiosos e ao mesmo tempo conferir uma estética visual moderna (Marsh, 2008).

No contexto brasileiro, a integração fotovoltaica em edificações localizadas nas áreas urbanas pode desempenhar um papel significativo na viabilização da tecnologia. Isso se deve ao fato de que áreas urbanas concentram altos níveis de consumo energético, especialmente durante o período próximo ao meio-dia, quando há uma elevada demanda por sistemas de ar condicionado. A integração de sistemas fotovoltaicos nos centros urbanos possibilita a geração de energia próxima aos pontos de consumo, contribuindo para a redução dos picos de carga nas redes elétricas durante os horários de maior radiação solar (Jardim et al., 2008; Rüther et al., 2008).

Apesar de os centros urbanos apresentarem uma melhor sincronização entre a demanda por energia (associada ao uso do ar condicionado) e a geração fotovoltaica (Jardim, 2007), há uma limitação decorrente da alta densidade construtiva. Essa densidade resulta em uma ocupação vertical mais acentuada em detrimento da área horizontal disponível. Como resultado, a área disponível para a integração de sistemas fotovoltaicos em cada edifício é limitada, o que pode resultar em geração de energia significativamente inferior ao consumo da edificação.

A variação na altura das edificações urbanas também causa sombreamento nas coberturas e fachadas (Salamoni, 2004), reduzindo o potencial de aproveitamento da energia solar. Portanto, áreas urbanas menos densas, como bairros residenciais e zonas mistas, podem ser mais adequadas para a integração de sistemas fotovoltaicos (Santos, 2009). A geração de energia solar em bairros

residenciais apresenta a vantagem de ter acesso a maiores áreas de cobertura, além de não sofrer interferências significativas de sombreamento. Devido ao consumo menos expressivo de energia durante o dia nas residências, esses bairros podem exportar o excedente de energia gerada para atender às necessidades dos bairros mais densamente construídos.

A integração bem-sucedida requer a colaboração entre engenheiros civis, arquitetos e projetistas de sistemas fotovoltaicos, uma vez que os BIPVs têm restrições em relação à área e à orientação solar. A incorporação dos módulos solares como parte do envelope da edificação resulta na redução dos custos de instalação de sistemas fotovoltaicos, uma vez que esses módulos substituem materiais de acabamento que podem ser mais caros. Além disso, a tecnologia de concentradores solares também pode ser implementada como BIPV, integrando-se nas coberturas ou nas fachadas e desempenhando o papel de brises solares (IEA, 1995; Makrides et al., 2010). A forma e a composição dos módulos solares desempenham um papel fundamental nas possibilidades de integração arquitetônica.

A análise de viabilidade para a integração de sistemas solares em projetos arquitetônicos envolve uma decisão complexa que demanda a consideração de diversos fatores, principalmente uma avaliação econômico-financeira abrangente. Através dessa avaliação, a entidade em questão pode examinar diferentes opções de investimento, visando otimizar a utilização de seus recursos e aumentar seu patrimônio líquido (Gavioli et al., 2021). Nesse contexto de investimento, o objetivo é reduzir os gastos com eletricidade, e é crucial verificar se tal investimento é financeiramente viável.

A pesquisa de Dassi et al (2015) revelou que métodos como *Payback*, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL) são frequentemente empregados para analisar investimentos e riscos (Dassi et al., 2015; Rosa; Gonçalves, 2017; Santos; Souza; Dalfior, 2017).

Destaca-se a importância de determinar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), também conhecida como taxa de desconto. Essa taxa representa o mínimo percentual de retorno que um investidor deseja obter sobre o capital investido, considerando fatores como custo de oportunidade, risco do empreendimento e liquidez (Gavioli et al., 2021). Qualquer investimento cujo retorno seja inferior à TMA estabelecida é considerado inviável.

A Taxa Interna de Retorno é uma técnica que auxilia os gestores a escolher entre diferentes oportunidades de investimento, identificando aquelas que trarão os melhores resultados para a organização. Já o Valor Presente Líquido (VPL) corresponde à diferença entre o valor presente das entradas de caixa previstas e o valor presente do investimento (Gavioli et al., 2021). Em um contexto de integração de sistemas solares em projetos arquitetônicos, essas abordagens fornecem uma estrutura sólida para avaliar a eficácia financeira desses empreendimentos sustentáveis.

**Figura 18.** Esquerda: Exemplo de BAPV. Sistema fotovoltaico aplicado à cobertura de uma edificação existente na Alemanha. Direita: Exemplo de BIPV. Edifício no Quai de Valmy 179, Paris, França.



Fonte: Kaltmaier Junior (2020, p.32).

Como é possível observar na Figura 18, os sistemas BAPV são normalmente vistos como um acréscimo ao edifício, pois não tiveram um papel significativo na concepção arquitetônica inicial e não estão diretamente relacionados a materiais estruturais ou envoltórios ou aspectos funcionais. Já os sistemas BIPV são desenvolvidos concomitantemente com projetos arquitetônicos e integram-se aos seus elementos construtivos.

A maioria dos módulos fotovoltaicos integra-se tradicionalmente na arquitetura de forma tradicional, sem ter em conta as características estruturais dos módulos, pelo que constituem maioritariamente as coberturas dos edifícios, mas não contribuem para a sua composição formal (Santos, 2013).

Santos (2013) observa ainda que “os arquitetos brasileiros ainda carecem de conhecimento específico quanto ao uso de módulos fotovoltaicos como elementos arquitetônicos” e que uma das razões para isso é a preocupação com o desempenho técnico da tecnologia FV. Esses aspectos mostram que a subutilização do potencial estético por parte dos arquitetos e da construção civil nacional se deve, em grande parte, ao desconhecimento técnico da tecnologia.

A orientação dos módulos em relação ao sol, que envolve geometria e irradiação e, portanto, terá impacto no projeto desde o início, é um dos fatores mais cruciais no processo de tomada de decisão. Esses fatores afetam principalmente a forma externa do edifício (volume arquitetônico) e as características da superfície das fachadas (material para revestimento envoltório), uma vez que uma integração fotovoltaica bem-sucedida implica equilibrar os aspectos estéticos, energéticos e estruturais.

O compromisso entre forma e desempenho é o que determina se arquitetos e gerentes de projeto usariam módulos fotovoltaicos como componente construtivo (Urbanetz, Zomer; Ruther, 2011). Em termos de desempenho, sabe-se que módulos com uma orientação mais favorável são capazes de produzir mais energia, pois dessa forma conseguem captar mais radiação solar direta. Isso requer uma avaliação preliminar das inclinações e orientações azimutais dos módulos. Levando em conta os ângulos azimutais e a inclinação do módulo em relação à abóbada celeste, que juntos irão determinar a direção da superfície do módulo FV, existe uma porção ótima do céu em cada latitude que fornecerá mais radiação solar incidente sobre o módulo.

Em seu trabalho, Santos (2013) propõe uma ferramenta computacional de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica para arquitetura, com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento de projetos de integração fotovoltaica, fornecendo um ábaco solar como mecanismo de estimativa.

No contexto de sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV), esses sistemas são concebidos como parte funcional e integrante da estrutura ou do revestimento do edifício desde o estágio inicial de projeto. Dentro dessa categoria, estão incluídos projetos nos quais os materiais tradicionais de construção, como coberturas, revestimentos de fachadas ou elementos translúcidos, são substituídos por componentes fotovoltaicos, sempre localizados na parte externa, ou seja, na envoltória do edifício. Em certos casos, esses produtos podem ser praticamente

indistinguíveis de seus equivalentes não fotovoltaicos. Essa abordagem estética pode ser particularmente atrativa quando há um desejo de manter a coesão arquitetônica e evitar chamar a atenção para a presença dos painéis solares.

Kaltmaier (2015), em seu estudo sobre sistemas fotovoltaicos integrados à edificação, observa que, na prática, as distinções entre essas duas categorias podem não ser tão claras, especialmente em situações de retrofit<sup>9</sup>. Nessas circunstâncias, a aparência da edificação pode ser aprimorada e modernizada, resultando em um visual estético superior ao original. Nesses casos, o sistema fotovoltaico não é percebido como uma adição estranha à edificação, mas sim como um elemento arquitetônico coeso. O sucesso da integração fotovoltaica depende essencialmente da colaboração técnica, estética e energética entre a arquitetura do edifício e a incorporação da matriz fotovoltaica.

Um dos aspectos primordiais a ser considerado nesse tipo de aplicação arquitetônica é o custo dos equipamentos, tendo em vista que a energia solar é uma fonte de extrema abundância e gratuita. A indústria tem se dedicado a desenvolver produtos que se tornam cada vez mais acessíveis, diversificados, avançados, eficientes e visualmente atrativos, estando prontos para serem incorporados por arquitetos e construtores. Esse avanço é acompanhado por uma constante redução nos custos desses equipamentos (Heinstein; Ballif; Perret-Aebi, 2013).

Embora o custo seja atualmente um fator limitante, é esperado que, à medida que ocorra o desenvolvimento e a produção de módulos em larga escala, haja uma tendência de minimização desse obstáculo. Conseqüentemente, espera-se que as aplicações dos sistemas BIPV se tornem mais amplamente disseminadas, uma vez que a integração de sistemas fotovoltaicos em edificações está se tornando uma tendência global (Urbanetz, Zomer; Ruther, 2011).

### 3.2.2.1 *Building-Integrated Photovoltaics BIPV*

Embora a pesquisa e o desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos híbridos tenham começado na década de 1970, a ideia de sistemas fotovoltaicos integrados a edifícios surgiu pela primeira vez na década de 1990, com a instalação de um BIPV/T (Building-integrated Photovoltaic/Thermal Systems) no telhado de um

---

<sup>9</sup> *Retrofit* é um termo utilizado principalmente em engenharia para designar o processo de modernização de algum equipamento já considerado ultrapassado ou fora de norma.

restaurante, na Carolina do Norte, EUA, que produziu tanto calor quanto eletricidade (Kaltmaier Junior, 2020).

Segundo a definição, Sistemas Fotovoltaicos Integrados para Edificações (BIPV/T) são sistemas que captam a radiação solar e simultaneamente produzem energia elétrica e térmica pronta para uso no local de instalação (Yang; Athienitis, 2016). Essa energia é produzida e utilizada de forma híbrida e o sistema é integrado ao edifício. Pode ser combinado com outras fontes de calor, como sistemas de climatização e aquecimento de água (calefação). As seguintes características são frequentemente vistas em um sistema BIPV/T:

- O sistema está fisicamente ligado a construções;
- O sistema gera eletricidade;
- O sistema gera a energia térmica pronta para ser coletada e utilizada pela edificação, ou o comportamento térmico do sistema tem efeito positivo no desempenho energético da construção (Yang; Athienitis, 2016).

A temperatura de operação desempenha um papel crucial nos processos de conversão de energia, impactando tanto a eficiência elétrica quanto a quantidade de energia gerada pelo sistema (Skoplaki; Palyvos, 2008, p. 621). Os efeitos térmicos resultantes da exposição direta à radiação solar nos painéis fotovoltaicos (FV) tendem a prejudicar a eficiência elétrica das células FV, o que, por consequência, afeta o desempenho de todo o sistema. Em média, os módulos FV absorvem aproximadamente 80% da radiação solar incidente (Helden; Zolingen; Zondag, 2004), refletindo os restantes 20%.

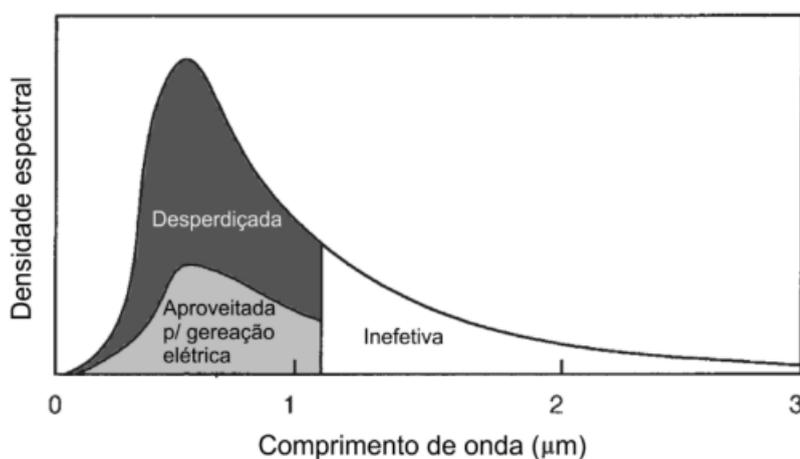
As estimativas podem variar (Chow, 2010) (Helden; Zolingen; Zondag, 2004), mas é possível considerar que, em módulos comerciais típicos, entre 5% e 22% da radiação incidente é convertida em eletricidade, dependendo da tecnologia e das condições operacionais. Depois de subtrair a fração refletida, cerca de 50% dessa energia é transformada em calor (Chow, 2010). Em dias ensolarados, a temperatura dos módulos pode aumentar de 35°C a 50°C em relação à temperatura ambiente (Chow, 2010).

O aumento na temperatura das células tem um impacto direto na redução da eficiência elétrica (Tripanagnostopoulos; Nousia; Souliotis, 2002). Uma diminuição de cerca de 20°C na temperatura das células pode resultar em um incremento de 0,6% a 1,0% na eficiência global do sistema em módulos feitos de silício cristalino

(Sandberg; Moshfegh, 2001). Nas células de silício cristalino (c-Si), é observada uma redução de 0,4% na eficiência para cada °C de aumento na temperatura da célula (Chow, 2010).

A Figura 19 mostra as porções de radiação que podem ser usadas para conversão elétrica (que variam dependendo da tecnologia) e a parte esgotada, que muitas vezes está na forma de calor.

**Figura 19.** Parcelas do espectro da radiação solar direta incidente convertida em eletricidade ou calor, em função do comprimento de onda.



Fonte: Kaltmaier Junior (2020).

Dependendo da natureza da célula, aproximadamente de 6 a 22% da energia é transformada em eletricidade, enquanto cerca de 10% é refletida como luz ou dissipada como calor no ambiente. Isso resulta em cerca de 70% da energia incidente que não é aproveitada (Yang; Athienitis, 2016).

A energia não é utilizada porque radiações com larguras de feixe menores do que aquelas necessárias para produzir energia de banda restrita (G)<sup>10</sup> não são utilizadas na conversão. De forma semelhante, a energia que as formas mais energéticas de EG<sup>11</sup> possuem também não é totalmente aproveitada pela célula, contribuindo para o seu aquecimento através do processo de termalização. Esta incapacidade de absorver radiação para comprimentos de onda maiores e de utilizar plenamente a energia disponibilizada por fótons mais energéticos resulta em perdas significativas para os dispositivos (Neves, 2016).

<sup>10</sup> Irradiância incidente (W/ m<sup>2</sup>).

<sup>11</sup> Energia de Banda Proibida

Portanto, é benéfico eliminar essa energia térmica prejudicial dos painéis fotovoltaicos, aprimorando, assim, a eficiência elétrica das células e dos módulos do sistema. Uma das possíveis soluções para essa dissipação de calor dos módulos é promover a ventilação da área entre a parte traseira do módulo e o componente estrutural (como uma parede ou cobertura), permitindo que o calor acumulado seja expelido para a atmosfera circundante. Esse processo pode ocorrer de forma natural ou mecânica, através da exaustão do ar presente na cavidade (Kaltmaier Junior, 2020).

