

EDITORA



**UnB**

# **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**

**Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,  
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni  
(Organizadores)**



Pesquisa,  
Inovação  
& Ousadia



**Universidade de Brasília**

**Reitora**  
**Vice-Reitor**

Márcia Abrahão Moura  
Enrique Huelva

EDITORA



**UnB**

**Diretora**

Germana Henriques Pereira

**Conselho editorial**

Germana Henriques Pereira (Presidente)  
Fernando César Lima Leite  
Beatriz Vargas Ramos Gonçalves de Rezende  
Carlos José Souza de Alvarenga  
Estevão Chaves de Rezende Martins  
Flávia Millena Biroli Tokarski  
Jorge Madeira Nogueira  
Maria Lidia Bueno Fernandes  
Rafael Sanzio Araújo dos Anjos  
Sely Maria de Souza Costa  
Verônica Moreira Amado

EDITORA



**UnB**

# **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**

Caio Frederico e Silva, Gustavo de Luna Sales,  
Joára Cronemberger e Vanda Alice Garcia Zanoni  
(Organizadores)



Pesquisa,  
Inovação  
& Ousadia

**Coordenadora de produção editorial**  
**Preparação e revisão**

**Equipe editorial**

Luciana Lins Camello Galvão  
Alexandre Vasconcellos de Melo

© 2018 Editora Universidade de Brasília

Direitos exclusivos para esta edição:  
Editora Universidade de Brasília  
SCS, quadra 2, bloco C, nº 78, edifício OK,  
2º andar, CEP 70302-907, Brasília, DF  
Telefone: (61) 3035-4200  
Site: [www.editora.unb.br](http://www.editora.unb.br)  
E-mail: [contatoeditora@unb.br](mailto:contatoeditora@unb.br)

Todos os direitos reservados. Nenhuma parte desta publicação poderá ser armazenada ou reproduzida por qualquer meio sem a autorização por escrito da Editora.

Esta obra foi publicada com recursos provenientes do Edital DPI/DPG nº 2/2017.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília

---

S614            Simulação, ambiente e energia no espaço construído /  
                         organizadores, Caio Frederico e Silva ... [et al.]. – Brasília :  
                         Editora Universidade de Brasília, 2020.  
                         284 p. ; 23 cm. – (Pesquisa, inovação & ousadia).

ISBN 978-65-5846-043-5

1. Simulação computacional. 2. Desempenho energético. 3.  
Sustentabilidade. I. Silva, Caio Frederico e (org.). II. Série.

CDU 72

---

# Sumário

<b>Prefácio</b> .....	7
<i>Otto Ribas</i>	
<b>Apresentação</b> .....	9
<b>Parte 1: Inputs – conforto, vento e luz</b>	
<b>Capítulo 1.</b> Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met .....	17
<i>Caio Frederico e Silva e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
<b>Capítulo 2.</b> Caracterização de dados e arquivos climáticos de Brasília para simulação higrotérmica.....	55
<i>Vanda Alice Garcia Zanoni e José Manoel Morales Sánchez</i>	
<b>Capítulo 3.</b> Ferramentas para a simulação de ventilação natural na Arquitetura .....	99
<i>Gustavo de Luna Sales e Marta Adriana Bustos Romero</i>	
<b>Capítulo 4.</b> Qualidade da luz natural e ferramentas para o projeto arquitetônico .....	127
<i>Júlia Teixeira Fernandes e Cláudia Naves David Amorim</i>	

## **Parte 2: Outputs – ambiente construído e energia**

**Capítulo 5.** Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil ..... 173

*Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín*

**Capítulo 6.** Análise do balanço energético de casa pré-fabricada ZEB em Brasília ..... 215

*Larissa Sudbrack e Cláudia Naves David Amorim*

**Capítulo 7.** Considerações sobre uma pauta para governança da eficiência energética ..... 259

*Tássia Fonseca Latorraca, Raquel Naves Blumenschein e  
Maria Vitória Duarte Ferrari*



## **Parte 2**

*Outputs* – ambiente  
construído e energia



## CAPÍTULO 5

# Irradiação solar: ferramenta de análise para o uso de energia solar fotovoltaica em edifícios no Brasil

Joára Cronemberger e Estefanía Caamaño-Martín

### 1. Introduzindo o conceito de edifícios solares fotovoltaicos

Entre as preocupações atuais mais importantes da humanidade estão as consequências da geração de energia no meio ambiente natural e a escassez de combustíveis fósseis. Essa consciência está referendada por acordos internacionais e legislações que preconizam a diminuição no consumo de energias sujas e sua substituição por outras mais limpas e renováveis, bem como a melhora da eficiência energética. Nesse sentido, os setores da arquitetura e da construção têm trabalhado para proporcionar à sociedade sua contribuição para solucionar tais problemas.

Discutem-se e renovam-se em diferentes âmbitos os conceitos do *bioclimatismo*, *edifícios verdes*, *ecológicos*, *construção sustentável*, *ecoeficiência* e *eficiência energética*. Universidades, centros de pesquisa, arquitetos, urbanistas, engenheiros, indústrias e agentes envolvidos nesses setores colaboram para obter as melhores soluções tecnológicas que permitam a utilização eficiente dos recursos energéticos na construção e operação dos edifícios – um alto nível de conforto ambiental interno e redução da

dependência dos recursos naturais. O esforço está justificado: os edifícios dos setores comercial e industrial consumiram, em 2005, quase 40% de toda a energia elétrica produzida no mundo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012). Esse panorama favoreceu enormemente o desenvolvimento dos sistemas de captação de energia solar ativa para edificações – a utilização de módulos térmicos ou fotovoltaicos que captam e utilizam a energia solar para seu aproveitamento como energia térmica ou elétrica.

A integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios é uma estratégia ativa de aproveitamento da radiação solar alinhada com os critérios de sustentabilidade e com a política de utilização de energias renováveis que vem sendo adotada internacionalmente em busca de uma maior eficiência energética (HESTNES, 1999; SCOGNAMIGLIO; RØSTVIK, 2012). No Brasil, assim como em outros países localizados em latitudes baixas, caracterizados pela alta disponibilidade e uniformidade da irradiação solar, a utilização de energia solar fotovoltaica (FV) é incipiente. Tradicionalmente, a energia solar FV foi usada no Brasil para atender às necessidades de comunidades localizadas em zonas isoladas, não atendidas pela rede elétrica de distribuição. Entretanto, vários estudos (MARTINS *et al.*, 2008; BRAUN; RÜTHER, 2010) já identificaram a utilização de sistemas FV integrados em edifícios conectados à rede elétrica como o maior potencial de utilização desse recurso natural.

Ultimamente, nota-se uma mudança nesse cenário, fruto da recente normativa vigente no país que estabeleceu um avançado sistema de compensação de energia elétrica, regulando as condições de acesso de geração distribuída às redes elétricas, bem como da política de eficiência energética e desempenho das edificações.

As edificações são reconhecidas como o segmento de mercado com o maior potencial de crescimento na indústria FV (SOLARPOWER EUROPE, 2014). Além da eficiência crescente de conversão energética, foram notáveis, nos últimos 10 anos, o aperfeiçoamento técnico e estético dos módulos, o aumento da confiabilidade técnica e a drástica redução dos custos de instalação dos sistemas. Uma das atrativas fontes energéticas é a energia solar FV, dado que o país é caracterizado por altos níveis de irradiação solar (BRAUN; RÜTHER, 2010;

BUENO PEREIRA *et al.*, 2017) e possuidor de grandes reservas das matérias-primas minerais necessárias na fabricação de componentes FV.

Deve-se ressaltar que o Brasil conta com o maior número de centros de pesquisa solar na América Latina, como, por exemplo, o LABREN,<sup>1</sup> responsável pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar (BUENO PEREIRA *et al.*, 2017), e o FOTOVOLTAICA-UFSC,<sup>2</sup> pioneiro e impulsor de importantes projetos de energia FV no país e também da normativa que regula a injeção de energia distribuída na rede pública. Em conjunto com o LSF/IEE/USP,<sup>3</sup> o LABEEE<sup>4</sup> e outras instituições da sociedade civil organizaram numerosos projetos demonstradores, como aeroportos (RÜTHER; BRAUN, 2009) e instalações desportivas (SANTOS *et al.*, 2010), colaborando para criar um ambiente francamente favorável ao desenvolvimento e aceitação de edifícios solares FV.