Um exemplo é a classe de sistemas fotovoltaicos planares baseados em sistemas de ventilação ativa de ciclo aberto e integrados às fachadas dos edifícios. Uma amostra de um sistema comparável é mostrada na Figura 20.

**Figura 20.** Edifício Solar XXI, Lisboa Portugal, e a fachada composta por sistemas BIPV/T.



Fonte: Kaltmaier Junior (2020).

De acordo com a pesquisa de Kaltmaier Junior (2020), em termos de aplicação em edificações, os sistemas BIPV/T apresentam uma série de benefícios potenciais que ainda precisam ser explorados. Os seguintes benefícios podem ser listados nas categorias ambiental, econômica, técnica e cultural:

- Possuem potencial estético, devido à aparência polida e reluzente, e diferentes opções de cores e layouts;
- Produzem energia elétrica na própria edificação, gerando um abatimento no valor da tarifa de energia elétrica;
- Produzem energia térmica, pronta para ser utilizada na própria edificação; O aproveitamento do calor absorvido pelos módulos reduz a temperatura das células, aumentando a eficiência elétrica final do sistema fotovoltaico (Kaltmaier Junior, 2020, p.39).

### 3.2.3 Módulos fotovoltaicos

O componente fundamental do sistema de geração em toda instalação solar fotovoltaica é o módulo fotovoltaico. O número de módulos conectados em série determinará a carga operacional do sistema em CC (Corrente Contínua). A *string* (um grupo de módulos conectados em série) ou conexões paralelas individuais definem a corrente de um gerador solar. A potência instalada, frequentemente especificada em CC, é calculada somando a potência nominal de cada módulo. O mercado dos módulos fotovoltaicos tem se expandido continuamente nos últimos anos graças aos novos avanços tecnológicos que oferecem alternativas especificamente concebidas para a integração no ambiente construído (Paiva, 2023).

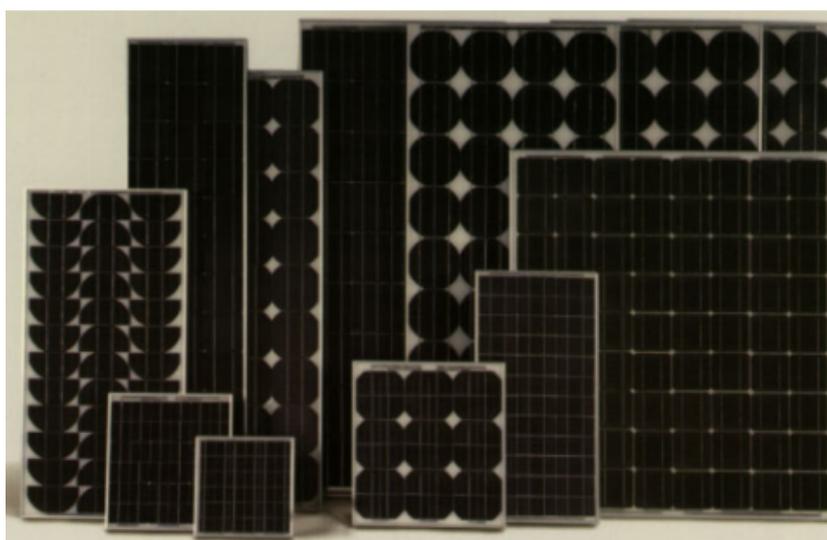
Na área de células solares fotovoltaicas, vários semicondutores são utilizados, sendo o silício cristalino (c-Si), seguido pelo silício amorfo hidrogenado (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e compostos à base de disseleneto de cobre e índio (CuInSe<sub>2</sub> ou CIS e Cu(InGa)Se<sub>2</sub> ou CIGS). O uso de elementos tóxicos ou raros nesses compostos apresentou desafios iniciais para sua adoção. O silício, abundantemente disponível e menos tóxico, destaca-se. A tecnologia c-Si, com lâminas cristalinas mais espessas, é a mais tradicional, enquanto as tecnologias de filmes finos, mais eficientes em termos de custo e automação, buscam potencial de redução de custos. Dada a baixa densidade energética da luz solar, painéis solares devem ser economicamente viáveis para competir na produção de energia elétrica (Rüther, 2004).

Em termos de eficiência, a tecnologia c-Si apresenta a maior eficiência (cerca de 15%) para conversão de energia solar em eletricidade, enquanto as tecnologias de filmes finos estão em estágios iniciais de desenvolvimento, com rendimentos de cerca de 7 a 10%. Para obter a mesma potência instalada dos painéis c-Si, são necessárias áreas maiores com painéis de filmes finos, apesar de seu preço por unidade de potência ser mais baixo. A escolha entre essas tecnologias fotovoltaicas deve considerar não apenas o custo por unidade de potência, mas também a área ocupada para uma determinada capacidade instalada na análise econômica (Paiva, 2023)

### 3.2.3.1 Silício cristalino (c-Si)

A mais consolidada das tecnologias fotovoltaicas, e aquela com maior nível de produção em nível comercial, é a c-Si (exemplo na Figura 21), que ganhou participação de mercado significativa na indústria fotovoltaica. No entanto, como o custo de produção desses módulos solares é tão alto e atualmente não há maneiras práticas de reduzi-lo, muitos analistas não veem essa tecnologia como um rival sério dos métodos convencionais de produção de energia em larga escala. A área ocupada por uma matriz fotovoltaica é uma restrição para tecnologias fotovoltaicas com menor eficiência de conversão nos dois maiores mercados do mundo (Japão e Alemanha), razão pela qual c-Si continua a ser líder entre essas tecnologias para aplicações terrestres em qualquer escala (Esteves, 2014).

**Figura 21.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de c-Si de várias potências comercialmente disponíveis [Siemens Solar Industries].



Fonte: Rüter (2004).

O silício policristalino (p-Si) tem uma eficiência de conversão menor e um custo de produção menor, pois a cristalinidade é menor que a do m-Si<sup>12</sup> e o processamento é mais simples. O material de partida é o mesmo do m-Si é fundida e depois solidificada na diagonal, resultando num bloco com muitos grãos ou cristais, no centro dos quais se concentram as falhas que tornam este material menos eficaz que o m-Si, em termos de conversão fotovoltaica. As etapas de

---

<sup>12</sup> Silício mono-cristalino.

processamento subsequentes necessárias para obter um módulo fotovoltaico são semelhantes às usadas no caso m-Si (Rüther, 2004).

**Figura 22.** Módulo Monocristalino da BYD de 385Wp.



Fonte: Solar Inove (2023).

Nos últimos anos, o p-Si aumentou sua participação de mercado na indústria fotovoltaica global em detrimento do m-Si e, atualmente, o p-Si é usado em mais de 50% da produção global. Além de ser produzido na forma de tiras ou fitas (tecnologia ribbon), o p-Si também pode ser produzido a partir de um líquido à base de sílica. Nesse método, a necessidade de fiapos é eliminada, pois as tiras de p-Si já são produzidas com a espessura final da célula (Rüther, 2004).

### 3.2.3.2 Silício amorfo hidrogenado (a-Si)

Nos anos 1980, o silício amorfo hidrogenado (a-Si) era a única tecnologia viável comercialmente para filmes finos em células solares. Introduzido na década de 1970, rapidamente encontrou aplicação em dispositivos de baixo consumo elétrico, como calculadoras e relógios, devido à sua resposta espectral mais favorável à região azul do espectro eletromagnético. Essas células se destacaram por sua alta eficiência sob iluminação artificial, como lâmpadas fluorescentes ou radiação difusa em dias nublados, superando a eficiência do silício cristalino (c-Si) nesses cenários (Esteves, 2014).

A produção de a-Si ocorre em temperaturas em torno de 300°C em processos de plasma, possibilitando que esses filmes finos sejam depositados em substratos baratos como vidro (Figura 23), inox (Figura 24) e alguns plásticos (Figura 25).

**Figura 23.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si em substrato de vidro e sem moldura comercialmente disponíveis.



Fonte: Rüter (2004).

Estes módulos são desenhados especificamente para aplicações integradas ao entorno construído (fachadas, telhados etc.), onde sua instalação é feita de maneira análoga à instalação de um painel de vidro comum.

Devido ao seu apelo estético, o silício amorfo hidrogenado (a-Si) tem encontrado diversas aplicações arquitetônicas, sendo usado para substituir materiais em coberturas de telhados e fachadas em construções integradas. O a-Si se destaca como revestimento devido ao seu custo por metro quadrado ( $m^2$ ), que é mais vantajoso em comparação com o custo por watt-pico (Wp), sendo seu custo por  $m^2$  inferior à metade do custo do silício cristalino (c-Si). Além disso, o a-Si tem uma vantagem no "*energy pay-back time*" (tempo de retorno de energia), com um tempo consideravelmente menor que o do c-Si, atualmente em torno de um ano. Isso se deve, em grande parte, à energia empregada na fabricação do substrato de vidro ou aço inoxidável. O processo de deposição da fina película de a-Si sobre o substrato requer pouca energia, aproximadamente na mesma ordem de grandeza da energia solar incidente ( $1 \text{ kW}/m^2$ ) (Rüter, 2004).

**Figura 24.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si flexíveis em substrato de aço inox, produzidos sob a forma de rolos que podem ser colados diretamente sobre telhados metálicos ou de concreto e telhas do tipo shingles<sup>13</sup>.



Fonte: Rüter (2004).

Rüter (2004) ainda afirma que, ao contrário de todas as outras tecnologias fotovoltaicas, onde aumentos na temperatura ambiente levam a reduções no desempenho dos módulos fotovoltaicos, o a-Si (Figura 25) não apresenta redução de potência com aumentos na temperatura operacional, um benefício em aplicações em países de clima tropical quente, como encontrado no Brasil.

---

<sup>13</sup> As telhas Shingle são fabricadas a partir de uma mistura de rocha vulcânica, manta asfáltica e fibra de vidro.

**Figura 25.** Exemplos de módulos solares fotovoltaicos de a-Si flexíveis em substrato plástico.



Fonte: Rüter (2004).

O desempenho do a-Si em termos de energia gerada (kWh) por potência instalada (kWp) tem se mostrado superior às demais tecnologias em uso no Brasil, principalmente quando integrado ao envelope do edifício onde os módulos atingem altas temperaturas devido à falta de ventilação em suas superfícies inferiores (Esteves, 2014).

### 3.2.3.3 *Telureto de cádmio (CdTe)*

O rival mais recente do c-Si e do a-Si no mercado fotovoltaico para geração de energia e aplicações integradas a edifícios é o CdTe, que também está disponível na forma de filmes finos. Este material tem sido usado por mais de uma década em aplicações de calculadoras de computador, mas só recentemente os módulos solares de grande área começaram a ser vendidos comercialmente. Esses módulos, que muitas vezes assumem a forma de placas de vidro com coloração marrom/azul esverdeada (Figura 26), também possuem um apelo estético quando comparados ao c-Si. À medida que desenvolvem seus produtos, aumentam os volumes de produção e reduzem custos, as empresas que utilizam essa tecnologia buscam aplicações arquitetônicas como um nicho de mercado (Rüter, 2004).

Assim como no caso do a-Si, os custos de produção do CdTe são sedutoramente baixos para produção em larga escala, e essa tecnologia tem

grandes possibilidades de despontar como um sério concorrente no mercado fotovoltaico para geração de energia elétrica.

**Figura 26.** Exemplo de módulos solares fotovoltaicos de CdTe em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas.



Fonte: Rüter (2004).

Aspectos que devem ser levados em consideração incluem a abundância relativamente baixa dos elementos incluídos e suas maiores toxicidades, especialmente se esta tecnologia levar a quantidades de produção mais significativas (com base em GWp<sup>14</sup>). Um dos principais atrativos dessa tecnologia é a maior eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica quando comparada ao estado em que se encontra.

---

<sup>14</sup> O GWP é uma medida relativa que compara o gás em questão com a mesma quantidade de dióxido de carbono (cujo potencial é definido como 1). O Potencial de Aquecimento Global é calculado sobre um intervalo de tempo específico e este valor deve ser declarado para a comparação.

### 3.2.3.4 Disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS)

Uma competição significativa no mercado de energia solar também surge no campo das aplicações integradas a edifícios, por meio da utilização de compostos como o disseleneto de cobre e índio ( $\text{CuInSe}_2$ ), abreviado como CIS, e o disseleneto de cobre, gálio e índio ( $\text{Cu(InGa)Se}_2$ ), abreviado como CIGS. Esses compostos têm potencial para alcançar altas eficiências (Rüther, 2004).

O autor citado anteriormente ainda afirma que os painéis solares feitos de CIS e CIGS também têm uma aparência esteticamente agradável, semelhante ao a-Si e ao CdTe. Eles estão entrando no mercado com grandes áreas e estão sendo aplicados em diversas estruturas arquitetônicas. No entanto, assim como acontece com o CdTe, é importante considerar a escassez dos elementos utilizados e sua toxicidade, caso essa tecnologia seja produzida em quantidades significativas. A Figura 27 ilustra exemplos de módulos fotovoltaicos feitos de CIGS.

Dentre os diferentes tipos de filmes finos disponíveis comercialmente, os módulos baseados em CIGS são os que têm o melhor desempenho fotovoltaico. Por essa razão, várias empresas têm investido nessa tecnologia.

**Figura 27.** Exemplo de módulos solares fotovoltaicos de CIGS em substrato de vidro para aplicações arquitetônicas.



Fonte: Rüther (2004).

#### 4. USO DE TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS, VISANDO À SUSTENTABILIDADE NA ARQUITETURA

A propensão à adoção da tecnologia fotovoltaica incorporada a edifícios tem manifestado um crescimento de alcance global, e no contexto brasileiro, esse fenômeno começa a suscitar atenção. O progresso tecnológico tem sido responsável por uma elevação substancial na eficácia da conversão energética, aprimorando os dispositivos e conferindo um apelo estético cada vez mais atrativo aos módulos. Dessa forma, essas placas, já disponíveis em dimensões variáveis entre 1,6 e 3,1 m<sup>2</sup>, podem ser integradas como elementos constituintes da edificação (Rüther, 2021).

O ápice oportuno para contemplar a integração fotovoltaica em um edifício emerge durante a fase de concepção do projeto arquitetônico. Nesse contexto, o profissional projetista deve considerar a latitude do sítio de implantação para explorar as potencialidades dessa tecnologia, buscando harmonizar a qualidade estética com um desempenho energético otimizado no seu empreendimento. Portanto, revela-se imperativo que os projetistas se familiarizem com a tecnologia em questão e compreendam cabalmente os desdobramentos resultantes de suas decisões.

**Figura 28.** *Copenhagen International School* um dos maiores edifícios da Dinamarca com centrais de energia solar integradas, Nordhavn, Copenhagen, Dinamarca.



Fonte: Portal Solar (2021).