O método introduzido neste capítulo foi desenvolvido para facilitar a identificação de potenciais superfícies de envoltória arquitetônica adequadas para a integração de sistemas solares FV, especificamente de edifícios localizados em latitudes mais baixas, como o Brasil. Pretende-se evitar que se utilizem erroneamente as recomendações mais comuns na literatura sobre BIPV (*building integrated photovoltaics*), normalmente baseadas na climatologia de países na América do Norte e na Europa, onde essa tecnologia está em franca utilização.

## 2. Envoltórias multifuncionais: produzindo calor e eletricidade

O conceito de *fachadas multifuncionais* é relativamente novo, e é utilizado para descrever uma envolvente – fachada ou cobertura – que desempenhe uma ou mais tarefas energéticas (HERAS CELEMÍN, 2002). As fachadas multifuncionais incorporam sistemas solares ativos que produzem calor e/ou eletricidade. O aproveitamento

<sup>1</sup> Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LABREN/INPE).

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina.

<sup>3</sup> Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

<sup>4</sup> Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina.

das envolventes realizado com esse objetivo tem grande protagonismo na busca de soluções de eficiência energética, como os edifícios de consumo energético zero (DIDONÉ; WAGNER; RUTTKAY-PEREIRA, 2014). Por meio do aproveitamento do sol, seja direta ou indiretamente, as consequências sobre forma e sistemas construtivos do edifício demandam a atenção de diversas disciplinas da arquitetura e das engenharias, já que é nas envoltórias dos edifícios que se produzem os principais intercâmbios térmicos com o meio ambiente externo, determinante no balanço energético final de um edifício (HAUSLADEN; DE SALDANHA; LIEDL, 2008).

O aproveitamento direto ou passivo de irradiação solar corresponde ao conjunto de medidas construtivas destinadas a coletar, armazenar e distribuir a irradiação solar recebida no edifício, sem aparatos técnicos, preceitos básicos da arquitetura bioclimática (HERAS CELEMÍN, 2002). Ao aproveitamento indireto ou ativo correspondem as medidas técnicas adicionais necessárias à coleta, armazenagem e distribuição da energia solar, ou seja, com a utilização de coletores, bombas térmicas para aquecimento e/ou esfriamento, energia solar FV e eólica para a geração de eletricidade (Quadro 1). O aproveitamento indireto está condicionado à quantidade de irradiação solar que recebem os edifícios e às variações estacionais, mas também são fundamentais para seu funcionamento efetivo a orientação, inclinação e a ausência de sombras nas superfícies expostas.

**Quadro 1:** Esquema de aproveitamento indireto de irradiação solar

Água Quente / Aquecimento	Refrigeração	Geração de corrente elétrica
Coletores	Bombas de absorção térmica	Sistemas fotovoltaicos
Bombas térmicas	Sistemas de armazenamento termoquímico	Aerogeradores
Sistemas de armazenamento	Cisternas de águas pluviais	Espelhos parabólicos + motor Sterling

Fonte: Elaboração dos autores, baseado em Heras Celemin (2002).

Para gerar eletricidade de forma indireta utilizando a energia do sol, é necessário utilizar células fotoelétricas agrupadas em módulos FV. Nessa modalidade, exige-se a otimização de um grande número de variáveis que determinam não apenas o desempenho energético do edifício, mas também o relacionamento com o usuário e seu meio ambiente. A complexidade reside no fato de que esses componentes geradores, os módulos FV, devem harmonizar os requisitos construtivos da envoltória com as necessidades do sistema de instalações elétricas. Além disso, elas têm forte impacto na aparência final da edificação e do seu entorno, e, portanto, na sua aceitação pela sociedade, fator decisivo para a efetiva adoção dessa tecnologia e, em princípio, excelente solução energética.

### 3. Definições de edifícios solares: BIPV E BAPV

Vários autores (HESTNES, 1999; REIJENGA, 2003; MARTÍN CHIVELET; SOLLA, 2007; ROBERTS; GUARIENTO, 2009; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2012) e normas (CENELEC, 2014) propuseram classificações e nomenclaturas para sistemas FV quando instalados em edifícios com abordagens mais ou menos similares. As definições com mais aceitação internacional baseiam-se na distinção de até que ponto a instalação FV faz parte da envoltória arquitetônica do edifício (Figura 1):

- BAPV:<sup>5</sup> os módulos FV são usados apenas para gerar energia, não desempenhando funções de materiais de construção. Eles são fixados à cobertura ou à fachada por uma estrutura exclusiva;
- BIPV:<sup>6</sup> os módulos FV desempenham simultaneamente as funções de gerador de energia elétrica e de material de construção, cumprindo com um ou mais de seus requisitos. São projetados e fabricados especificamente para integrar as envoltórias arquitetônicas.

---

<sup>5</sup> Do inglês “*Building Added/Adopted/Attached Photovoltaics*”.

<sup>6</sup> Do inglês “*Building Integrated Photovoltaics*”.

**Figura 1:** Protótipo no concurso Solar Decathlon Europe 2012: cobertura/BAPV, fachada /BIPV



Fonte: Solar Decathlon Europe (SDE).

As funções desempenhadas por componentes BIPV estão relacionadas à barreira física necessária entre o meio ambiente externo e o usuário para regular a ventilação, a iluminação natural, a proteção contra umidade, temperatura e ruído, ou seja, a questão relevante é se o componente FV compatibiliza os requisitos elétricos com os de um material de construção convencional.

É difícil dizer qual das duas soluções é mais utilizada, BIPV ou BAPV. Um estudo dos protótipos apresentados ao concurso Solar Decathlon Europe<sup>7</sup> 2010 e 2012 na Espanha indicou que os sistemas BAPV predominaram sobre os BIPV (CRONEMBERGER *et al.*, 2014). A tendência foi usar componentes FV como parte integrante da estratégia energética dos protótipos de casas, como o controle de iluminação natural e sombreamento.

<sup>7</sup> Disponível em: <http://solardecathlon.eu>.

Qualquer que seja o enfoque da integração, os mecanismos para operação e manutenção dos sistemas precisam ser pensados ainda na fase inicial do projeto. Em geral, costuma-se confiar na água da chuva para manter os módulos fotovoltaicos integrados em fachadas limpos. No entanto, é aconselhável instalar mecanismos que possam facilitar a limpeza, manutenção e substituição de módulos, especialmente se a zona estiver localizada em áreas mais poluídas ou áridas, onde a periodicidade deve ser maior. A manutenção e as substituições em geral são realizadas pelo exterior, em capas, fachadas ou outras aplicações. É recomendável desenvolver uma estratégia de manutenção que contemple a estocagem de uma porcentagem de módulos de reposição, a fim de evitar interrupções no fornecimento de energia.

## 5. Tecnologias de geração de energia solar FV

A produção de eletricidade utilizando a energia radiante do sol como combustível baseia-se no fenômeno físico denominado “efeito fotovoltaico”,<sup>8</sup> que consiste em converter a radiação em energia elétrica através de dispositivos semicondutores – as chamadas células FV –, que constituem a unidade básica de um sistema FV. Uma certa quantidade delas conectadas, encapsuladas e montadas sobre uma estrutura construtiva conformam um módulo FV. A corrente elétrica gerada pelos módulos é contínua (CC) e deve ser convertida em corrente alternada (CA) pelos inversores antes de ser utilizada diretamente ou injetada na rede pública de distribuição.

O silício dopado é o semicondutor mais utilizado e comercializado atualmente em todo o mundo. Cerca de 92% das células fabricadas eram baseadas em tecnologia de silício no ano de 2015, mais da metade delas (56%) do tipo multicristalino (FRAUNHOFER, 2015). Trata-se de uma tecnologia já dominada, fiável e que proporciona rendimentos relativamente altos. As lâminas delgadas de silício amorfo (*thin film*) representam outra parcela significativa de células no mercado. Apesar de

<sup>8</sup> O termo “fotovoltaico” tem origem na palavra grega  $\phi\acute{o}\varsigma$ :phos, que significa “luz” e em “voltaico”, homenagem ao físico italiano Alessandro Volta (1745-1827).

apresentarem eficiências mais baixas, seu custo é mais reduzido, fator que, aliado ao fato de que elas são menos suscetíveis aos efeitos do aumento de temperatura, faz com que sejam especialmente interessantes para os edifícios solares FV.

**Quadro 2:** Tipos de células fotovoltaicas

Silício		Compostos	
Cristalino	Amorfo	Monocristalino	Policristalino
Monocristalino (m-Si)	Silício Amorfo (a-Si)	Arseneto de Gálio (GaAs)	Telureto de Cádmi (CdTe)
Policristalino (p-Si)	Silício microamorfo ( $\mu$ a-Si)		Disseleneto de Cobre e Índio (CIS)
Borda Definida (EFG)			Disseleneto de Cobre Índio e Gálio(CIGS)
			Células Orgânicas (OPV)

Fonte: Elaboração dos autores (2015), baseado em Luque e Hegedus (2003).

Além do silício, existem outros materiais e compostos capazes de funcionar como semicondutores (Quadro 2) que crescem em importância no mercado e nas pesquisas sobre o tema, com eficiências de conversão que já chegam a mais de 46% (NREL, 2017).<sup>9</sup>

## 6. Alternativas no design dos módulos FV

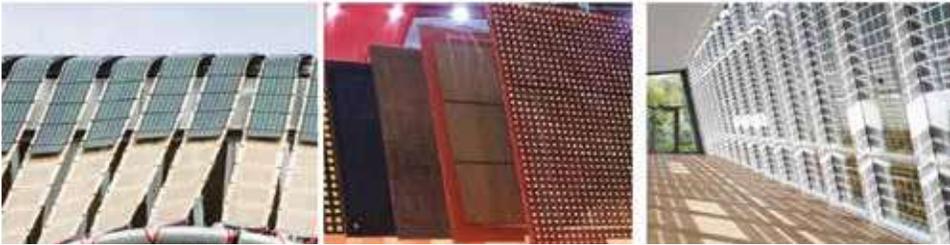
Uma grande variedade de módulos e produtos está disponível atualmente no mercado, especificamente projetados para ser usados como material de construção integrados ou aplicados (CERÓN; CAAMAÑO-MARTÍN; NEILA

<sup>9</sup> Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

GONZALEZ, 2013). Além disso, sempre é possível personalizá-los e é comum adotar soluções customizadas, as quais devem ser discutidas e avaliadas em detalhe, pois podem afetar a produção de energia elétrica, seus custos e prazos de produção. Existem diversas possibilidades para variar a aparência dos componentes (Figura 2):

- Formas e dimensões dos módulos: os convencionais de silício cristalino geralmente são retangulares, com dimensões aproximadas a 80 cm x 160 cm, porém também podem ser fabricados com outras formas e dimensões. Módulos com filme fino permitem maior flexibilidade de formatos, inclusive curvos.
- Formas e dimensões das células: variam de acordo com a tecnologia FV e seu método de fabricação. Células de silício multicristalino têm forma quadrada ou bordas arredondadas, com 10 cm a 15 cm de lado, resultado dos processos de fabricação e corte. As células de filme fino variam com o substrato usado.
- Estrutura construtiva dos módulos: a estrutura portante do módulo pode variar para ajustar-se à aplicação desejada. O suporte mais convencional (molduras de alumínio) pode originar a montagem em esquadrias de cortina de vidro ou fachadas de vidro duplo, ventiladas ou não. Podem ser encontrados módulos com formato de telhas planas e placas para fachadas montados em cerâmica e, ainda, em proteções solares.
- Cores das células: são determinadas pela espessura da camada antirreflexiva, a qual pode ser alterada para variar o padrão de azul a cinza em células de silício cristalino, o que implica, entretanto, diminuição de eficiência. Células de silício amorfo também podem sofrer variações nas cores de acordo com as camadas utilizadas no processo de dopagem.
- Transparência: diferentes efeitos podem ser alcançados variando-se a quantidade e o espaçamento entre as células nos módulos cristalinos, ou a espessura e o substrato nos módulos de película fina.

**Figura 2:** Exemplos de módulos FV variados

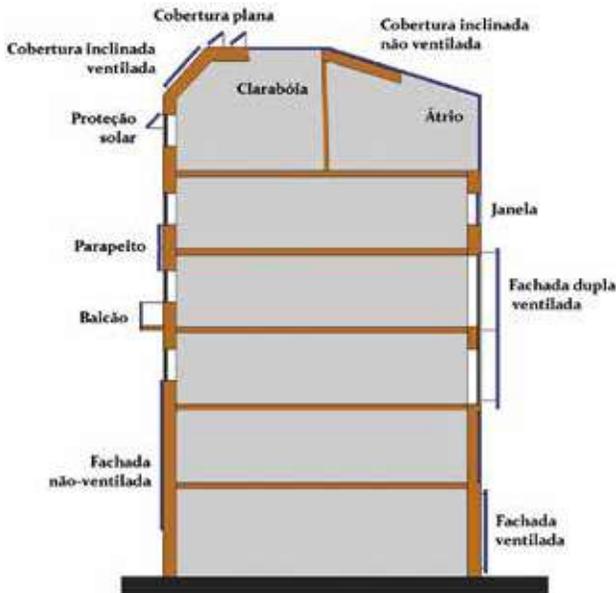


Fonte: Kennedy e Violich Arq., Extex Solar e HHS Planer + Architekten AG.

## 7. Superfícies potenciais de utilização

Os sistemas FV podem ser integrados nos edifícios de várias maneiras (Figura 3). As aplicações em coberturas inclinadas têm a vantagem de usar telhados como suporte estrutural; já os telhados planos frequentemente requerem uma estrutura exclusiva para conseguir a orientação e a inclinação adequadas para os módulos FV.

**Figura 3:** Possíveis tipologias de integração de sistemas FV em edifícios



Fonte: Cronemberger (2015, p. 47-49).

Devido à sua alta visibilidade, os sistemas integrados nas fachadas demandam um padrão de qualidade alto e são mais exigentes, tecnicamente, do que as instalações nas coberturas, haja vista a necessidade de ocultar o cabeamento e localizar os outros componentes do sistema. Outras tipologias são as aplicações para sombrear janelas, pérgulas, varandas e outros.

Qualquer que seja o tipo de integração escolhido para um edifício, especial atenção deve ser dada à manutenção, substituição e limpeza dos módulos e dos outros componentes do sistema FV. Assim, o acesso, os mecanismos de operação, limpeza e substituição devem ser cuidadosamente pensados desde os primeiros estágios do projeto.

## 7.1 Coberturas

Os telhados são as superfícies mais propícias para a integração de sistemas fotovoltaicos: desde que a orientação seja favorável, é o local onde as sombras podem ser melhor evitadas, e mais facilmente pode-se ventilar a face traseira dos módulos.

Há um grande número de componentes FV no mercado prontos para instalação em telhados, inclinados ou planos, que podem ser desde módulos de superposição convencionais fixados em trilhos metálicos até módulos com formato de telhas curvas. Para coberturas de grandes vãos, existem soluções de células de silício amorfo ou CIS coladas diretamente sobre telhas metálicas. Graças à flexibilidade do material amorfo, essa também é uma opção muito adequada para coberturas curvas. As tecnologias de película fina (*thin film*) têm a vantagem de não estarem sujeitas a perdas de eficiência, devido ao aquecimento da face posterior dos módulos, e são integradas ao componente construtivo já no seu processo de fabricação. Outra tipologia adequada para telhados planos são os sistemas integrados nas membranas flexíveis de PVC (policloreto de vinila) ou EVA (copolímero de etileno e acetato de vinila), que são membranas impermeabilizantes; algumas, até mesmo, com isolamento incorporado. Esses sistemas também usam películas finas de silício amorfo, o que lhes dá a flexibilidade necessária.

Ao integrar sistemas FV em telhados inclinados, a ventilação da face posterior dos módulos deve ser sempre favorecida para evitar perda de eficiência na produção de energia elétrica. Deve-se prover aberturas nas extremidades superior e inferior das superfícies com módulos integrados, o que ajuda a evitar também a condensação e a transmissão de calor para o interior da edificação, pelo risco de provocar superaquecimento. Já a integração de sistemas FV em coberturas planas geralmente é independente do edifício existente. Embora com menor grau de integração, proporcionam soluções mais econômicas, por utilizarem módulos e fixações padronizados. Esse tipo de montagem em edifícios existentes tem a vantagem de manter a face traseira do módulo ventilado sem grandes custos ou esforços técnicos.

A integração dos sistemas FV em claraboias e átrios proporciona superfícies de geração de energia transparentes. O jogo de transparência e sombras é obtido ajustando-se a distância entre as células, o que gera alto impacto na linguagem arquitetônica do espaço, uma vez que as células são visíveis. A maneira usual, para tanto, é integrar os módulos no suporte da superfície envidraçada, substituindo a face exterior dos vidros duplos por vidros laminados temperados ou termoendurecidos. Como em qualquer átrio envidraçado, deve-se observar os aspectos de estanqueidade, segurança física e estrutural, manutenção e substituição de módulos. A isso soma-se o cuidado extra quanto à localização das caixas de conexão, cabeamentos e demais componentes do sistema FV.