A fachada do edifício (Figura 28) é composta por 12 mil painéis solares que são posicionados em um determinado ângulo e garantem o abastecimento de cerca de metade das necessidades elétricas do imóvel. O *Copenhagen International School* é um dos maiores edifícios da América Latina com centros de energia solar integrados graças à cobertura destas células solares de 6.048 m<sup>2</sup> de área e capacidade para produzir cerca de 200 MWh (Alvito, 2019).

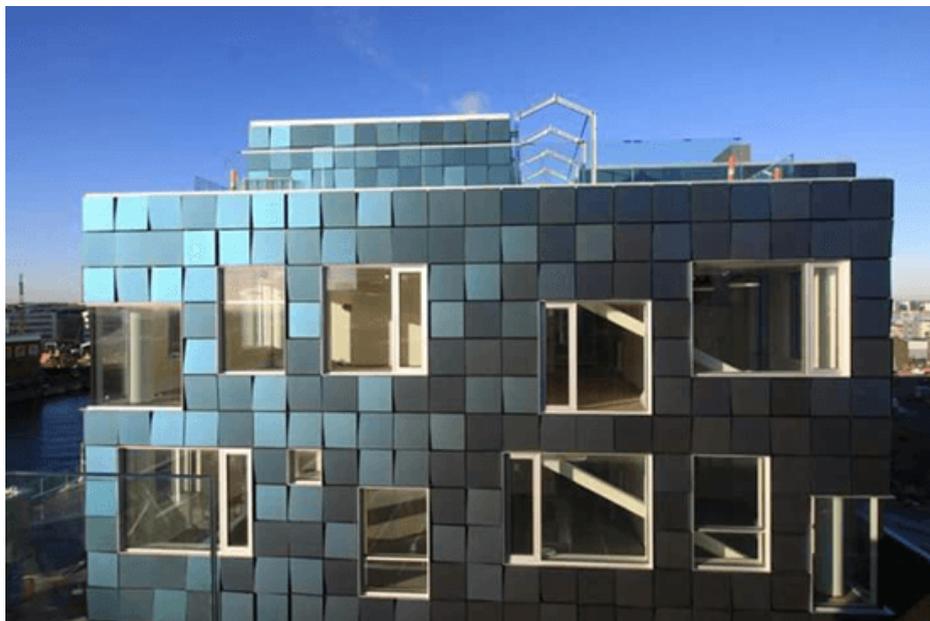
#### 4.1 TECNOLOGIAS FV MAIS ADEQUADAS PARA A ARQUITETURA

Diversificadas tecnologias fotovoltaicas encontram-se disponíveis, e é factível afirmar que todas elas se mostram apropriadas para a integração no ambiente urbano. Entretanto, variadas vantagens podem ser oferecidas por cada uma delas, dependendo da natureza da aplicação desejada.

Um exemplo paradigmático reside nos módulos semitransparentes confeccionados a partir de silício monocristalino, os quais têm sido disponibilizados em um nicho de mercado personalizado desde a década de 1990. Estes módulos permitem a passagem de luz entre suas células, conferindo-lhes uma considerável atratividade para a sua integração em coberturas de estacionamento, estruturas de pergolados, elementos de brises e elementos de iluminação zenital (Rüther, 2021).

Outro ilustrativo exemplo abarca os módulos produzidos com silício multicristalino, dotados de um revestimento colorido em sua superfície externa (Figura 29). Essa película colorida é capaz de conferir tons distintos ou até mesmo imagens aos módulos, revelando-se ideal para composições estéticas em fachadas edificadas.

**Figura 29.** Módulos solares fotovoltaicos coloridos já existem comercialmente disponíveis para uso como material de revestimento, para compor fachadas como esta, localizada em Copenhague na Dinamarca.



Fonte: Portal Solar (2021).

Isso não implica que os módulos convencionais, cujo uso é mais difundido, não possam conferir valor à integração arquitetônica. Devido ao seu custo mais competitivo e à maior conveniência de aquisição, frequentemente emergem como a preferência da maioria dos clientes. Estes módulos são particularmente apropriados para instalações em coberturas, independentemente de serem planas, inclinadas ou mesmo curvilíneas.

No ato da seleção da tecnologia, é imprescindível que o profissional projetista considere criteriosamente a localização destinada à instalação dos módulos, a área disponível, as circunstâncias circundantes e a proeminência visual que o sistema adotará. Em face dessas considerações, poderá, então, tomar sua decisão ponderada (Rüther, 2021).

O Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da Universidade Federal de Santa Catarina (LESF/UFSC) tem empreendido projetos fotovoltaicos integrados a edificações desde 1997, ocasião na qual um sistema de 2kWp foi instalado como um elemento de brise em um edifício pertencente a essa universidade (Rüther, 2021).

Desde então, outros projetos têm sido concebidos e concretizados. Entre eles, é oportuno ressaltar o empreendimento "MegaWatt Solar" da Eletrosul (Figura 30), que implementou uma distribuição de 1MWp na superfície da edificação principal, bem como em coberturas situadas nos estacionamentos adjuntos.

Outrossim, destaca-se o notável "Mineirão Solar" (Figura 31), parte integrante do abrangente "Projeto Estádios Solares" (Rüther, 2021).

**Figura 30.** Edifício Sede da Eletrosul, em Florianópolis-SC, onde opera desde 2014 o gerador Eletrosul Megawatt Solar. Com 1 MWp de potência, foi o primeiro sistema fotovoltaico integrado a prédio público no Brasil com potência da ordem de MWp.



Fonte: Portal Solar (2021).

**Figura 31.** Estádio de Futebol Mineiro Solar, que possui um gerador solar fotovoltaico integrado de 1,5 MWp instalado sobre uma cobertura de concreto em Belo Horizonte, MG. Poderia estar junto do texto sobre o estádio.



Fonte: Portal Solar (2021).

Cita-se ainda como exemplo o proeminente Centro de Cultura e Eventos da UFSC, bem como o próprio Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da UFSC, o qual alberga sistemas fotovoltaicos em suas coberturas de configuração plana e curva, abrangendo ainda a cobertura do estacionamento e a estação de recarga para ônibus elétricos. Importante enfatizar que este último projeto está atualmente em expansão, visando incorporar uma cobertura na qual os próprios módulos fotovoltaicos irão desempenhar o papel de telhas do edifício (Figura 32), (Rüther, 2021).

**Figura 32.** Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica/UFSC em Florianópolis, com suas coberturas planas e curvas com módulos fotovoltaicos integrados sobre cobertura metálica, e instalação coberta utilizando módulos fotovoltaicos próprios como cobertura.



Fonte: Portal Solar (2021).

Esses projetos priorizaram também a estética arquitetônica e melhoraram a configuração elétrica dos módulos e inversores. Dessa forma, não comprometeram a capacidade de produção de energia dos sistemas fotovoltaicos e tornaram-se exemplos a serem seguidos.

É importante também considerar que a instalação de sistemas fotovoltaicos contribui com a sustentabilidade da edificação.

Projetos de sustentabilidade empregam estratégias inovadoras que têm um efeito cascata em todo o mundo, em resposta aos desafios ambientais. Embora a indústria da construção seja frequentemente responsabilizada pelo excesso de emissões de carbono e resíduos, estas iniciativas retratam um futuro mais promissor. Nesse cenário, é possível perceber como a estética e a responsabilidade ambiental se uniram para criar residências que personificam a ecologia construída (Tagliani, 2023).

## 4.2 ARQUITETURA SUSTENTÁVEL

Em meados da década de 1990, o conceito de desenvolvimento sustentável, introduzido pelo WCED (*World Commission on Environment and Development*) por meio do relatório “*Our Common Future*” (Relatório Brundtland) em 1987, começou a influenciar o setor da Construção Civil.

Para Schiller et al. (2003, p.13),

A edificação sustentável promove diversos benefícios que se estendem além de sua participação no melhoramento das condições ambientais e mitigação do impacto ambiental, uma vez que representam o estabelecimento de uma nova ordem de princípios básicos de desenho em todas e cada uma de suas escalas. Tais princípios se fundamentam em sistemas e ciclos naturais, maior dependência de recursos locais, particularmente para a geração, distribuição e uso de energia e água, com dimensão social e projeção ao futuro.

Segawa apud Sabbag (2005), reconhece que no contexto das questões relacionadas à sustentabilidade na construção, existem novas demandas às quais os arquitetos podem ainda não estar plenamente preparados para atender. Ele destaca que

[...] existem arquitetos que fazem arquitetura com sensibilidade, com sustentabilidade, preocupados com os problemas do século 21, em poupar energia (...) No Brasil em geral faz-se arquitetura do desperdício (...) há uma inércia para estas pautas. Isso ainda é muito incipiente, embora existam arquitetos engajados em movimentos ambientalistas, mas em cujos projetos não os incorporam com muito rigor.

Para o autor, tais necessidades ambientais necessitam e devem ser aplicadas já no processo projetual.

A utilização de fontes de energia limpas e renováveis, como a energia solar, em projetos arquitetônicos torna-se cada vez mais relevante e imperativa, face à atual crise ambiental e à necessidade de mitigar os efeitos das alterações climáticas. Por ser um país com muita energia solar durante todo o ano, o Brasil tem um enorme potencial para utilizar esse tipo de energia, que se torna mais atraente e viável na sociedade brasileira ano após ano. Um dos tipos mais populares é o residencial, que tem ganhado atenção devido aos inúmeros benefícios que a energia solar pode proporcionar tanto aos moradores quanto ao meio ambiente (França, 2018).

Em resposta aos desafios ambientais, estes projetos empregam estratégias inovadoras que repercutem em todo o mundo. Embora a indústria da construção seja frequentemente responsabilizada pela sua pegada de carbono e produção de resíduos, tais iniciativas representam um futuro mais promissor. Nesse cenário, é possível perceber a fusão entre design e responsabilidade ambiental, resultando em residências que personificam a ecologia construída (Tagliani, 2023).

Assim, é essencial investir mais em engenharia e arquitetura sustentáveis devido à crescente preocupação com as alterações climáticas e o esgotamento dos recursos naturais. Essa estratégia incentiva a construção de edifícios e infraestruturas que reduzem o uso de energia, reduzem as emissões de carbono e maximizam a eficiência dos recursos. Isto ajuda a preservar o ambiente, melhora a qualidade de vida das pessoas e estabelece uma base sólida para o desenvolvimento futuro. Além disso, a adoção de práticas sustentáveis tem o potencial de estimular a inovação tecnológica e gerar crescimento económico a longo prazo, tornando-se uma estratégia crucial para garantir um futuro mais estável e resiliente (Tagliani, 2023).

As construções consideradas verdes apresentam materiais sustentáveis, gestão da água, qualidade do ar interior, espaços verdes, alocação consciente de recursos, projeto adaptável, fontes de energia renováveis e certificações ambientais. Esses componentes diminuem os impactos ambientais, melhoram a saúde e o bem-estar e garantem a sustentabilidade (Tagliani, 2023). Como exemplo, as figuras (33-40) a seguir, mostram algumas configurações de sistemas solares fotovoltaicos residenciais, comerciais, públicos e industriais conectados a redes elétricas convencionais em diversos países. Essas configurações estão integradas aos edifícios urbanos.

**Figura 33.** Sistema solar fotovoltaico interligado à rede elétrica pública utilizando módulos de silício policristalino (p-Si) integrados ao telhado de uma residência unifamiliar [Ecofys].



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

Em sistemas residenciais, há exemplos tanto de coberturas ou telhados, onde os módulos fotovoltaicos foram incorporados à estrutura desde o início do projeto, quanto de situações de *retrofit*, onde um gerador fotovoltaico é instalado e modificado posteriormente em cima de um telhado existente. Os sistemas integrados oferecem benefícios não só em termos estéticos, uma vez que estão incluídos no projeto arquitetônico original, mas também em termos do custo global da instalação, porque substituem materiais para renovação e/ou substituição (Rüther, 2004).

Além de utilizar princípios de projeto solar passivo – tais quais os já abordados nos itens 2.3 e 3.2.1 – para conforto ambiental (temperatura e iluminação), a residência (Figura 33) também utiliza um sistema de energia solar térmica para fornecer água quente e aquecimento. É um exemplo típico de um sistema totalmente autossuficiente em termos de energia (Rüther, 2004).

**Figura 34.** Sistema fotovoltaico instalado em retrofit sobre telhado de residência unifamiliar, utilizando módulos solares de silício amorfo (a-Si).



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

**Figura 35.** Instalação fotovoltaica integrada ao telhado de uma edificação centenária.



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

Neste caso (Figura 35), o sistema foi integrado durante a renovação do telhado da igreja.

**Figura 36.** Integração de módulos solares fotovoltaicos de filmes finos de a-Si colados diretamente sobre telhas metálicas.



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

Pela natureza das atividades a que se destinam, os edifícios comerciais apresentam tipicamente padrões de consumo mais alinhados com a produção de energia elétrica pelos sistemas solares fotovoltaicos que neles estão integrados. O pico de produção de energia solar fotovoltaica ocorre principalmente durante ondas de calor intensas, quando a demanda por energia nesses edifícios aumenta acentuadamente como resultado do uso intensivo de equipamentos de ar-condicionado. Dado o apelo estético da nova geração de módulos fotovoltaicos desenvolvidos especificamente para uso em invólucros de edifícios, estes componentes são frequentemente utilizados no lugar de materiais de construção mais caros, como granitos, mármore, cerâmica e vidros especiais, dentre outros (Rüther, 2004).

Como mostra a maioria destes exemplos, os sistemas fotovoltaicos ligados a uma rede elétrica podem ser incluídos na arquitetura de qualquer edifício, sendo a única necessidade essencial uma orientação solar favorável.