### 7.2 Fachadas

O uso de sistemas FV integrados em fachadas pode ser feito de numerosas maneiras. Embora as fachadas geralmente ocupem muita superfície, seu uso para gerar energia depende de sua orientação e das sombras, às quais são mais propensas do que as coberturas. As fachadas podem ser montadas para ser ventiladas ou não, e essas características devem ser consideradas na escolha do tipo de tecnologia de conversão FV a ser integrada.

A integração em *fachadas ventiladas* é feita substituindo-se a camada exterior por módulos FV, que podem ser de vidro transparente ou translúcido, bem como de outros substratos opacos, como alumínio, cerâmica ou plástico. O sistema de fixação é o mesmo da tecnologia já desenvolvida para fachadas ventiladas convencionais. Também é possível fazer painéis modulares de fachadas, totalmente montados em fábrica e com o cabeamento integrado, o que economiza tempo na obra e permite maior controle de qualidade da execução. Do ponto de vista da instalação FV é importante favorecer a drenagem das águas de chuva para evitar possíveis danos à fiação. Algumas vantagens desse tipo de integração são a facilidade de montagem dos outros componentes do sistema, tais como caixas de conexão e cabeamento, assim como a maior facilidade de adaptar-se às medidas comerciais dos módulos, tornando-se uma escolha mais econômica.

A instalação em *cortinas de vidro* pode ser aplicada em fachadas verticais ou inclinadas, curvas ou não, por meio do sistema tradicional montado diretamente em obra ou do sistema modular pré-fabricado, o qual tem como vantagem a instalação da fiação e das conexões elétricas sob condições controladas. Para essa instalação, admitem-se também soluções mistas, com módulos transparentes e opacos. A integração em fachadas tipo cortinas de vidro é feita substituindo-se o vidro exterior por módulos FV, sendo uma de suas vantagens o fato de que os módulos FV, absorvendo uma parte significativa da irradiação, reduzem o Fator Solar do conjunto, melhorando potencialmente o desempenho energético do edifício. As fachadas inclinadas, quando bem orientadas, são particularmente adequadas para aplicações BIPV, pois otimizam as superfícies disponíveis e maximizam o potencial de produção de energia elétrica.

As *janelas* são outra possível superfície de integração, tanto nas partes fixas quanto nas partes móveis. A utilização de módulos com algum grau de transparência é adequada para que se continue permitindo a visão direta do exterior. Nesses casos, deve-se observar o tipo de uso dos ambientes internos, já que as células obstruem a radiação direta e afetam a iluminação natural.

A integração de elementos FV na forma de *proteções solares* combina perfeitamente duas oportunidades: evita que parte da irradiação incida sobre uma superfície envidraçada, controlando as condições de conforto interior, e a aproveita para a produção de eletricidade. Em edifícios de escritórios em áreas com alta disponibilidade de irradiação solar e climas menos exigentes do ponto de vista de aquecimento, essa aplicação é particularmente vantajosa, uma vez que é possível aproveitar a irradiação mais tempo durante o ano e a simultaneidade entre a energia produzida e sua funcionalidade como elemento de sombreamento (CRONEMBERGER, 2016).

Entretanto, nesse tipo de uso a análise das sombras torna-se mais complexa, já que, além das possíveis sombras provocadas por objetos contíguos ao edifício, o ideal é evitar o autossombreamento, de modo que a produção de energia FV seja favorecida. Dependendo da latitude e orientação, a geometria de um sombreamento pode ser muito eficaz ao sombrear a superfície envidraçada, embora possa produzir sombras que impeçam a integração de módulos FV nas fachadas.

A identificação correta das sombras permite ajustar a instalação dos *strings* para que um *array* possa gerar energia, mesmo com algum módulo parcialmente obstruído, e evitar os chamados *hotspots*, tão prejudiciais para as instalações e até mesmo perigosos para a segurança de um sistema. Conhecer-las possibilita também opções de projeto no sistema FV e na arquitetura. No primeiro caso, permite escolher inversores ou microinversores mais adequados, e/ou utilizar tecnologias de células solares mais sensíveis a radiações difusas, como as a-Si, CIS e CIGS. Quanto ao projeto de arquitetura, permite antever a necessidade de incluir módulos “cegos” no *array* na superfície desejada, mesmo que desconectada.

## 8. Princípios básicos de projeto

O projeto de um edifício solar FV é um processo multidisciplinar que deve obedecer a vários critérios e parâmetros. Deve começar nas fases iniciais, quando a influência dos agentes interessados pode ser maior, e os custos das mudanças de decisão são menores.

À luz das necessidades e demandas do cliente, que nem sempre é o usuário final, e conhecendo as características ambientais e físicas do local de implantação do edifício, as equipes de projeto e de construção devem harmonizar os aspectos arquitetônicos e construtivos com os regulamentos relevantes, os requisitos da concessionária de energia local e os materiais disponíveis no mercado (Figura 4). Dependendo das necessidades e da magnitude de um projeto, o processo pode ser sumamente complexo.

As necessidades do projeto do sistema FV, como a distribuição de fiação e dos outros componentes elétricos, deve ser compatível com os demais requisitos funcionais da envoltória – ventilação e iluminação natural, estanqueidade, estabilidade, proteção térmica, proteção contra os ventos, controle de irradiação solar, controle de ganhos térmicos, segurança física, isolamento acústico, poluição do ar, vistas exteriores, proteção contra incêndio e sua própria vida útil.

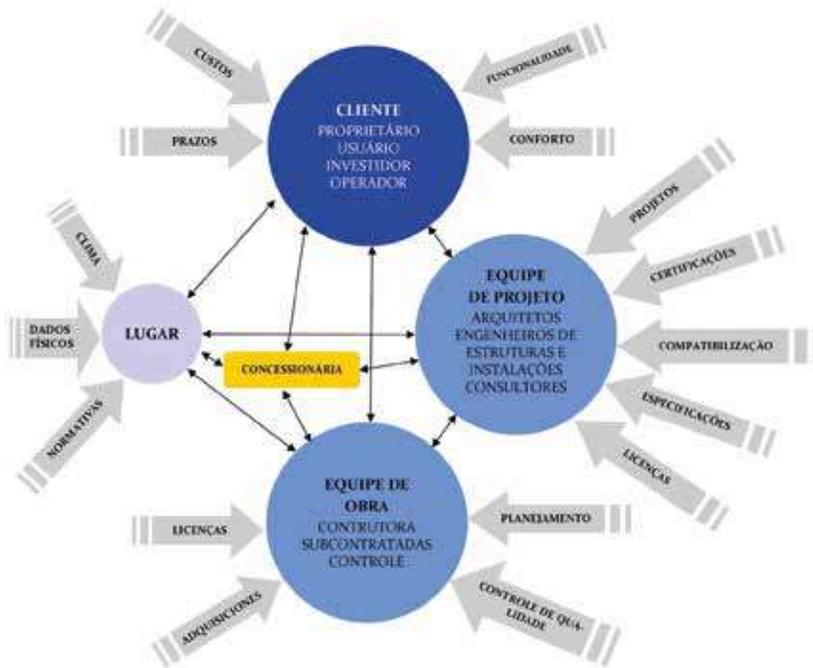
Além disso, no caso de um componente multifuncional, um módulo FV que seja ao mesmo tempo material de construção deve atender a uma série de requisitos de certificação de acordo com as normativas locais.

Do ponto de vista do projeto do sistema BIPV, os aspectos mais críticos são semelhantes a uma instalação fotovoltaica padrão: trata-se de tanto quanto possível maximizar a irradiação recebida pelos módulos através da orientação e inclinação e evitar os fatores de perdas de rendimento. A quantidade de irradiação depende da latitude e do clima do lugar. As perdas de rendimento podem ocorrer por fatores como a presença de sombras, a temperatura dos módulos e do cabeamento, e até mesmo o nível de limpeza dos módulos. Essas condições básicas podem afetar o *design* de um edifício em vários aspectos, desde a orientação e *layout* no terreno, até mesmo a sua forma e sistema construtivo (MARTÍN CHIVELET; SOLLA, 2007).

Dado que a maior parte das tecnologias de geração FV perdem potência com o aumento da temperatura de operação, o fator temperatura deve ser cuidadosamente avaliado. Há estudos que reportam perdas de potência de cerca de 5% em sistemas integrados com tecnologia de silício cristalino (ROBERTS; GUARIENTO, 2009).

Para diminuir as perdas por temperatura, é fundamental prever no projeto a ventilação da superfície posterior dos módulos.

**Figura 4:** Atores e processos envolvidos em projetos BIPV



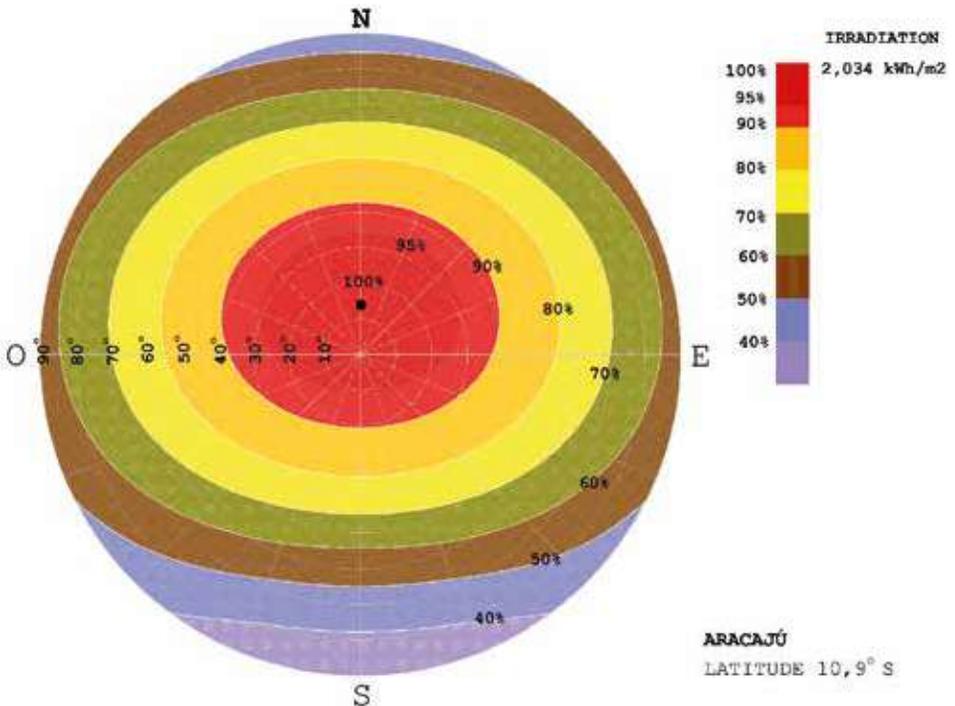
Fonte: Elaboração dos autores (2015).

Do ponto de vista do comportamento energético, é aconselhável que os edifícios objetos de integração FV sejam de baixo consumo, considerando a aplicação de onde várias estratégias de conservação de energia. Uma prioridade na concepção de um projeto de edifício solar FV é definir uma estratégia energética, que implica definir a proporção da demanda de energia que pode ser atendida com a energia gerada localmente. Os regulamentos para o acesso à rede pública de energia local, a existência de possíveis taxas de incentivo, a superfície disponível adequada para a integração e, finalmente, os custos serão decisivos. A simultaneidade da demanda com a geração de energia solar também deve ser verificada.

## 9. Orientação e inclinação dos módulos

A irradiação máxima recebida pelos módulos depende fundamentalmente da sua orientação e inclinação. Por exemplo, para uma cidade localizada a  $-10,9^\circ$  de Latitude (Aracajú/Brasil), a irradiação máxima será recebida por uma superfície orientada em direção ao Equador (Norte), inclinada a  $10^\circ$  em relação à superfície horizontal (Figura 5).

**Figura 5:** Aracajú: diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Devido à posição relativa do Sol nessa latitude, observa-se no diagrama que há uma grande variedade de combinações para outras faixas de orientação, quando inclinadas de  $0^\circ$  a  $50^\circ$ , com orientação que vão de Este a Oeste em sentido anti-horário.

A situação ideal na geração FV seria aquela em que os módulos não fossem sombreados em nenhum momento, o que pode ser um objetivo muito difícil em edifícios solares FV, tipicamente localizados em áreas urbanas. As sombras de edifícios contíguos afetam mais as fachadas do que os telhados, e podem ser mais facilmente resolvidas no caso de ambientes urbanos mais baixos e com menor densidade de ocupação. No entanto, em centros urbanos mais densos e edifícios mais altos, as sombras podem ocorrer por longos períodos de tempo, chegando a impossibilitar a integração de sistemas FV.

Outra fonte importante de sombras consiste naquelas geradas por massas de vegetação arbórea. No processo de projeto de novos edifícios solares FV, é preciso escolher cuidadosamente as novas espécies que serão plantadas nas proximidades do prédio e observar o crescimento daquelas já existentes. Uma maneira de minimizar o problema pode ser o uso de módulos com diodos de *bypass* e diodos de bloqueio, ou ainda, trabalhar com módulos equipados com microinversores individuais.

## 10. Potencial solar das envoltórias

Denomina-se *ângulo ótimo* o ângulo de inclinação de uma superfície fixa em relação à horizontal, que permite captar a maior quantidade de irradiação por ano. Há diferentes referências na literatura científica sobre o ângulo de inclinação ótima ( $\beta_{opt}$ ) de um campo gerador FV fixo. Uma vez orientada em direção ao Equador terrestre (Norte no hemisfério Sul e Sul no hemisfério Norte), a recomendação mais comum é inclinar a superfície com o mesmo ângulo de latitude local (GOPINATHAN, 1991; DUFFIE; BECKMAN, 2006; GUNERHAN; HEPBASLI, 2007; SANTOS; RÜTHER, 2014; PRASAD; SNOW, 2006). Recomenda-se também incliná-lo cerca de 8° em relação à latitude (LEWIS, 1987) ou, ainda, usar a equação  $\beta_{opt} = 3,7 + 0,69$  (LORENZO, 2003). Outras referências argumentam que a inclinação ótima corresponde a 10° menos que a latitude local (ESPANHA, 2015) e 20° abaixo da latitude local (ROBERTS; GUARIENTO, 2009).

Numerosos estudos foram realizados para determinar mais precisamente o impacto do ângulo de inclinação e do azimute sobre a produção de energia solar FV relacionada a diferentes latitudes e climas (MONDOL *et al.*, 2007; HUSSEIN *et al.*, 2004), alguns deles levando em conta variáveis como o preço da comercialização de energia (ROWLANDS *et al.*, 2011) ou as características sazonais da irradiação solar (CHRISTENSEN *et al.*, 2001), a maioria delas considerando localizações no hemisfério Norte.

No que diz respeito à proporção da quantidade de irradiação que pode ser aproveitada em sistemas integrados, costuma-se considerar ótimo aproveitar a partir de 90% da irradiação anual, e muito bom entre 80% e 90% (MONDOL; YOHANIS; NORTON, 2007) Na Alemanha, admite-se como aceitável o aproveitamento de 55% da irradiação disponível (CHENG; JIMENEZ; LEE, 2009). Isso significa, considerando-se que a irradiação anual nesse país varia entre 900 kWh/m<sup>2</sup> e 1.250 kWh/m<sup>2</sup>, cerca de 600 kWh/m<sup>2</sup> anuais. O Código Técnico de Construção (ESPANHA, 2015) estabelece que as perdas por orientação e inclinação não devem exceder 40%. Ou seja, presume-se que 60% da utilização é um limite mínimo aceitável. Considerando-se que a irradiação anual em Espanha varia entre 1.200 kWh/m<sup>2</sup> e 1.850 kWh/m<sup>2</sup>, os valores mínimos aceitáveis são da ordem de 720 kWh/m<sup>2</sup>.

## 11. Ângulo ótimo de uma superfície FV no Brasil

Identificou-se o ângulo ótimo de inclinação em 78 cidades brasileiras distribuídas desde a linha do Equador até a latitude - 31,3°, e estabeleceu-se uma relação com a latitude local. Para isso, inicialmente, calculou-se a irradiação anual disponível para uma superfície com orientação Norte e ângulo de inclinação igual à latitude local. Em uma segunda fase, repetiu-se o cálculo variando a inclinação da superfície em 1° em intervalos que permitiram verificar a variação da irradiação calculada para a inclinação igual à latitude.