**Figura 37.** Módulos solares integrados à fachada de um edifício, mostrando duas diferentes formas de aplicação.



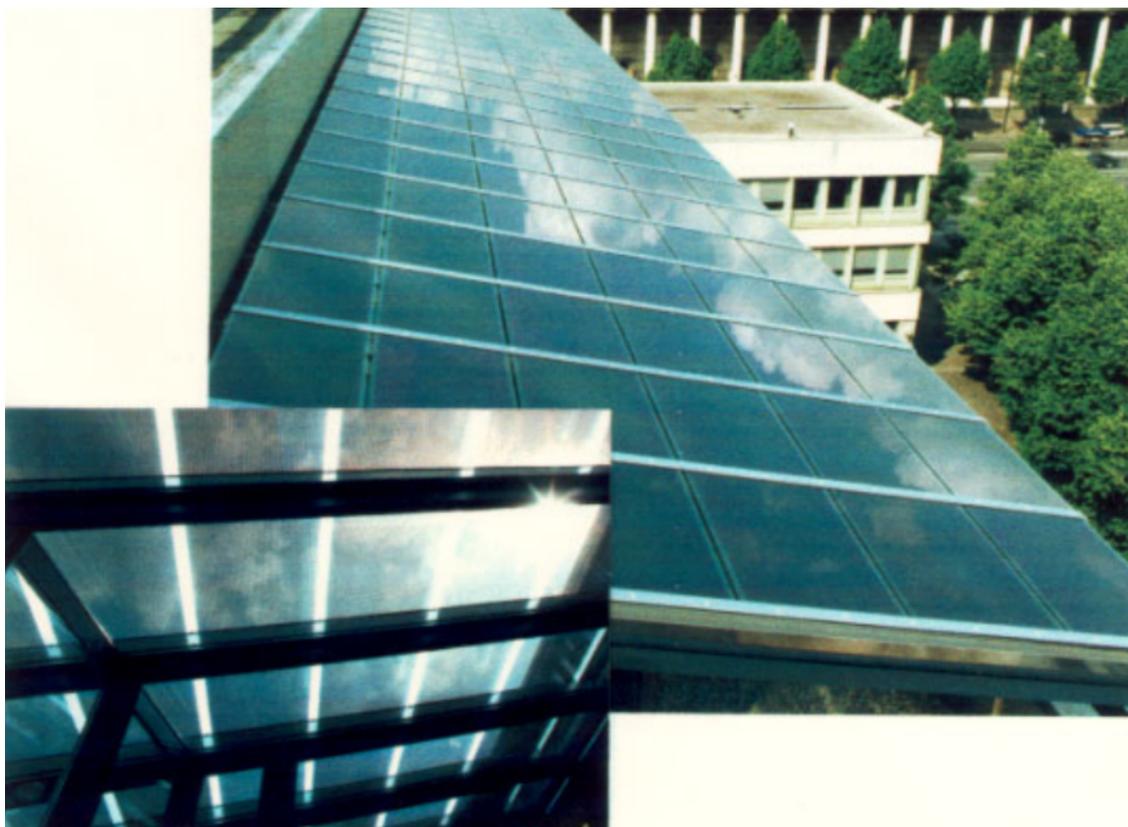
Fonte: Adaptado de Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

Observando a figura 37, têm-se nas janelas à esquerda (indicação na cor amarela, número 1), os módulos de silício cristalino (c-Si) montados em plano inclinado, atuando também como elementos de sombreamento do sol de verão para o interior do prédio; na fachada vertical à direita (indicação na cor laranja número 2), os módulos de silício amorfo (a-Si) estão montados com inclinação vertical, em substituição a elementos de revestimento normalmente utilizados, como mármore, vidros espelhados, dentre outros (Rüther, 2004).

Ainda segundo Rüther (2004), as modernas técnicas de produção de filmes, que foram inicialmente desenvolvidas para reduzir o custo dos módulos solares fotovoltaicos, também têm a vantagem de entregar um produto acabado com uma aparência esteticamente mais agradável para aplicações no ambiente construído. Desta forma, um sistema solar pode competir em aparência com materiais de construção caros e esteticamente agradáveis, tornando financeiramente viável a instalação de um gerador solar. Uma maior penetração destes sistemas em

ambientes urbanos pode ocasionalmente resultar numa redução do efeito estético provocado pelo sistema de transmissão e distribuição pouco atraente, porque geram energia juntamente com o seu ponto de consumo.

**Figura 38.** Aplicação de módulos solares de filmes finos de silício amorfo (a-Si) semitransparentes à cobertura de uma edificação comercial.



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

No caso da figura 38, uma fração de luz é admitida ao interior da edificação, promovendo a utilização de iluminação natural ao mesmo tempo em que uma fração da energia utilizada para atender ao consumo das instalações do prédio é gerada *in situ*.

**Figura 39.** Edifício solar fotovoltaico, onde módulos solares de p-Si foram integrados à fachada principal deste prédio de escritórios na Inglaterra.



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

A integração de módulos fotovoltaicos em superfícies com ângulos de inclinação (Figura 39) significativos apresenta excelente desempenho energético em altas latitudes, porque a posição relativa do sol ao longo do dia é sempre mais baixa no horizonte do que em regiões mais equatoriais (Rüther, 2004).

Tratando-se das instalações industriais, os sistemas solares fotovoltaicos podem ser integrados em edifícios e ligados à rede elétrica pública para produzir eletricidade perto do ponto de utilização. As coberturas dos edifícios industriais (Figura 40) apresentam normalmente grandes áreas planas ou formas curvas que são adequadas para a integração de geradores fotovoltaicos. Dessa forma, o setor industrial também pode acolher estes geradores elétricos para ajudar a satisfazer algumas das suas necessidades energéticas sem ocupar mais espaço ou infraestruturas. As grandes empresas industriais recorrem cada vez mais a esta fonte alternativa, cujo potencial para satisfazer as necessidades energéticas impostas pela atividade humana cresce ano após ano (Rüther, 2004).

**Figura 40.** Utilização de módulos solares fotovoltaicos de filmes finos de silício amorfo (a-Si) integrados a uma edificação industrial.



Fonte: Edifícios Solares Fotovoltaicos (2004).

A seguir, são apresentadas algumas referências de edificações que utilizam, além de painéis solares fotovoltaicos (dentre outros sistemas), estratégias bioclimáticas (passivas) – ventilação natural, sombreamento e iluminação natural, contribuindo com a promoção da sustentabilidade.

**Figura 41.** Casa Pacheco Leão AL.



Fonte: Engenharia 360 (2023).

A Casa Pacheco Leo AL (Figura 41) é um edifício sustentável projetado pensando no clima do Rio de Janeiro. Com foco na conservação de recursos, a casa recuperou água da chuva, painéis solares e elementos que economizam água. A construção de 2008 privilegia a iluminação e a ventilação naturais, enquanto seu teto verde proporciona uma vista privilegiada do Parque Jardim Botânico (Tagliani, 2023).

**Figura 42.** Casa Vértice / Nommo Arquitetos.



Fonte: Arch Daily (2023).

Na casa Vértice (Figura 42) há um conjunto de soluções implementadas, incluindo janelas de vidro duplo, fluxo de ar com ventilação cruzada e persianas venezianas móveis. A casa também possui sistemas de aproveitamento de energia solar e água quente. Por fim, o imóvel que a princípio aparece tão bem cuidado se abre, abraça e acolhe a casa e seus ocupantes, proporcionando aconchego, privacidade e o tão desejado jardim (Belitarto, 2023).

**Figura 43.** Casa Anima / 24 7 Arquitetura.



Fonte: Arch Daily (2023).

O projeto (Figura 43) inclui aquecimento solar de água, reaproveitamento de água da chuva para irrigação de jardins e produção da energia solar necessária por meio de painéis fotovoltaicos na cobertura. Através da utilização de uma simulação termo energética, foi possível tomar algumas decisões cruciais com o objetivo de ajustar as porcentagens de abertura dos vidros, a composição material dos envoltórios e a importância do uso adequado dos painéis solares internos, resultando numa casa com o menor consumo possível de energia elétrica (Belitarto, 2023).

**Figura 44.** Refúgio no Vale / Oazo + Zanesco Arquitetura.



Fonte: Arch Daily (2023).

De acordo com Belitarto (2023), o Refúgio no Vale (Figura 44) foi desenvolvido como protótipo dentro de uma empresa colaborativa especializada em construção ao nível do mar. Uma pequena versão do conceito de barraca de camping, completa com todas as comodidades necessárias para uma estadia confortável. A primeira coisa que foi levada em consideração para o projeto foi a captação de energia solar para garantir que o edifício fosse autossuficiente. Isso é utilizado para suprir a necessidade de consumo de energia elétrica e aquecimento de água. Duas águas angularmente inclinadas no telhado facilitam a manutenção, incluindo a remoção de folhas caídas das árvores.

**Figura 45.** Casa Bauer / Luiz Paulo Andrade Arquitetos.



Fonte: Arch Daily (2023).

Além da estética marcante, a Casa Bauer (Figura 45) foi projetada com foco na sustentabilidade e na eficiência ambiental. A ventilação cruzada estrategicamente incluída no projeto estimula a circulação natural do ar, mantendo o ambiente fresco e seco e, conseqüentemente, reduzindo a necessidade de sistemas de ar condicionado. Além disso, foram adotadas medidas para reduzir o uso de energia, como a instalação de aquecedores solares de água e células fotovoltaicas, que transformam a energia solar em eletricidade utilizável. Estas soluções proporcionam à residência uma qualidade durável que garante que a sua relevância e desempenho sejam mantidos ao longo do tempo (Belitarto, 2023).

**Figura 46.** Casa Muxarabi / Studio Heloisa Fogaça.



Fonte: Arch Daily (2023).

Sob a premissa de total integração com o meio natural e harmonia entre a arquitetura contemporânea e a sustentabilidade, a casa (Figura 46) conta com painéis fotovoltaicos que geram a energia solar necessária ao seu bom funcionamento, além de aproveitamento de águas pluviais para irrigação dos jardins (Belitarto, 2023).

Hoje, a alta tecnologia é amplamente utilizada na criação de obras arquitetônicas. Muitos exemplos de linguagem “universal” parecem não ter qualquer compromisso com o local de implementação, com o benefício adicional de poder participar na construção de qualquer cidade. Nesse contexto, é importante perceber que utilizar as alterações climáticas como ponto de partida para um projeto não implica necessariamente conservação de energia e recursos ou condição ambiental passiva (França, 2018).

#### 4.2.1 Desafios e oportunidades

Os desafios mais preponderantes que surgem no sentido de promover a incorporação de módulos fotovoltaicos enquanto elementos construtivos, concebidos concomitantemente com a formulação do projeto arquitetônico, englobam: o temor diante do desconhecido; a hesitação em aplicar a tecnologia de maneira inadequada; a apreensão de comprometer a estética arquitetônica; a preocupação quanto à projeção de sombreamento nas áreas circunvizinhas; e a reticência frente ao substancial investimento inicial (Rüther, 2021).

Ainda de acordo com Rüther (2021), concomitantemente, é importante observar que tais apreensões, embora legítimas, frequentemente cedem espaço a oportunidades enriquecedoras. A tecnologia fotovoltaica já atingiu um estágio de maturidade satisfatório no panorama brasileiro, e sua eficácia foi amplamente validada. Abundam meios para se atualizar e sintonizar com esse emergente mercado, seja por meio de cursos especializados, seja através da aquisição de serviços de consultoria dedicados. Desse modo, pode-se atingir a confiança necessária para empregar a tecnologia de maneira acertada.

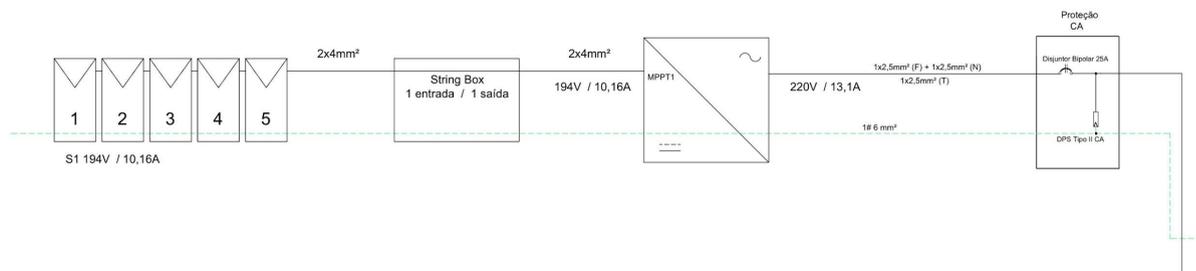
No que tange à apreensão referente ao possível comprometimento da estética, é de suma importância ressaltar que a aplicação dos módulos fotovoltaicos não se limita a uma única abordagem.

Pelo contrário, uma notável margem de flexibilidade quanto ao posicionamento revela-se presente, coexistindo com uma elevada eficiência energética. Revelam-se, assim, soluções destinadas às fachadas edificadas, estruturas de pergolados, elementos de brises, superfícies de *sheds*, coberturas planas e até mesmo curvilíneas. Ademais, a inquietação relacionada ao sombreamento das imediações encontra-se mitigada mediante consideráveis avanços tecnológicos, permitindo a otimização dos sistemas mesmo sob sombreamentos parciais (Rüther, 2021).

Como já dito anteriormente, o inversor é o responsável pela conversão da corrente contínua gerada pelo sistema fotovoltaico em corrente alternada, em casos de sistemas conectados à rede. Em caso de painéis fotovoltaicos com uma única fileira de módulos em série, existem duas configurações principais: inversor *string* e microinversores. O inversor *string* é conectado a uma fileira de módulos em série (Figura 47), enquanto cada micro inversor pode ser conectado a um único módulo

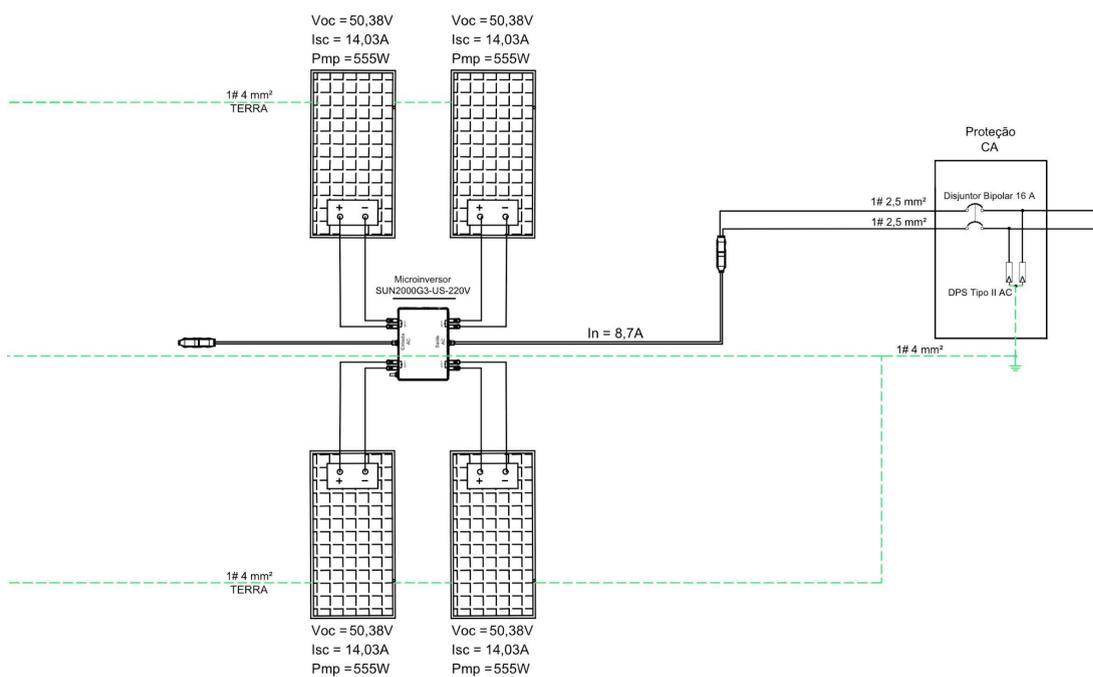
(Figura 48). Portanto, no sistema de microinversores, a conversão de corrente contínua em corrente alternada é realizada individualmente em cada módulo (Zheng et al., 2014).

**Figura 47.** Sistema com inversor string.



Fonte: Elaborado por Aline Rodrigues (2023).

**Figura 48.** Sistema com microinversor.



Fonte: Elaborado por Aline Rodrigues (2023).