**Tabela 1:** Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continua)

A	B	C	D	E
Cidade	$\phi$	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y	$\beta_{opt}$	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y
Bagé	-31.3	1797	31.3	1797
Porto Alegre	-30	1810	30	1810
Caxias do Sul	-29.1	1736	29.1	1736
Passo Fundo	-28.2	1870	28.2	1870
Florianópolis	-27.6	1721	30	1722
Blumenau	-26.9	1564	26.9	1564
São Francisco do Sul	-26.2	1637	26.2	1637
Foz de Iguaçu	-25.5	1841	27	1842
Curitiba	-25.3	1460	25.3	1460
Campo Mourão	-24	1880	27	1882
Santos	-23.9	1633	27	1634
São Paulo	-23.5	1559	26	1561
São José dos Campos	-23.2	1769	27	1772
Taubaté	-23	1768	25	1771
Rio de Janeiro	-22.9	1833	26	1835
Campinas	-22.8	1951	28	1957
Piracicaba	-22.7	1905	27	1910
Resende	-22.4	1773	26	1776
Volta Redonda	-22.4	1632	25	1634
Macaé	-22.3	1913	26	1917
Presidente Prudente	-22.1	1944	26	1948
São Carlos	-22	1899	26	1903
Juiz de Fora	-21.7	1644	25	1646
Cataguases	-21.3	1790	25	1793

**Tabela 1:** Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continuação)

A	B	C	D	E
Cidade	$\phi$	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y	$\beta_{opt}$	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y
Viçosa	-20.7	1861	25	1866
Campo Grande	-20.4	1928	25	1933
Vitória	-20.3	1902	25	1906
Belo Horizonte	-19.9	1699	25	1705
Uberaba	-19.7	2054	26	2064
Sete Lagoas	-19.4	2058	26	2069
Corumbá	-19	1970	23	1975
Patos de Minas	-18.6	1980	25	1991
Catalão	-18.1	1960	25	1972
Paracatu	-17.5	1920	24	1930
Goiânia	-16.6	1939	24	1953
Cáceres	-16	1822	22	1831
Brasília	-15.7	1907	24	1926
Cuiabá	-15.5	1944	21	1951
Vitória da Conquista	-14.8	1768	19	1773
Posse	-14.1	1911	22	1925
Correntina	-13.3	1962	20	1972
Salvador	-13	1956	13	1956
Lençóis	-12.5	1714	17	1718
Barreiras	-12.1	2022	19	2036
Morro do Chapéu	-11.5	1686	15	1689
Jacobina	-11.1	1803	15	1806
Aracajú	-10.9	2031	14	2034
Propriá	-10.2	1890	14	1891
Rio Branco	-9.9	1667	17	1676

**Tabela 1:** Irradiação máxima anual e ângulo ótimo

(continuação)

A	B	C	D	E
Cidade	$\phi$	$G_a(\beta = \phi, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y	$\beta_{opt}$	$G_a(\beta = \beta_{opt}, \alpha = 180^\circ)$ kWh/m <sup>2</sup> y
Maceió	-9.6	1980	12	1981
Petrolina	-9.3	1987	14	1992
Garanhuns	-8.8	1906	11	1907
Porto Velho	-8.7	1697	17	1710
Caruaru	-8.2	1871	10	1872
Recife	-8.05	2092	10	2093
Olinda	-8	2016	11	2019
Campina Grande	-7.2	1865	10	1866
Joao Pessoa	-7.1	2016	10	2018
Florianópolis	-6.7	1911	13	1919
Colinas	-5.9	1804	14	1820
Natal	-5.7	2071	9	2073
Imperatriz	-5.5	1802	14	1818
Crateús	-5.1	1981	11	1988
Teresina	-5	2015	12	2027
Guaramiranga	-4.2	1714	9	1720
Fernando de Noronha	-3.8	2019	8	2023
Fortaleza	-3.7	2030	8	2035
Manaus	-3.13	1797	9	1805
Parnaíba	-2.9	2073	8	2079
São Luiz	-2.5	1791	8	1798
Óbidos	-1.9	1875	8	1885
Belém	-1.4	1838	7	1847

Fonte: Elaboração dos autores (2012).

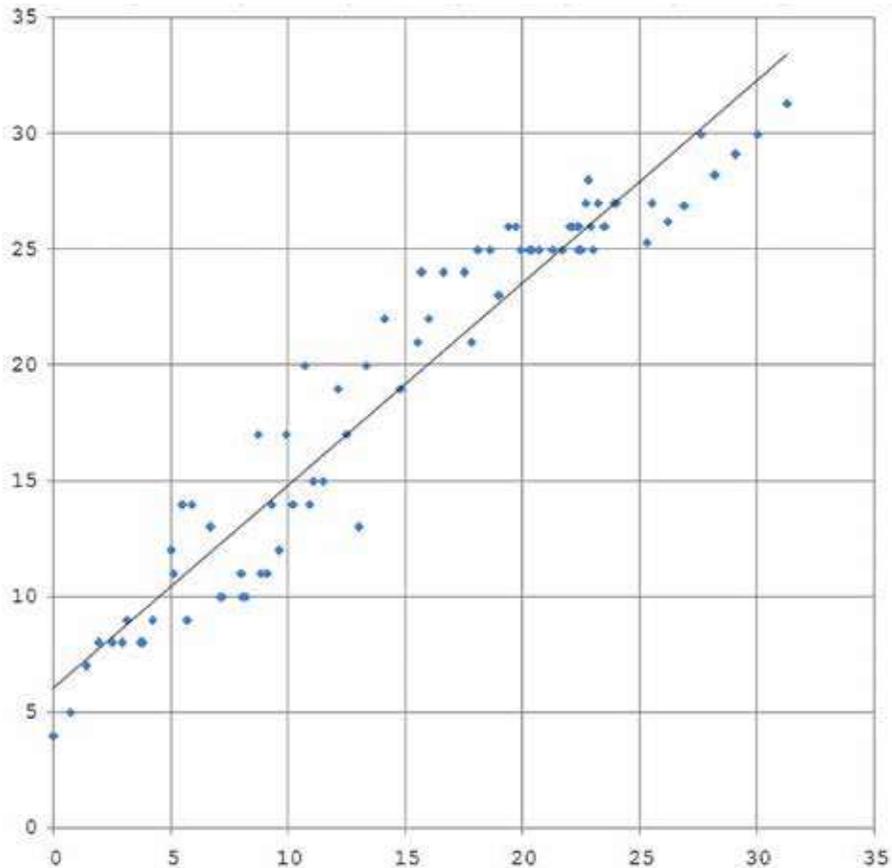
A estimativa da irradiação foi calculada com base nos dados de Irradiância Global Horizontal ( $G_{dm}$ ) médias mensais publicados pelo *World Radiation Data Center* (RUSSIA, 2012). Com base nesses dados, foi calculada a irradiação diária média em superfícies inclinadas arbitrariamente orientadas,  $G_{dm}(\beta, \alpha)$ , separando as componentes direta e difusa da irradiação (LIU; JORDAN, 1960). A metodologia e os cálculos detalhados podem ser encontrados em *Assessing the Solar Irradiation Potential for Solar Photovoltaic Applications in Buildings at Low Latitudes - Making the Case for Brazil* (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; VEGA SÁNCHEZ, 2012). A Tabela 1 mostra os resultados encontrados para a relação irradiação máxima anual versus ângulo ótimo em 78 cidades no Brasil. Nas colunas são detalhadas:

- Coluna A - Nome da cidade
- Coluna B - Latitude local ( $\phi$ )
- Coluna C - Irradiação incidente anual quando o ângulo de inclinação da superfície de recepção é igual à latitude local ( $\beta = \phi$ ) em kWh/m<sup>2</sup>
- Coluna D - ângulo ótimo nesta cidade ( $\beta_{opt}$ )
- Coluna E - irradiação incidente numa superfície fixa quando o ângulo de inclinação da superfície é igual ao ângulo ótimo ( $\beta_{opt}$ ) em kWh/m<sup>2</sup>.

Das 74 localidades examinadas, nenhuma apresentou valores para o ângulo ótimo abaixo do ângulo da latitude local; em apenas oito delas o valor é igual à latitude. Em 89% dos casos, o ângulo ideal de inclinação de uma superfície FV varia entre 1,5° a 9,3° acima do valor da latitude local. A modelagem desses dados em um gráfico em que os valores para latitudes se encontram no eixo das abscissas e dos ângulos ótimos, no eixo das ordenadas (Figura 6), permitiu deduzir uma relação matemática linear com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,93$  para calcular o ângulo ótimo em cidades brasileiras:

$$\beta_{opt} = 0,874 + 6,062 \phi \quad (\text{Equação 1})$$

**Figura 6:** Relação linear entre Inclinação ótima e Latitude



Fonte: Elaboração dos autores (2016).

Cabe ressaltar a tendência observada de que quanto maior a proximidade Equador terrestre, maior será o desvio do valor de  $\beta_{opt}$  acima da latitude local. Isso se deve ao fato de que, em cidades com baixas latitudes, embora as trajetórias solares indiquem que o ângulo ótimo coincida com a latitude, os modelos de radiação solar mostram que, devido às condições climáticas locais (disponibilidade de recursos solares, proporção da componente difusa, etc.), o máximo aproveitamento solar é proporcionado por inclinações ligeiramente superiores à latitude. É precisamente para locais de latitude superior a  $-25^\circ$  que essa tendência muda.

## 12. Diagramas de aproveitamento da irradiação solar

A seguir, apresentam-se diagramas demonstrativos do recurso solar disponível em superfícies em todas as orientações e inclinações para sete cidades brasileiras (Figura 7) localizadas a aproximadamente cada 5° de latitude - Belém ( $\Phi = - 1,4^\circ$ ), Teresina ( $\Phi = - 5^\circ$ ), Aracajú ( $\Phi = - 10,9^\circ$ ), Brasília ( $\Phi = - 15,7^\circ$ ), Belo Horizonte ( $\Phi = 19,9^\circ$ ), Curitiba ( $\Phi = 25,3^\circ$ ) e Porto Alegre ( $\Phi = - 30,0^\circ$ ).

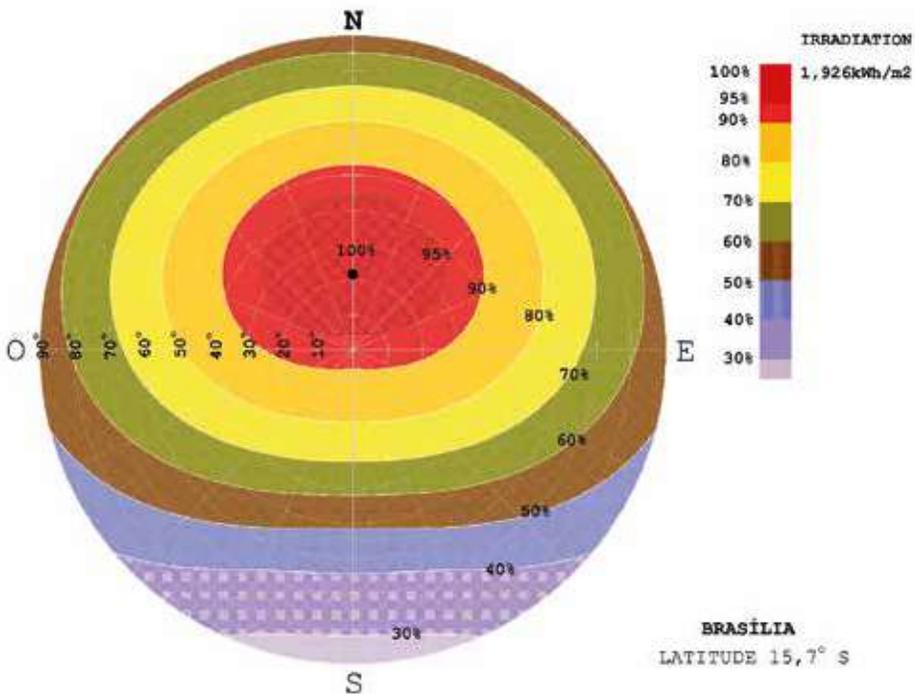
**Figura 7:** Localização das cidades no mapa do Brasil



Fonte: Cronemberger (2015, p. 115).

O procedimento utilizado foi o de calcular a irradiação solar recebida pelas superfícies fixas em 1.368 pontos diferentes da abóboda solar. A distância entre os pontos é de  $5^\circ$  – suas inclinações ( $\beta$ ) variam de horizontal ( $0^\circ$ ) a vertical ( $90^\circ$ ), enquanto os azimutes ( $\alpha$ ) percorrem de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Esses dados foram representados em diagramas com sistema esférico de coordenadas, utilizando-se o programa OriginPro 8.5. Cada diagrama foi criado diretamente a partir de dados organizados em três eixos – *theta* (azimute), *raio* (inclinação) e *zeta* (irradiação) por triangulação.

**Figura 8:** Brasília: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



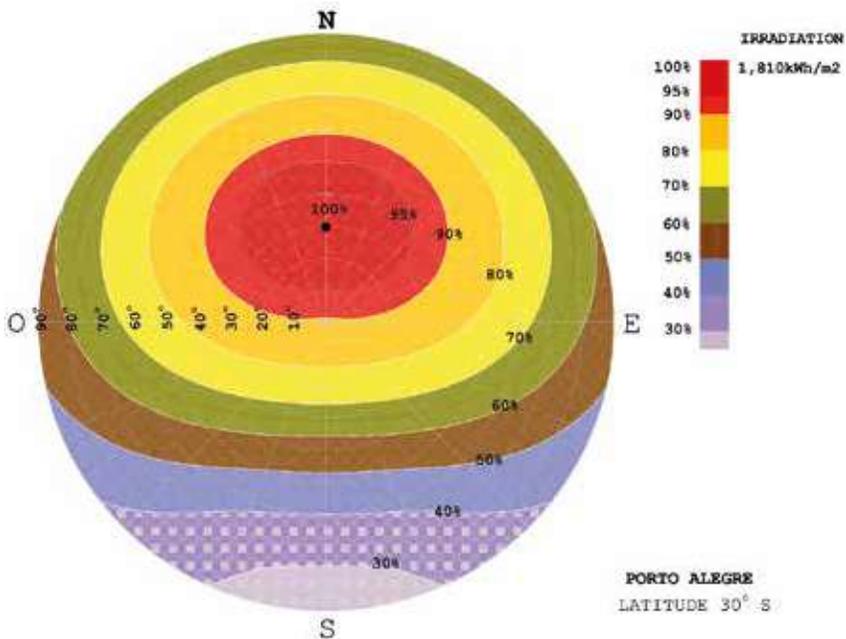
Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

A Figura 8 mostra o diagrama de aproveitamento da irradiação solar para Brasília (latidude  $15,7^\circ$ ) em todas as orientações e inclinações. Observa-se que o ponto de aproveitamento máximo (100%) será para uma superfície inclinada  $24^\circ$  em relação à horizontal e orientada a Norte ( $1.926 \text{ kWh/m}^2$ ), ideal para uma cobertura solar FV.

O diagrama exibe um amplo intervalo de combinações inclinação/orientação ótimas (aproveitamento  $\geq 90\%$ ) para superfícies inclinadas de  $0^\circ$  a  $53^\circ$  e orientadas entre Noroeste e Nordeste. Basicamente, todo o quadrante Norte tem combinações aceitáveis (aproveitamento  $\geq 55\%$ ). Para orientações percorridas entre Leste e Oeste na direção horária também há combinações aceitáveis para edifícios solares FV.