Em uma configuração com inversor *string*, problemas em um módulo ou inversor, o sombreamento em um único módulo pode afetar o desempenho de toda a fileira de módulos. Por outro lado, o uso de microinversores para cada módulo evita esse problema, pois falhas ou sombreamento em um módulo afetam apenas a produção de energia desse módulo (Zheng et al., 2014), o que significa um avanço

tecnológico que permite a otimização dos sistemas fotovoltaicos, mesmo em situações que diminuem sua eficiência.

No que se refere à manutenção, em muitos cenários, a precipitação pluvial se mostra suficiente para preservar a limpeza das instalações. Além disso, a substituição de equipamentos ocorre exclusivamente ao término de sua vida útil (10 anos para inversores e 25 a 30 anos para módulos), com os custos tendendo a declinar anualmente. Contrastando essa tendência, o custo da energia convencional tende a aumentar ano após ano, ressaltando a crescente vantagem econômica da energia fotovoltaica (Rüther, 2021).

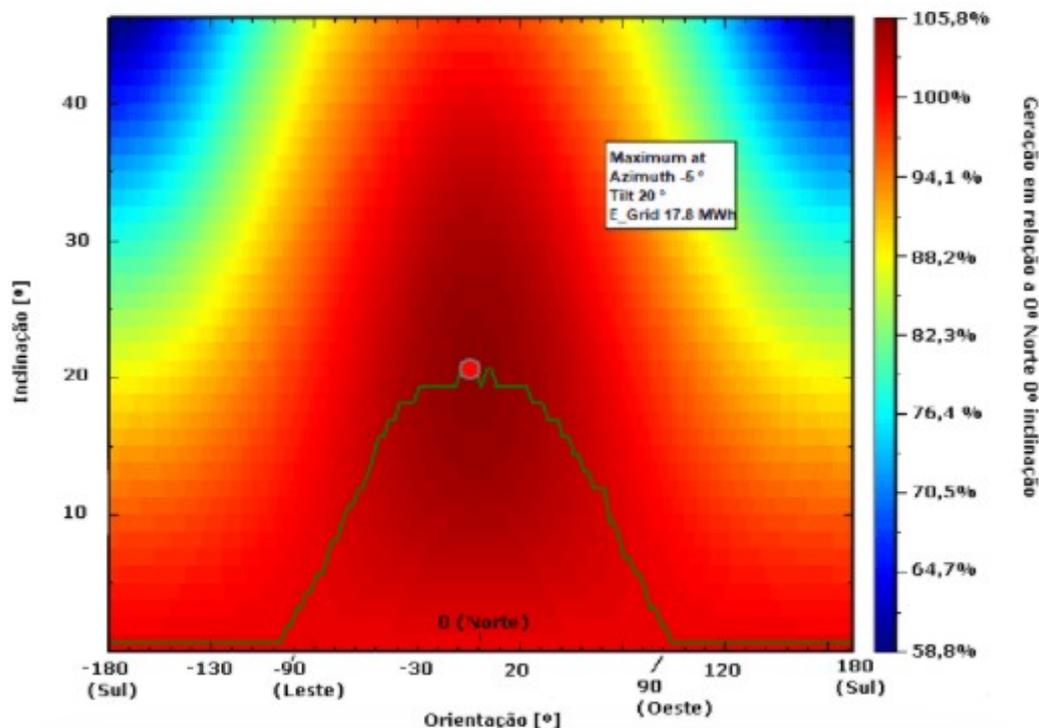
No tocante à disposição solar dos edifícios, a orientação ótima é obtida quando os módulos são posicionados voltados para o norte (para localidades no Hemisfério Sul) e com um ângulo de inclinação equivalente à latitude geográfica da área em questão (Rüther, 2021).

Em simulação realizada no PVSyst, foi produzido um gráfico (Figura 49) para a cidade de Petrolina/PE. O gráfico atua em três variáveis: ângulo de inclinação dos módulos, ângulo azimute<sup>15</sup> dos módulos e rendimento obtido com a combinação.

---

<sup>15</sup> O azimute é o nome técnico dado ao ângulo de orientação da parte frontal do módulo solar com relação ao Norte geográfico, o qual varia de acordo com a inclinação dos módulos a fim de se obter a melhor eficiência da instalação (Vinturini, 2020).

**Figura 49.** Ganhos de energia exportada em relação à orientação e à inclinação, para a cidade de Petrolina. O máximo de geração acontece para inclinação de  $10^\circ$  e orientação  $7,5^\circ$  para o Leste.



Fonte: Elaborado pelo software PVSyst (Vitrurini, 2020).

O rendimento, representado pelas cores, pode ser superior ou inferior a 100%. A geração de 100% corresponde ao cenário de referência no qual os módulos estão na horizontal, com um azimute de zero (apontando exatamente para o norte). A curva verde ilustra as combinações ideais de azimute e inclinação, que resultam na máxima geração de energia para o sistema simulado. Em outras palavras, para uma determinada orientação, a curva verde indica a inclinação que irá proporcionar a maior quantidade de energia. Como, por exemplo, para uma orientação de  $-30^\circ$  ( $-30^\circ$  Leste), a inclinação ideal é de aproximadamente  $20^\circ$  (Vitrurini, 2020).

Contudo, uma destacável característica da tecnologia fotovoltaica reside na sua elevada habilidade em extrair aproveitamento da radiação solar, mesmo quando os módulos não estão alinhados de forma ideal. Esta capacidade implica que variações em relação à orientação ao norte e inclinações distintas da latitude devem ser meticulosamente avaliadas, com as perdas decorrentes dessas modificações sendo quantificadas. Em muitas circunstâncias, tais desvios resultam em decaimentos anuais de eficiência inferiores a 5% (Zomer, 2021).

Dessa maneira, é imperioso notar que não existe uma única orientação ideal, embora de maneira genérica, uma maior inclinação ao norte seja vantajosa. As ferramentas computacionais necessárias para a realização destas análises são diversas, e os profissionais que se ocupam do desenvolvimento de projetos de arquitetura solar devem dispor do conhecimento apropriado para simular e quantificar até que ponto é possível conciliar as exigências estéticas e os parâmetros de desempenho energético anual (Rüther, 2021).

Numa perspectiva econômica, nota-se que o custo dos painéis fotovoltaicos é elevado e que nem todas as localidades possuem investimentos ou mesmo programas que incentivem investimentos relacionados ao avanço tecnológico (Gélio; César, 2021). Porém, de acordo com o estudo de Silva et al. (2019), pode-se perceber pelos orçamentos apresentados que o uso de energias alternativas é uma oportunidade significativa para os consumidores reduzirem seus custos de energia. O custo inicial do sistema fotovoltaico é elevado, mas com o passar dos anos o sistema se paga graças à redução dos custos de eletricidade provocada pela produção de energia solar.

De acordo com as especificações do fabricante dos painéis, objeto do estudo de Silva et al (2019), a garantia de desempenho do produto, trabalhando com 80% de sua eficiência, é de 25 anos, em média. Em relação às baterias que o sistema utiliza para armazenar energia, têm vida útil média de 10 anos. O valor varia muito dependendo de seu tipo, modelo e potência. O número de empresas especializadas nesta área tem aumentado com o crescimento do mercado fotovoltaico brasileiro. Como resultado, fica mais fácil acessar os itens de armazenamento, caso haja algum problema com a célula fotovoltaica ou com as baterias do sistema.

Portanto, a integração da energia solar fotovoltaica na arquitetura apresenta desafios, como a estética e os custos iniciais, mas também oferece oportunidades, incluindo a melhoria da eficiência energética, a geração distribuída e as contribuições para a sustentabilidade, tal qual abordado neste capítulo.

#### **4.2.2 Relação de custo-benefício**

O desempenho financeiro inerente a um sistema fotovoltaico implantado em solo é quantificado por meio do cálculo de seu período de retorno, também conhecido como "*payback*". De acordo com relatórios contemporâneos elaborados

por entidades especializadas neste domínio analítico, o período de retorno médio de um sistema fotovoltaico encontra-se aproximadamente em torno de 5 anos, o que equivale a uma estimativa de rentabilidade abarcando um horizonte temporal mínimo de 20 anos (Rüther, 2021).

Em contextos em que os módulos fotovoltaicos são adotados como componentes de revestimento, substituindo elementos passivos que seriam empregados com tal finalidade, torna-se imprescindível considerar nos cálculos os custos evitados relacionados ao material outrora demandado. Importa ressaltar que, em virtude de uma significativa redução de preços - cerca de 10 vezes nos últimos 10 anos - os módulos fotovoltaicos agora apresentam custos por metro quadrado inferiores a diversos materiais de revestimento tradicionalmente empregados (Zomer, 2021).

Essa comparação foi feita para edifícios de escritórios e foi divulgada recentemente pelo Laboratório de Energia Solar Fotovoltaica da UFSC. Mostra que dependendo do tipo de material de fachada escolhido, os painéis fotovoltaicos podem ser considerados como geradores livres<sup>16</sup> (Zomer, 2021).

O retorno financeiro de um investimento em um sistema de geração fotovoltaica é possível em poucos anos, graças à redução dos custos de energia elétrica. O custo de um painel solar no mercado brasileiro varia de acordo com uma série de fatores, como tecnologia, potência, material utilizado na sua fabricação, eficiência, além de indicadores macroeconômicos como o valor do dólar e a taxa de câmbio internacional.

A título de exemplo, segundo o Portal Solar (2023), o custo de um painel solar varia de R\$500 a R\$1.000, dependendo da tecnologia e da potência do equipamento. Graças ao avanço tecnológico e ao aumento da escala de produção, o custo desses equipamentos caiu significativamente nas últimas décadas. Um painel solar típico custava US\$115,28 por watt (W), em 1975. O valor caiu para US\$0,27/W em 2021, o que corresponde a uma redução percentual de mais de 99%.

Embora tenha havido aumentos pontuais nos preços globais de placas solares entre 2020 e 2022, devido à escassez de matéria-prima e à demanda crescente, a tendência de longo prazo é a de queda nos preços. A demanda por

---

<sup>16</sup> É um gerador de energia extremamente robusto e resistente. Por isso, o investimento inicial costuma ser mais elevado, mas pode ser compensado com o custo relativamente baixo do combustível para gerar energia.

energia solar, impulsionada pela busca por redução de custos e metas de descarbonização, estimula a expansão da capacidade produtiva. Além disso, avanços tecnológicos tornam os painéis solares mais eficientes e acessíveis, reduzindo os custos de investimento em sistemas fotovoltaicos (Portal Solar, 2023).

O custo do kit fotovoltaico, que inclui inversor solar, estruturas de suporte e fixação, cabines e *string* box, varia de acordo com o tamanho e a complexidade da instalação. O custo dos sistemas residenciais é inferior ao dos grandes sistemas utilizados em empresas e indústrias, uma vez que apresentam perfis de consumo mais baixos. Os preços médios dos sistemas fotovoltaicos para consumidores financeiros (Figura 50) foram obtidos a partir de uma pesquisa com milhares de empresas instaladoras de energia solar realizada pela consultoria Greener. A pesquisa foi realizada em julho de 2023 (Portal Solar, 2023).

**Figura 50.** Preço médio de kits fotovoltaicos.

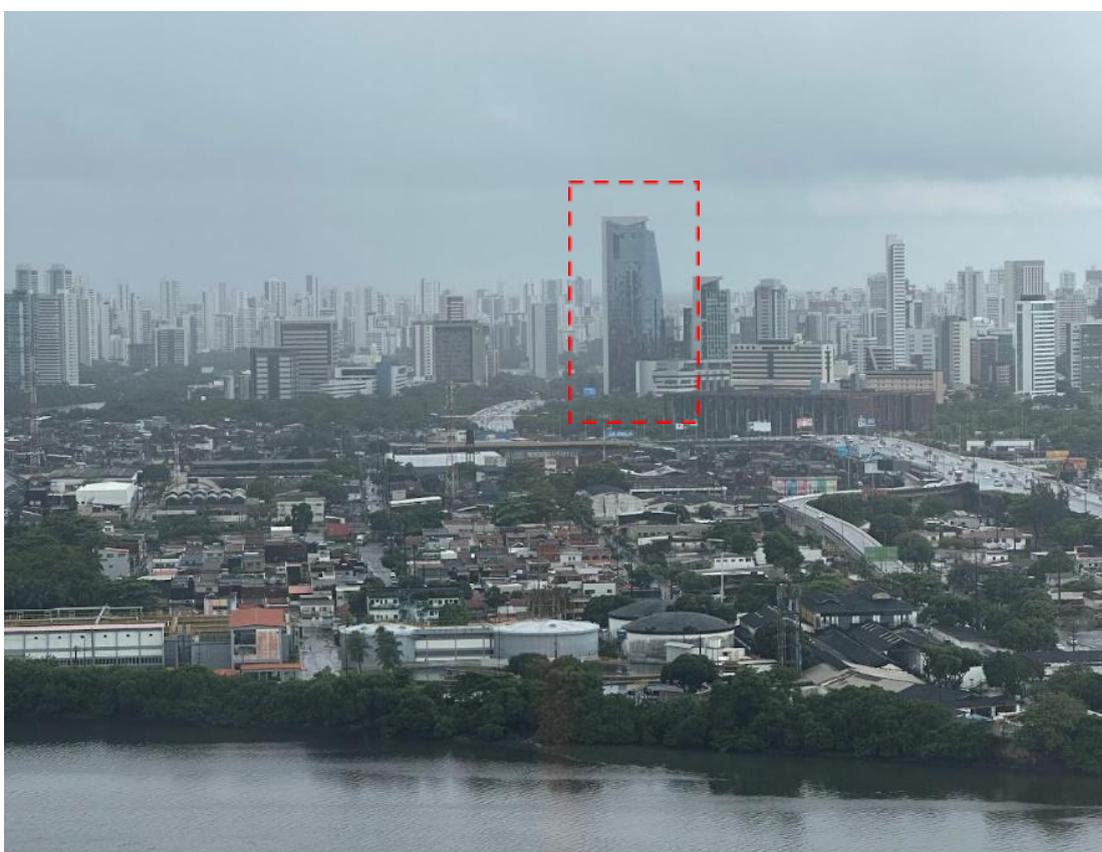
Potência do gerador solar	Preço médio
2 kWp	R\$ 8.960,00
4 kWp	R\$ 14.720,00
8 kWp	R\$ 26.080,00
12 kWp	R\$ 36.240,00
30 kWp	R\$ 84.300,00
50 kWp	R\$ 142.000,00
75 kWp	R\$ 227.250,00
150 kWp	R\$ 441.000,00
300 kWp	R\$ 882.000,00
500 kWp	R\$ 1.525.000,00
1 MWp	R\$ 2.920.000,00
3 MWp	R\$ 8.730.000,00
5 MWp	R\$ 14.200.000,00

Fonte: Portal Solar (2023).

## 5. ANÁLISE DE EDIFICAÇÃO EXISTENTE – BREVE ESTUDO DE CASO

O Edifício Charles Darwin fica localizado no bairro da Ilha do Leite, no município de Recife, e complementa a quadra de um grupo de seis torres da Rio Ave Corporate Center. Devido a grandiosidade do terreno e a posição de arremate da quadra que a edificação ocupa, o mesmo pode ser notado a quilômetros de distância (Figura 51).

**Figura 51.** Impacto visual da edificação no entorno.



Fonte: Aline Rodrigues (2023).

Com mais de 15 mil metros quadrados de vidro, posicionados, principalmente, nas fachadas Sul, Leste e Norte e aplicados em 35 pavimentos, foi possível realizar esse breve estudo de caso acerca das possibilidades de aplicação de coletores solares nas fachadas Norte e Leste, como placas fotovoltaicas ou até mesmo painéis solares, desenvolvidos para aplicação em esquadrias (Figura 52).

**Figura 52.** Fachada sul da edificação.



Fonte: Aline Rodrigues (2023).

A orientação solar, no caso da aplicação de placas solares, é de suma importância na decisão projetual, pois ela irá definir a quantidade de radiação solar que as placas irão receber. No hemisfério sul, onde se localiza o território brasileiro e, conseqüentemente, a cidade do Recife, a fachada Norte é a que recebe mais incidência solar durante o dia, de março a setembro e a face sul, de outubro a fevereiro, ambas do nascer do sol ao pôr do sol. As fachadas leste e oeste recebem a incidência da radiação solar durante todo o ano, mas apenas nos períodos da manhã e da tarde, respectivamente.

Sabe-se que a eficiência de um painel solar é uma métrica que quantifica a proporção da luz solar incidente (irradiação) na superfície de um módulo, que é convertida em eletricidade. Sendo assim, dois são os principais determinantes para a eficiência de um módulo fotovoltaico: a **eficiência da célula fotovoltaica (PV)**, de

acordo com o desenho da célula e no tipo de silício utilizado para fabricação da mesma, e a **eficiência total do painel**, que se caracteriza através do layout da célula, configuração e tamanho do painel (Peters Junior, 2023).

No entanto, o aumento da temperatura do ar, provocado por alguns fatores climáticos, pode prejudicar na produção de energia solar. Uma pesquisa realizada pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) identificou recentemente um aumento da temperatura média do ar no estado da Paraíba. Foi constatado que esse aumento está ligado a condições climáticas que podem impactar negativamente a eficiência da produção de energia fotovoltaica na região. Isso ocorre devido à redução da tensão elétrica nos painéis fotovoltaicos, que são responsáveis pela captação e conversão da radiação solar em eletricidade. Como resultado, essa diminuição elétrica pode levar a uma redução na geração de energia elétrica desses painéis (Paz, 2022).

Recife localiza-se às margens do Oceano Atlântico e possui clima tropical litorâneo quente e úmido (Freitas, 2008). De acordo com os valores das Normais Climatológicas<sup>17</sup>, no período compreendido entre 1991-2020, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, a cidade apresenta valores médios anuais de temperatura do ar de 26°C, umidade relativa do ar de 77,6%, velocidade dos ventos igual a 2,4m/s, oriundos prioritariamente de sudeste, precipitação acumulada de 2.155,5mm, com predominância do regime de chuvas entre os meses de abril e julho e insolação acumulada de 2.502,3 horas, tendo o mês de dezembro 244,6 horas de insolação. Esses valores são importantes para justificar a possibilidade do estudo, visando ao aproveitamento da radiação solar para a geração de energia elétrica, a partir do uso de fachadas. Os módulos fotovoltaicos cristalinos comerciais – sejam eles mono ou poli – possuem coeficientes térmicos que desempenham um papel crucial na sua eficiência em relação à temperatura de operação. Contudo, os coeficientes térmicos das células e dos módulos fotovoltaicos, sejam eles monocristalinos ou policristalinos, geralmente apresentam semelhanças significativas (Villalva, 2019).

Como já mencionado, é verdade que os módulos fotovoltaicos cristalinos experimentam uma redução de eficiência e potência quando operam em temperaturas elevadas. Isso é inevitável e é resultado da natureza do silício,

---

<sup>17</sup>Instituto Nacional de Meteorologia. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 22 set. 2023.

juntamente com os efeitos das características de construção das células e módulos. Esse fenômeno de redução de eficiência, devido ao aumento da temperatura, é observado tanto em módulos policristalinos quanto em módulos monocristalinos. No entanto, é importante destacar que os módulos de silício monocristalino tendem a apresentar um desempenho muito bom nas condições climáticas brasileiras, de um modo geral. Com uma leve vantagem em relação ao silício policristalino, em alguns cenários específicos (Villalva, 2019).

Devido a essas características, é possível analisar a edificação do empresarial Charles Darwin, a título de exemplo. As orientações das fachadas Norte e Leste (Figura 53) da edificação se tornam bastante proveitosas para a aplicação de módulos fotovoltaicos, a fim de suprir uma necessidade comercial, destinada para abastecimento interno das áreas comuns do edifício.

**Figura 53.** Fachada leste (laranja) e norte (vermelho) da edificação.



Fonte: Adaptado de Pontual Arquitetos (2009).

A edificação possui dois tipos de esquadrias: uma maior, ofertada para as visadas de cada pavimento, e uma mais estreita, que indica a laje de separação dos andares (Figura 54), como verificado na fachada oeste da edificação, em que a separação das esquadrias se repete por toda as fachadas revestidas por vidro (Figura 55).

**Figura 54.** Esquadria para elevador panorâmico voltada para Oeste.



Fonte: Aline Rodrigues (2023).

**Figura 55.** Detalhe esquadria que se repete por toda a edificação.



Fonte: Aline Rodrigues (2023).

Sendo assim, é possível adotar um sistema de captação solar nas principais fachadas da edificação, em se tratando em aproveitamento solar – fachadas leste e norte, onde os cálculos foram baseados na norma ABNT NBR 15569:2018.

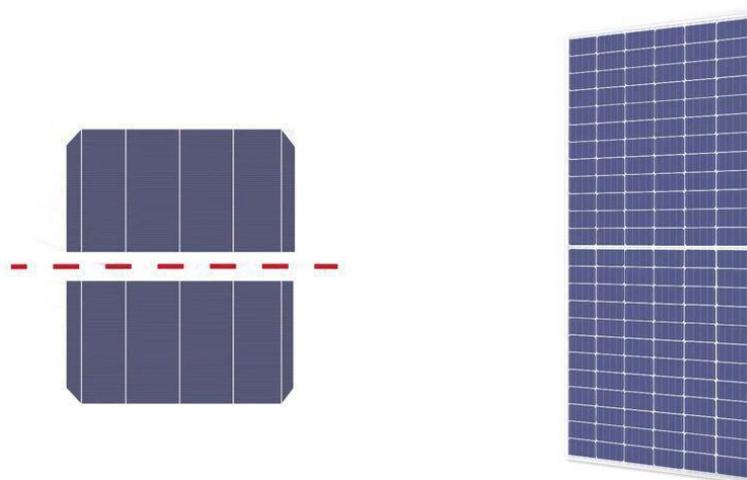
Para a edificação abordada, foi escolhida a aplicação do módulo monocristalino *half-cell* do fabricante Sunova Solar, sendo antirreflexo e ajudando no mantimento da visibilidade para o exterior, além de possuir coeficiente gama<sup>18</sup> de  $-0,35\%/^{\circ}\text{C}$ , com a capacidade de gerar, em média, 825 mWh/ano, sendo possível a aplicação na esquadria que indica a separação dos pavimentos, identificada pela cor vermelha (Figura 56).

---

<sup>18</sup> O coeficiente de temperatura da potência, que é um número negativo, representa a variação da potência de pico do módulo (PMPP) com a temperatura. Isso significa que a potência do módulo diminui à medida que a temperatura aumenta, afetando o desempenho dos painéis solares, que tendem a funcionar em temperaturas mais baixas (Villalva, 2019).

A tecnologia de células *half-cell* se caracteriza por módulos fotovoltaicos com células retangulares cortadas ao meio (Figura 56), em contraposição às tradicionais células quadradas. Além disso, as células de dimensões reduzidas experimentam menos estresse mecânico, reduzindo significativamente a probabilidade de surgimento de microfissuras, uma das principais causas de degradação da eficiência e da vida útil dos módulos fotovoltaicos. Os fabricantes dos módulos fotovoltaicos já disponibilizam células pré-cortadas ao meio, simplificando o processo de produção dos módulos. São necessários apenas pequenos ajustes na linha de produção para integrar um tipo ou outro de célula. Os módulos meio-célula exibem uma maior tolerância a sombreamentos quando comparados aos módulos tradicionais (Villalva, 2019).

**Figura 56.** Módulo fotovoltaico com células cortadas ao meio (*half-cell*) com as mesmas dimensões de um módulo comum.



Fonte: Villalva (2019).

Quanto ao painel solar, as janelas transparentes de painel solar têm o potencial de substituir as janelas de vidro convencionais. Para serem eficazes, as janelas de painel solar devem equilibrar a entrada de luz para iluminar o ambiente e capturar a luz para a produção de energia. Se permitirem pouca luz, agem apenas como painéis solares verticais, e se permitirem muita luz, não geram eletricidade de forma econômica. Portanto, para ter um impacto significativo no mercado solar, é essencial que as janelas de painel solar se integrem de maneira discreta ao edifício e utilizem a tecnologia de painel solar transparente (Energia Solar Shop, 2021).

O painel solar transparente, que produz em média 17 mWh/ano, foi pensado para preservar a identidade da edificação escolhida, mantendo a entrada de luz solar enquanto a célula estiver gerando energia; sendo colocado na esquadria juntamente com o *half-cell*, indicado pela cor roxa (Figura 57).

**Figura 57.** Fachada norte com melhor aproveitamento solar.



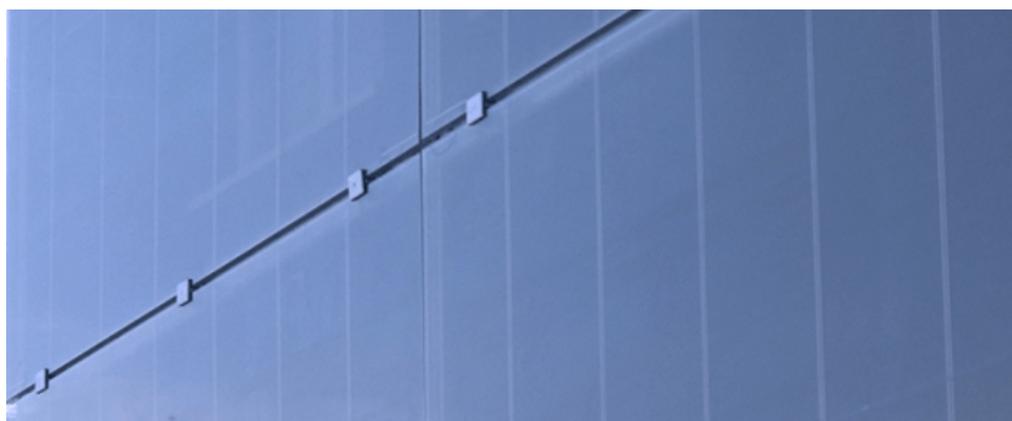
Fonte: Elaborado por Aline Rodrigues (2023).

Para a aplicação desse projeto, fez-se uma pesquisa acerca do fabricante Sunova; os cálculos realizados foram baseados na utilização do Painel Solar de 550W (SS-550-72MDH), que possui 144 células de silício monocristalino PERC *Half Cell* de alta eficiência e que pode gerar até 2.200Wh/dia. Baseado nos cálculos feitos, utilizando 1.330 placas (o necessário para o m<sup>2</sup> da área superficial da fachada

leste e norte em questão do edifício), a Eficiência do Painel Solar seria de 21,3%/cada e a Produção Média Mensal de Energia de cada painel seria de 68,75 kWh/mês, que, quando multiplicada pela quantidade total de painéis aplicados obtém-se 91.437,5kWh/mês de produção mensal de energia, totalizando em 1.097.250 kWh/ano<sup>19</sup>.

Juntamente com o Painel Solar transparente, tem-se que os escolhidos para a edificação são feitos de vidro fotovoltaico de silicógeno amorfo (4m x 2m, podendo ser adaptada essa dimensão), da empresa Onyx Solar, o qual apresentam uma junção de funcionalidade, eficiência e estética, e oferecem as mesmas propriedades mecânicas de um vidro convencional, como questões de segurança, colocado em edificações (Figura 58).

**Figura 58.** Aplicação do painel de silício amorfo em fachada.



Fonte: Onyx Solar (2022).

Algumas das vantagens do vidro solar fotovoltaico de silício amorfo, em relação as de silício cristalino, se concentram na maior produção de energia, mesmo em condições nubladas e altas temperaturas, oferecendo níveis variáveis de transmitância de luz visível, até 30%, e proporcionando flexibilidade de modelagem para se adaptar às necessidades arquitetônicas, sob critérios formais (Figura 59). No entanto, faz-se necessário pontuar, também, algumas desvantagens, como eficiência geralmente menor e uma vida útil potencialmente mais curta. Portanto,

---

<sup>19</sup> Foi multiplicado a produção mensal de energia de cada painel pela quantidade total de painéis utilizados (68,75 kWh x 1330 = 91.437,50 kWh), com a produção mensal total dos painéis, multiplicou-se pela quantidade de meses (91.437,50 kWh x 12 = 1.097.250 kWh/ano)

também faz-se válido o estudo em conjunto da geração de energia, consumo de energia e custo, devido a diminuição da transmitância.

**Figura 59.** Diferentes transparências do painel de silício amorfo aplicado nas esquadrias de formas variadas.



Fonte: Onyx Solar (2022).

O desempenho energético dos painéis de silício amorfo de média transparência (20% de transparência), variam de 12% a 34%, dependendo da configuração da espessura escolhida, com um pico de energia<sup>20</sup> de 34 Wp/m<sup>2</sup>, podendo gerar mensalmente, aproximadamente 5,443 kWh/mês, totalizando em 65,316 kWh/ano, dependendo das condições climáticas locais da edificação, o que nos dá um total de 86.870,28 kWh/ano gerados pelo total de painéis solares de silício amorfo.<sup>21</sup>

Quanto ao aproveitamento da energia solar no empresarial Charles Darwin, com uma área de, aproximadamente, 9.000m<sup>2</sup> de painéis solares compostos por silício monocristalino *half-cell*, aplicados nas fachadas leste e norte, com produção anual de 1.097.250 kWh e vidro solar fotovoltaico de silício amorfo, com produção anual de 86.870,28 kWh, a produção total anual seria de aproximadamente 1.184.120,28 kWh<sup>22</sup>.

Sabe-se que a energia solar é uma fonte limpa e renovável, a qual não emite poluentes nem gases de efeito estufa durante a geração de energia, o que contribui

<sup>20</sup> Valor da potência nominal do painel, ou seja, a potência máxima que ele pode gerar em condições ideais de insolação (Portal Solar, 2019).

<sup>21</sup> Utilizou-se a mesma linha de raciocínio do cálculo feito para os painéis monocristalinos. Foi multiplicado o total gerado por ano por um painel pela quantidade de painéis (65,316 kWh x 1330 = 86.870,28 kWh/ano)

<sup>22</sup> Soma-se as duas produções de cada painel para obtenção da produção total anual.

para a sustentabilidade ambiental. Além disso, a adoção desses painéis permite a redução da dependência de fontes convencionais de energia, resultando em uma economia a longo prazo nas contas mensais de energia (ABNT NBR 15569:2018).

Outro ponto positivo é a potencial redução de custos, uma vez que muitas regiões oferecem incentivos fiscais e tarifas de alimentação que permitem a venda do excedente de eletricidade gerada de volta à rede elétrica, gerando receita adicional ou créditos na conta de energia (ABNT NBR 15569:2018).

Além disso, a instalação dos painéis solares na edificação abordada pode aumentar o valor de mercado do imóvel, tornando-o mais atraente para inquilinos ou compradores preocupados com a eficiência energética e a sustentabilidade (ABNT NBR 15575:2013).

É válido pontuar que, todos os valores aqui apresentados são estimativas e podem variar de acordo com os diversos fatores, como orientação dos painéis, inclinação e a eficiência mais precisa dos painéis. Portanto, para trabalhos futuros e mais precisos, recomenda-se uma análise detalhada em conjunto com um especialista em energia solar, para determinar com a devida precisão o potencial de geração de energia solar na edificação abordada, fazendo bastante válida a aplicação da edificação em softwares de geolocalização e confecção de cartas solares a fim de se obter um estudo mais completo e assertivo.

Sendo assim, as aplicações abordadas para o empresarial Charles Darwin, já existente e consolidado, mostra que o mesmo também pode ser adaptado com esses tipos de tecnologias fotovoltaicas a fim de proporcionar uma fonte auxiliar de energia e reduzir os custos da edificação, além de contribuir com as questões sustentáveis.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido aos benefícios que proporcionam, os sistemas de energia solar fotovoltaica estão cada vez mais integrados em ambientes construídos, especialmente, em países industrializados. Isso compensa seu alto custo inicial .

O uso da energia solar fotovoltaica, em larga escala, parece promissor devido aos avanços na tecnologia de filmes finos, que têm um potencial significativo de redução de custos financeiros, quando amplamente utilizados. As tecnologias fotovoltaicas de filmes finos também são mais indicadas, por considerações estéticas; por isso, em breve, poderão dominar as aplicações integradas a ambientes que estão sendo construídos no Brasil.

Em meio ao crescente desafio global de transição para fontes de energia mais limpas e sustentáveis, a energia solar emerge como uma solução promissora e viável. O presente trabalho buscou explorar e analisar a captação e aproveitamento da energia solar, no contexto da arquitetura, onde se apresenta como uma oportunidade significativa para a promoção de ambientes construídos mais eficientes e ecologicamente sustentáveis, do ponto de vista da geração de energia..

Nesse ínterim, demonstra-se a importância da produção energética a partir de fontes renováveis, destacando o papel fundamental dos sistemas fotovoltaicos no cenário atual de geração de energia, a partir da integração da energia solar com a arquitetura, evidenciando ainda, as possibilidades oferecidas pelo aproveitamento passivo. A análise de viabilidade financeira demonstrou que, além dos benefícios ambientais, a utilização da energia solar também apresenta vantagens econômicas, tornando-se uma escolha atrativa para investimentos em projetos arquitetônicos sustentáveis.

Destaca-se a importância dos sistemas fotovoltaicos integrados à edificação (BIPV/T) como uma estratégia inovadora para a maximização da eficiência energética. A avaliação dos diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, desde o silício cristalino até os compostos de cádmio e telureto, permitiu uma compreensão mais detalhada das opções disponíveis e de suas respectivas aplicações na arquitetura.

Ao abordar a arquitetura orientada pelo uso de tecnologias fotovoltaicas, ressalta-se a necessidade de uma seleção criteriosa dos sistemas mais adequados no desempenho de um papel crucial no sucesso de projetos sustentáveis. Nesse contexto, é fundamental considerar não apenas os aspectos técnicos, mas também

os desafios e as oportunidades associados, bem como a análise de custo-benefício, que influencia diretamente nas decisões de implementação.

Além disso, a inserção da legislação brasileira no contexto dos sistemas fotovoltaicos oferece um panorama das políticas de incentivo e regulamentações vigentes. A Resolução Normativa 482/2012 representa um marco importante ao proporcionar condições favoráveis para a geração distribuída, contribuindo para o avanço da energia solar no país.

Ainda, com o estudo de caso acerca da aplicabilidade da energia solar sustentável no Edifício Charles Darwin, chega-se à conclusão de que ele pode igualmente ser integrado com essas tecnologias fotovoltaicas, com o propósito de fornecer uma fonte adicional de energia e diminuir os gastos com consumo, ao mesmo tempo em que contribui para as iniciativas sustentáveis.

Em síntese, a presente pesquisa destaca a energia solar como um recurso promissor na busca por soluções sustentáveis na arquitetura. A integração eficaz dessas tecnologias não apenas impulsiona a eficiência energética dos edifícios, mas também contribui para a mitigação dos impactos ambientais causados pela geração de energia convencional. Portanto, a adoção da energia solar na arquitetura representa um passo significativo em direção a um futuro mais sustentável e resiliente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR – **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/16832773/4+-+ABSOLAR+GD+Solar+Fotovoltaica.pdf/f0d41ea4-4bba-8cf8-fb02-b864dc83c293>. Acesso em: 25 jul. 2023

ABNT NBR 15569:2018 - **Edificações habitacionais - Desempenho - Sistemas de aquecimento solar de água** - Requisitos: Esta norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece os requisitos para sistemas de aquecimento solar de água em edificações.

ABNT NBR 15575:2013 - **Edificações habitacionais** - Desempenho: Essa norma trata do desempenho de edificações habitacionais, incluindo aspectos relacionados à eficiência energética e sustentabilidade.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). (2021). **Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 18 set. 2023.

ALVITO , David. **COPENHAGEN INTERNATIONAL SCHOOL: UM DIA, TODAS AS ESCOLAS SERÃO ASSIM**. [S. l.]: Edifícios e Energia, 5 jul. 2019. Disponível em: <https://edificioseenergia.pt/noticias/copenhagen-school286/>. Acesso em: 16 ago. 2023.

ALMEIDA, E. **Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica**. Belo Horizonte: [s.n.], 2017. 18 p.

**AMORPHOUS SILICON PHOTOVOLTAIC GLASS**. [S. l.], 2022?. Disponível em: <https://onyxsolar.com/product-services/amorphous-pv-glass>. Acesso em: 21 set. 2023.

ANAMI, A. M. **Painel fotovoltaico: perspectivas e desafios**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 80 f. 2017

BALJIT, Singh; CHAN, Hoy-Yen; KAMARUZZAMAN, Sopian. Review of Building integrated applications of photovoltaic and solar thermal systems. **Journal of Cleaner Production** 137, pp. 677-689. 2016. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/journal-of-cleaner-production>. Acesso em: 08 ago. 2023.

BARBOSA, Djean da Costa; LIMA, ; Mariana Brito de. **ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA: RECOMENDAÇÕES APROPRIADAS PARA PALMAS/TO. ANAIS ELETRÔNICOS - 1ª JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EXTENSÃO DO IFTO**, [S. l.], p. 1-7, 14 out. 2010.

BARDOU, P.; ARZOUMANIAN, V. **Sol Y Arquitectura**. 3 ed. Barcelona, Gilli, 171p., 1984.

BELITARDO, Adele. "Sustentabilidade e economia: casas brasileiras que usam energia solar " 13 Ago 2023. **ArchDaily Brasil**. Acessado 31 Ago 2023. <<https://www.archdaily.com.br/br/1004436/sustentabilidade-e-economia-casas-brasileiras-que-usam-energia-solar>> ISSN 0719-8906

CALCA, Marcus Vinicius Contes *et al.* Outliers Detection in a Quality Control Procedure for Measurements of Solar Radiation. **ResearchGate**, [S. l.], p. 1-9, 1 dez. 2019. DOI 10.1109/TLA.2019.8986419. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/338018507\\_OUTLIERS\\_DETECTION\\_IN\\_A\\_QUALITY\\_CONTROL\\_PROCEDURE\\_FOR\\_MEASUREMENTS\\_OF\\_SOLAR\\_RADIATION](https://www.researchgate.net/publication/338018507_OUTLIERS_DETECTION_IN_A_QUALITY_CONTROL_PROCEDURE_FOR_MEASUREMENTS_OF_SOLAR_RADIATION). Acesso em: 1 ago. 2023.

CAMÊLO CAVALCANTI, Evandro Sérgio; BRITO, Rubem Bastos Sanches de. GERAÇÃO HELIOTÉRMICA: UMA NOVA OPÇÃO DE ENERGIA LIMPA PARA O BRASIL. **VIII Congresso Brasileiro de Energia – CBE**, [S. l.], p. 1-15, 2 dez. 1999.

CANTON, N. V. **Análise de Eficiência Energética de uma Residência Usando Estratégias de Arquitetura Passiva e Energia Solar**. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CHIGUERU TIBA et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**: Banco de dados solarimétricos. Ed. Universitária da UFPE, 2000, 111 p.

CHOW, Tin Tai. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. **Applied Energy** v. 87, p. 367. 2017.

COELHO, Darlene Figueiredo Borges; CRUZ, Victor Hugo do Nascimento; "Eficiência energética nas edificações", p. 61 -88. In: **Edifícios Inteligentes: uma visão das tecnologias aplicadas**. São Paulo: Blucher, 2017. ISBN: 9788580392210, DOI 10.5151/9788580392210-05

DA SILVA, G. F. ET AL. **Energias alternativas**: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro. Aracaju, API. 316p., 2019.

DASSI, Jonatan Antonio; ZANIN, Antonio; BAGATINI, Fabiano Marcos; TIBOLA, Ademar; BARICHELLO, Rodrigo; MOURA, Geovanne Dias de. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil. **XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS**. 2015, Foz do Iguaçu/PR.

DIAS, P. R. **Caracterização e reciclagem de materiais de módulos fotovoltaicos (painéis solares)**. 2015.

EIA - U.S. Energy Information Administration. Net metering. Disponível em: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=104&t=3>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2022**: Ano base 2021 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2011**: Ano base 2010 / Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro: EPE, 2011.

ENERGIA SOLAR SHOP. Energia Solar em Janelas. **O que é uma Janela de Painel Solar e como funciona?**. [S. l.], 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.energiasolarshop.com.br/post/energia-solar-em-janelas-o-que-%C3%A9-uma-janela-de-painel-solar-e-como-funciona>. Acesso em: 19 set. 2023.

ESTEVES, ELOISA NONATO. **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO PAINEL FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA NO INTERIOR DE SÃO PAULO**. 2014. 59 p. MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO (Pós-Graduação Lato Sensu em Construções Sustentáveis) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, [S. l.], 2014. Disponível em: [https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17381/2/CT\\_CECONS\\_III%20\\_2014\\_04.pdf](https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17381/2/CT_CECONS_III%20_2014_04.pdf). Acesso em: 6 set. 2023.

FERRER, J.A.; GARRIDO, A. **Eficiência Energética em Edifícios**. [S. l.: s. n.], 2013. Disponível em: [https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/e/ec/Modulo\\_Teorico\\_-\\_Efici%C3%Aancia\\_Energ%C3%A9tica\\_em\\_Edf%C3%ADcios.pdf](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/e/ec/Modulo_Teorico_-_Efici%C3%Aancia_Energ%C3%A9tica_em_Edf%C3%ADcios.pdf). Acesso em: 2 ago. 2023.

FRANÇA, Lívia Ferreira de. **Singular e plural: estudos de conforto ambiental à luz de arquitetura bioclimática, eficiência energética e experiência espacial do usuário**. 2018. 184 p. Dissertação (Mestrado - Desenvolvimento Urbano) - UFPE, [S. l.], 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32431>. Acesso em: 30 ago. 2023.

GAVIOLI, A. M.; FREDERICO, M.; PEREIRA, V. H.; ALBAREDA, A. Viabilidade financeira para implantação de painéis fotovoltaicos em um hospital público do município de Curitiba / Financial viability for the implantation of photovoltaic panels in a public hospital of the city of Curitiba. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 9644–9660, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n1-654. Disponível em:

<https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/23741>. Acesso em: 14 aug. 2023.

GODOI, Cleidivam. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: CONCEITO E TIPOS DE SOLUÇÕES EXISTENTES ATUALMENTE NO MERCADO. **6º Simpósio de Sustentabilidade e Contemporaneidade nas Ciências Sociais**, [S. l.], p. 1-12, 28 jun. 2018.

GOMES GÉLIO, L.; IGNÁCIO GIOCONDO CÉSAR, F. ENERGIA SOLAR - UM ESTUDO SOBRE O FUTURO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE** - ISSN 2763-8928, [S. l.], v. 1, n. 5, p. e1534, 2021. DOI: 10.47820/acertte.v1i5.34. Disponível em: <https://acertte.org/index.php/acertte/article/view/34>. Acesso em: 10 set. 2023.

G1. **Orientação solar é fator importante na hora de escolher o imóvel**. [S. l.], 10 abr. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/mercado-imobiliario-do-interior/noticia/orientacao-solar-e-fator-importante-na-hora-de-escolher-o-imovel.ghtml>. Acesso em: 20 set. 2023.

HANAI, F. Y.; ESPÍNDOLA, E. L. G. INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE: CONCEITOS, TIPOLOGIAS E APLICAÇÃO AO CONTEXTO DO DESENVOLVIMENTO TURÍSTICO LOCAL. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, São Paulo (SP), v. 5, n. 3, p. 135–149, 2012. DOI: 10.24857/rgsa.v5i3.362. Disponível em: <https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/362>. Acesso em: 21 sep. 2023.

HCC ENERGIA SOLAR. **Kit de energia solar: saiba quais são os equipamentos utilizados**. [S. l.], 10 maio 2022. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/kit-de-energia-solar-saiba-quais-sao-os-equipamentos-utilizados/>. Acesso em: 1 set. 2023.

HEINSTEIN, Patrick, BALLIF, Christophe; PERRET-AEBI, Laure Emmanuelle. Building-Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. **DE GRUYTER**, v. 3, n. 2, p. 125-156. 2013. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/view/j/green.2013.3.issue-2/green-2013-0020/green-2013-0020.xml>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

HELDEN, Wim G. J. van; ZOLINGEN, Ronald J. Ch. Van; ZONDAG, Herbert A.. PV Thermal Systems: PV Panels Supplying Renewable Electricity and Heat. **Progress In Photovoltaics: Research And Applications**. vol. 12, p. 415-426. 2004. Disponível em: <http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/4555.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

IEA. Photovoltaic in buildings: **A design handbook for architects and engineers**. International Energy Agency. Paris. 1995.

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). (2020). **Procel e INMETRO lançam regulamentação que reduz custos em sistemas de energia solar fotovoltaica.** Disponível em: <https://www.inmetro.gov.br/noticias/procel-e-inmetro-lancam-regulamentacao-que-reduz-custos-em-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica>. Acesso: 21/09/2023.

Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (IDEC). (2020). **Guia Prático: Energia Solar Fotovoltaica - O que você precisa saber antes de adquirir um sistema.** Disponível em: <https://idec.org.br/idec-informa/guia-pratico-energia-solar-fotovoltaica>

Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE). (2019). **Energia Solar Fotovoltaica: Riscos Ambientais e Desafios para o Futuro.** Disponível em: <http://www.inee.org.br/wp-content/uploads/2019/09/INEE-Paper-12-Energia-Solar-Fotovoltaica-Riscos-Ambientais-e-Desafios-para-o-Futuro.pdf>

IS BRASIL SOLAR. **CONFAZ altera ICMS de isenção a equipamentos fotovoltaicos.** [S. l.]: 6 jul. 2022. Disponível em: <https://isbrasilsolar.com.br/artigo/confaz-altera-icms-de-isencao-a-equipamentos-fotovoltaicos/#:~:text=A%20atualiza%C3%A7%C3%A3o%20garantir%C3%A1%20isen%C3%A7%C3%B5es%20de,corrente%20cont%C3%ADnua%20tamb%C3%A9m%20foram%20atualizadas>. Acesso em: 26 ago. 2023.

JANNUZZI, Gilberto de Martino; VARELLA, Fabiana K. de O. M.; GOMES, Rodolfo Dourado Maia. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. **International Energy Initiative**, Campinas/SP, p. 1-43, 1 out. 2009.

JARDIM, C. D. S. **A inserção no contexto brasileiro de sistemas solares fotovoltaicos interligados à rede elétrica, quando analisados através do fator efetivo de capacidade de carga (FECC), enfocando a redução do pico de demanda diurno em centros urbanos.** (2007). (Doutorado) - PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2007.

JARDIM, C. D. S.; RÜTHER, R.; SALAMONI, I. T.; VIANA, T. D. S.; REBECHI, S. H.; KNOB, P. J. The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil. **Energy and Buildings** [S.l.], v. 40, n. 3, p. 365-370, 2008.

KALTMAYER JUNIOR, Günther, **Análise de um sistema de fachada termo fotovoltaico Integrado à arquitetura – estudo de caso na cidade de Curitiba, Brasil.** 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

KALTMAYER, G.. **Metodologia de apoio à concepção de sistemas fotovoltaicos integrados à arquitetura por meio de ferramentas operacionais: estudo de caso**

para um projeto em Curitiba. Monografia de especialização – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2015. Disponível em: <https://http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/13035>. Acesso em: 03 ago. 2023.

LAMBERTS, Roberto *et al.* **DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES: LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES**. [S. l.]: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CTC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL, 2016. 239 p.

LOYS, Isabelle de. **Utilização de Energia solar fotovoltaica em áreas urbanas: o exemplo da Ecoducha solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 116. 2012.

MAKRIDES, G.; ZINSSER, B.; NORTON, M.; GEORGHIOU, G. E.; SCHUBERT, M.; WERNER, J. H. Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** [S.l.], v. 14, n. 2, p. 754-762, 2010.

MARSH, G. BIPV: innovation puts spotlight on solar. **Renewable Energy Focus** [S.l.], v. 9, n. 3, p. 62-67, 2008.

MASCARÓ, L. E. R. **Luz, Clima e Arquitetura**. Ed. São Paulo, Nobel, 189 p., 1983.

MASCARÓ, L.; MASCARÓ, J. **Vegetação Urbana**. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 2002.

MIKHAILOVA, I. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas da mensuração prática. **Economia e Desenvolvimento**, [S. l.], n. 16, 2004. DOI: 10.5902/141465093442. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/eed/article/view/3442>. Acesso em: 21 set. 2023.

MIRANDA, Stella. Energia solar no Brasil: o que diz a legislação e qual a sua importância?. **Canal Solar**, [S. l.], p. 0-9, 22 abr. 2022. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil-o-que-diz-a-legislacao-e-qual-a-sua-importancia/>. Acesso em: 9 set. 2023.

NEVES, Guilherme Marques. N414i **Influência do espectro da radiação solar em módulos fotovoltaicos** / Guilherme Marques Neves. – São José dos Campos : INPE, 2016. xl + 198 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/05.05.20.52-TDI) Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Orientadores : Drs. Waldeir Amaral Vilela, e Enio Bueno Pereira.

NOVAIS, Millena Pina de. ASSUNÇÃO, Raiane Oliveira. NASCIMENTO, Rudgero Oliveira do. Viabilidade de aplicação e reaproveitamento de energia solar conectada à rede elétrica para uma residência unifamiliar. **Revista Científica Multidisciplinar**

**Núcleo do Conhecimento.** Ano. 06, Ed. 12, Vol. 03, pp. 185-205. Dezembro de 2021. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/viabilidade-de-aplicacao>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/viabilidade-de-aplicacao

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.** Tradução Josefina Frontado e Luis Clavet. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

PAIVA, Dárian Eskarlet Rodrigues de Souza; OLIVEIRA, Francisco Quirino de; MARTINS, Lorena Rodrigues. **Projeto de Sistema Solar Fotovoltaico na zona rural de Apodi - RN.** Orientador: Kayo Rodrigo Santiago da Silva. 2023. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Potiguar, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/36124>. Acesso em: 6 set. 2023.

PAZ, Pedro. **Quanto maior o calor, menor é a produção de energia solar.** [S. l.]: Marco Zero Conteúdo, 19 jul. 2022. Disponível em: <https://marcozero.org/quanto-maior-o-calor-menor-e-a-producao-de-energia-solar/>. Acesso em: 20 set. 2023.

PEDROSO, R. N. S. .; SANTOS, L. R. dos .; PIRES, R. C. S. . Um Futuro Problema Com o Descarte de Painéis Solares. **Epitaya E-books**, [S. l.], v. 1, n. 32, p. 204-213, 2023. DOI: 10.47879/ed.ep.2023724p204. Disponível em: <https://portal.epitaya.com.br/index.php/ebooks/article/view/732>. Acesso em: 10 set. 2023.

PETERS JUNIOR, Guilherme. **Eficiência do painel solar: O que é e como calcular?**. [S. l.]: Solar Inove, 2023. Disponível em: <https://blog.solarinove.com.br/eficiencia-do-painel-solar/#:~:text=geogr%C3%A1fica%20e%20clima,-,Temperatura,ao%20receber%20a%20radia%C3%A7%C3%A3o%20solar>. Acesso em: 20 set. 2023.

PIETROBON, C. E. **Luz e calor no ambiente construído escolar e o sombreamento arbóreo: conflito ou compromisso com a conservação de energia?**. Tese (Doutorado) – UFSC, Florianópolis, 1999.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2014.

PORTAL SOLAR. **Energia solar fotovoltaica atinge 1 gigawatt em geração distribuída no Brasil.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-fotovoltaica-atinge-1-gigawatt-em-geracao-distribuida-no-brasil.html>. Acesso em: 29 jul. 2023.

PORTAL SOLAR. **Painel solar: preços e custos de instalação.** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/painel-solar-precos-custos-de-instalacao.html>. Acesso em: 19 set. 2023.

REIS, A. K. C. dos; FIGUEIRA, A. A.; SILVA, M. R. A.; REIS, O. A. de O. Energia fotovoltaica: historicidade e legislação pertinente/ Photovoltaic energy: historicity and pertinent legislation. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 65012–65032, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n6-736. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/32186>. Acesso em: 31 aug. 2023.

ROSA, G. R.; GONÇALVES, I.A. Estudo de Viabilidade Econômico-Financeira da Implantação de um Sistema Fotovoltaico conectado à rede convencional de energia: Estudo de Caso no Centro Administrativo de uma Prefeitura Municipal Em SC. **X CONGRESSO DE ADMINISTRAÇÃO, SOCIEDADE E INOVAÇÃO.** 2017, Petrópolis/RJ.

RÜTHER, Ricardo Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil / Ricardo Rütther. – Florianópolis: **LABSOLAR**, 2004. 114 p. : il. Inclui bibliografia ISBN 85-87583-04-2.

RÜTHER, R.; KNOB, P. J.; DA SILVA JARDIM, C.; REBECHI, S.H. Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in Brazil. **Energy Conversion and Management** [S.l.], v. 49, n. 5, p. 1074-1079, 2008.

RÜTHER, R.; JR., J. U.; VIANA, T.; NASCIMENTO, L. R.; PFITSCHER, P. Performance assessment of a microcrystalline Si PV installation in a warm climate. In: 35th IEEE **Conference, Honolulu** - HI, EUA. 2010.

RÜTHER, Ricardo. **Arquitetura orientada com uso de tecnologias fotovoltaicas.** [S. l.]: Portal Solar, 15 jul. 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/opiniao/opiniao-tecnologia/arquitetura-orientada-com-uso-de-tecnologias-fotovoltaicas>. Acesso em: 15 ago. 2023.

SABBAG, H. Y. Patrimônio Moderno. **Revista Arquitetura e Urbanismo**, n.135, p. 68-71, 2005.

SALAMONI, I. T. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte.** (2004). (Mestrado) - PPGECC, UFSC, Florianópolis, 2004.

SANDBERG, M.; MOSHFEGHBA, B. Buoyancy-induced air-flow in photovoltaic facades Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules. **Building and Environment**. v. 37. p. 211. 2001. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-800e2ead-4486-3b1f-975b-cc6ca4c7fac3>. Acesso em: 08 ago. 2023.

SANTOS, I. P. D. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista**. (2009). (Mestrado) - PPGEC, UFSC, Florianópolis, 2009.

SANTOS, Ísis Portolan dos. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura** / Isis Portolan dos Santos ; orientador, Ricardo Rüter - Florianópolis, SC, 2013. 278 p.

SANTOS, Fabricio Almeida; SOUZA, Carlos Alberto de; DALFIOR, Vanda Aparecida Oliveira. ENERGIA SOLAR: um estudo sobre a viabilidade econômica de instalação do sistema fotovoltaico em uma residência em Ipatinga-MG. **XIII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA**. 2016, Resende/RJ. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/862456.pdf>. Acesso em: 10/08/2023.

SANTOS GUIMARÃES, S.; FRANCISCO MINARI JUNIOR, C.; FLORIAN, F. ANÁLISE DO CUSTO/BENEFÍCIO DA IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO EM UMA RESIDÊNCIA NO MUNICÍPIO DE JABOTICABAL-SP. RECIMA21 - **Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218, [S. l.], v. 3, n. 11, p. e3112174, 2022. DOI: 10.47820/recima21.v3i11.2174. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/2174>. Acesso em: 10 set. 2023.

SCHILLER, S.; SILVA, V.G.; GOIJBERG, N.; TREVINO, C, U. Edificacion TREVIÑO, Sustentable: consideraciones para la calificacion del habitat construido en el contexto regional latinoamericano. **Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente**, v.7, n.1, p. 13-18, Impreso en la Argentina, 2003.

SILVA, LUZILENE SOUZA *et al.* Avaliação de custo benefício da utilização de energia fotovoltaica. **Revista de Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 5, n. 9, p. 1-12, 31 dez. 2019. DOI <https://doi.org/10.18227/rct.v5i9.5405>. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rct/article/view/5405>. Acesso em: 9 set. 2023.

SILVA, M. R.,; ARAÚJO, R. E. 2017. Aspectos de segurança em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. In **VIII CBPDP** - Congresso Brasileiro de P&D em Telecomunicações e Processamento de Sinais (pp. 1-6).

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A.. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/ power correlations. **Solar Energy**. v. 83, p. 614–624 .2009. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X08002788>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

SORIA, Rafael; SCHAEFFER, Roberto; SZKLO, Alexandre. CONFIGURAÇÕES PARA OPERAÇÃO DE PLANTAS HELIOTÉRMICAS CSP COM ARMAZENAMENTO DE CALOR E HIBRIDIZAÇÃO NO BRASIL. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 1-10, 1 jul. 2014.

**SUSTENTABILIDADE: Da teoria à prática.** [S. l.], 2023. Disponível em: [https://www.wwf.org.br/participe/porque\\_participar/sustentabilidade/#::~:~:text=%C3%89%20o%20desenvolvimento%20que%20n%C3%A3o,econ%C3%B4mico%20e%20a%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20ambiental](https://www.wwf.org.br/participe/porque_participar/sustentabilidade/#::~:~:text=%C3%89%20o%20desenvolvimento%20que%20n%C3%A3o,econ%C3%B4mico%20e%20a%20conserva%C3%A7%C3%A3o%20ambiental). Acesso em: 22 set. 2023.

TAGLIANI, Simone. **Construções Verdes: 10 Casas Brasileiras que São Referência em Sustentabilidade.** [S. l.], 22 ago. 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/engenharia-biomedica-biomedicina-e-informatica/>. Acesso em: 23 ago. 2023.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y ; NOUSIA, M. SOULIOTIS, M.; P. YIANOULIS, P. Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Systems. **Solar Energy**. v. 72, n. 3, p. 217. 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X01000962>> Acesso em: 08 ago. 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Relatório Interno 02/1994. Florianópolis, 1994. 83 p.

URBANETZ, J.; ZOMER, C. D., RUTHER, R. Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. **Building and Environment**. v. 46, p. 2112. 2011.

VAN LENGEN, Johan. **Manual do arquiteto descalço.** São Paulo: B4, 2014.

VILLALVA, Marcelo. **Efeito da temperatura nos módulos fotovoltaicos mono e policristalinos.** [S. l.]: Canal Solar, 10 nov. 2019. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/efeito-da-temperatura-nos-modulos-fotovoltaicos-mono-e-policristalinos/>. Acesso em: 20 set. 2023.

VINTURINI, Mateus. Os módulos FV devem ser orientados sempre para o Norte?. **Canal Solar**, [S. l.], p. 1-24, 14 abr. 2020. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/os-modulos-fv-devem-ser-orientados-sempre-para-o-norte/#::~:~:text=De%20fato%20os%20m%C3%B3dulos%20produzem,sejam%20instalados%20com%20orienta%C3%A7%C3%A3o%20Sul>. Acesso em: 09 set. 2023.

VOKAS, Georgio , CHRISTANDONIS, Nikos; SKITTIDES, F.. Hybrid photovoltaic–thermal systems for domestic heating and cooling—A theoretical approach. **Solar Energy** v. 80 p. 607–615. 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/222550848\\_Hybrid\\_photovoltaicthermal\\_systems\\_for\\_domestic\\_heating\\_and\\_cooling-A\\_theoretical\\_approach](https://www.researchgate.net/publication/222550848_Hybrid_photovoltaicthermal_systems_for_domestic_heating_and_cooling-A_theoretical_approach). Acesso em: 08 ago. 2023.

YANG, Tingtin; ATHIENITIS, Andreas K. A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 66, pp. 886-912. 2016. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v66y2016icp886-912.html>> Acesso em: 08 ago. 2023.

ZOMER, Clarissa Debiazi. **Energia solar fotovoltaica integrada à arquitetura**. [S. l.]: Portal Solar, 2021. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/opiniao/opiniao-tecnologia/arquitetura-orientada-com-uso-de-tecnologias-fotovoltaicas>. Acesso em: 17 ago. 2023.

ZHENG, Huiying et al. Shading and by pass diode impacts to energy extraction of PV arrays under different converter configuration. **Renewable Energy**, Oxford, v. 68, p.58-66, ago. 2014.