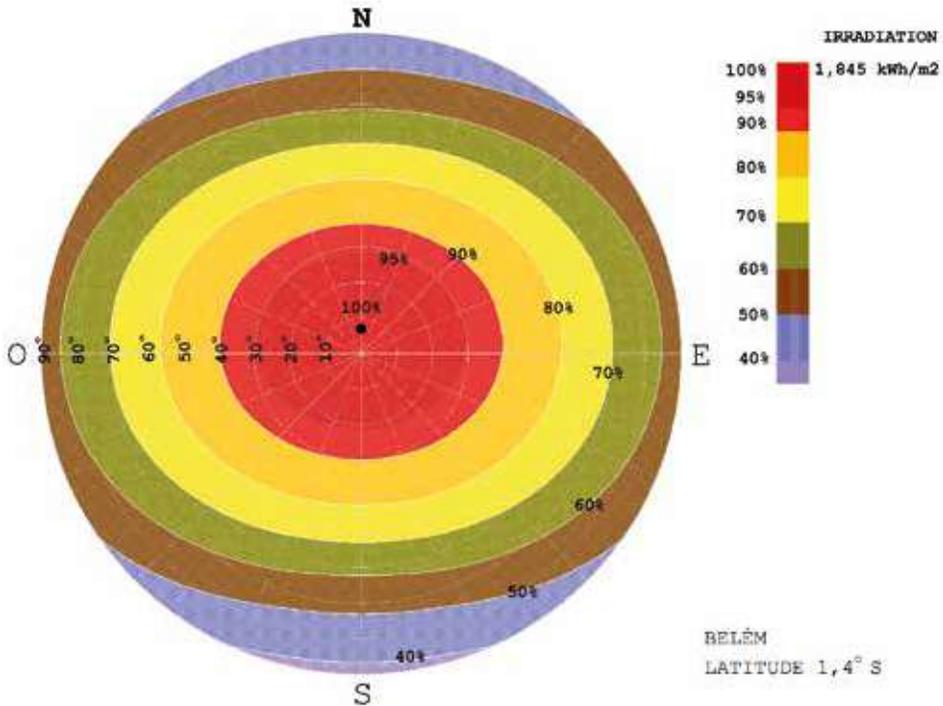
Já para Porto Alegre (latitude  $30^\circ$ ), o diagrama de aproveitamento (Figura 9) mostra que a situação ótima para aproveitamento máximo da irradiação ( $1.810 \text{ kWh/m}^2$ ) refere-se a uma superfície inclinada  $30^\circ$  em relação à horizontal e orientada a Norte. Observa-se, também, assim como em Brasília, um amplo intervalo de combinações inclinação/orientação ótimas (aproveitamento  $\geq 90\%$ ) para superfícies inclinadas de  $2^\circ$  a  $58^\circ$  e orientadas entre Noroeste e Nordeste. Igualmente, todo o quadrante Norte tem combinações aceitáveis (aproveitamento  $\geq 55\%$ ). Para orientações entre Leste a Oeste na direção horária, também há combinações aceitáveis.

**Figura 9:** Porto Alegre: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

**Figura 10:** Belém: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martin e Vega Sánchez (2012, p. 270).

Quase no outro extremo do país, em Belém (lat. - 1,4°), o ponto de aproveitamento máximo (1.845 kWh/m<sup>2</sup>) está orientado a Norte e inclinado 7° em relação ao plano horizontal (Figura 10). O intervalo ótimo para a combinação inclinação/orientação concentra-se no centro do diagrama, como é natural pela proximidade com o Equador. Uma superfície de captação com qualquer orientação, inclinada até aproximadamente 40°, tem o potencial de aproveitar mais de 90% da irradiação solar disponível para essa latitude. O diagrama demonstra que há situações aceitáveis em todas as orientações, mais favoráveis a Leste e Oeste. Note-se, entretanto, que uma superfície vertical orientada a Oeste, apesar de potencialmente receber apenas 56,3% da irradiação total, traduz-se na disponibilidade de 1.039 kWh/m<sup>2</sup>, uma quantidade consideravelmente alta. Tais dados mostram que, nessas latitudes, para uma

boa variedade de tipologias de envoltórias inclinadas até 40°, qualquer que seja sua orientação, é possível obter aproveitamentos bons, muito bons ou ótimos. Relações análogas podem ser observadas nos diagramas para as cidades de Teresina (Figura 12) e Aracajú (Figura 5) e também para Belo Horizonte (Figura 13) e Curitiba (Figura 14).

A Tabela 2 sumariza os resultados dos sete diagramas de irradiação solar para fachadas e coberturas. O recurso solar disponível nas *coberturas* ( $\beta = 0^\circ$  a  $30^\circ$ ) será sempre potencialmente igual ou maior que 89%, quando orientadas a Norte, em qualquer das latitudes verificadas. Quanto mais próximo do Equador, maior será o aproveitamento potencial. Para coberturas com orientação Sul os aproveitamentos potenciais são mais baixos, com um mínimo de 66% em Porto Alegre, podendo chegar, no entanto, a 99% em Belém.

**Tabela 2:** Potencial de aproveitamento anual da irradiação disponível em coberturas e fachadas

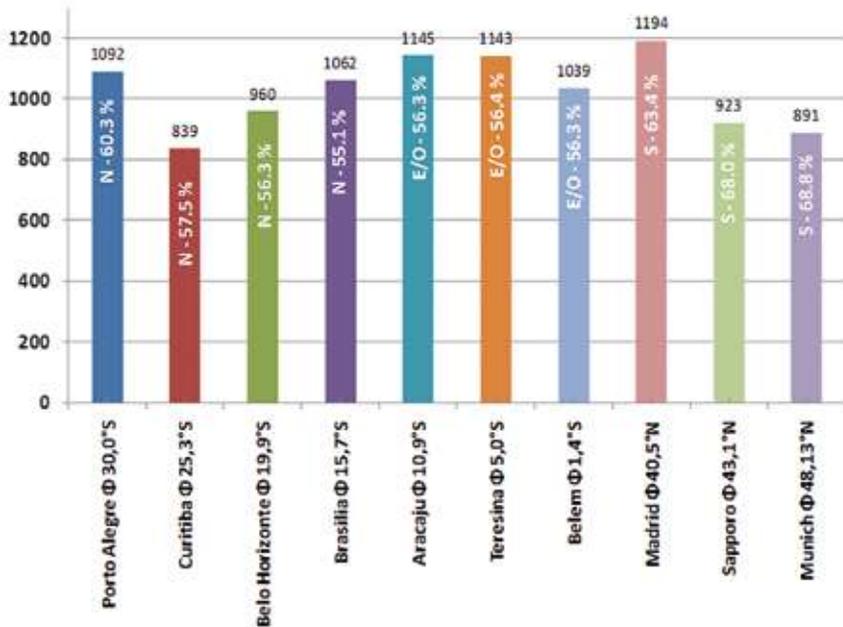
Cidade	Max. Irrad. (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Lat (φ)	Posição superfície (β)	Norte (%)	Leste/Oeste (%)	Sul (%)
Porto Alegre/RS	1.810	-30,0°	cobertura	89,1 – 100	85,5 – 89,3	66,6 – 89,0
			fachada	60,3 – 98,7	54,5 – 81,9	25,9 – 55,9
Curitiba/PR	1.460	-25,3°	cobertura	92,3 – 100	87,5 – 92,5	71,0 – 92,3
			fachada	57,5 – 97,6	53,3 – 83,4	28,6 – 61,2
Belo Horizonte/MG	1.705	-19,9°	cobertura	92,1 – 100	87,6 – 92,4	70,7 – 92,1
			fachada	56,3 – 97,4	55,3 – 83,5	27,0 – 60,6
Brasília/DF	1.926	-15,7°	cobertura	92,5 – 100	88,6 – 92,9	71,9 – 92,5
			fachada	55,1 – 97,0	54,6 – 84,6	26,6 – 61,8
Aracajú/SE	2.034	-10,9°	cobertura	96,8 – 100	93,1 – 97,8	83,5 – 97,4
			fachada	45,6 – 91,8	56,3 – 88,5	31,9 – 74,7
Teresina/PI	2.026	-5,0°	cobertura	96,0 – 100	93,9 – 98,6	85,8 – 98,3
			fachada	44,3 – 90,3	56,4 – 89,2	33,8 – 77,3
Belém/PA	1.845	-1,4°	cobertura	93,3 – 100	94,6 – 99,7	89,9 – 99,4
			fachada	42,0 – 87,5	56,3 – 89,9	37,8 – 82,3

Nota: Coberturas 0° - 30° / Fachadas 40° - 90°.

Fonte: Cronemberger (2012, p. 179).

No que diz respeito ao recurso solar disponível nas fachadas, verifica-se que em todas as cidades brasileiras simuladas o percentual máximo de aproveitamento será de, no máximo, aproximadamente 60% ( $\beta = 90^\circ$ ). Essa proporção será maior quanto maior for a latitude da cidade – a porcentagem mais alta se observa em fachadas orientadas a Norte (60,3%) em Porto Alegre, e a mais baixa (42,4%), em Belém. Em Porto Alegre, Curitiba, Belo Horizonte e Brasília (latitudes entre  $-15^\circ$  e  $-30^\circ$ ), a diferença de aproveitamento entre as fachadas Leste/Oeste e Norte é de cerca de 5%, o que indica que ambas têm a mesma importância do ponto de vista de integração de um gerador solar. Situação diferente encontra-se em Aracaju, Teresina e Belém (latitudes entre  $-1^\circ$  e  $-10^\circ$ ), onde superfícies verticais ( $\beta = 90^\circ$ ) orientadas a Leste/Oeste conseguiriam aproveitamentos potenciais de 10% e 14% maior do que na orientação Norte. Em Belém, devido à proximidade do Equador, a diferença entre o uso das fachadas Norte e Sul é inferior a 5%.

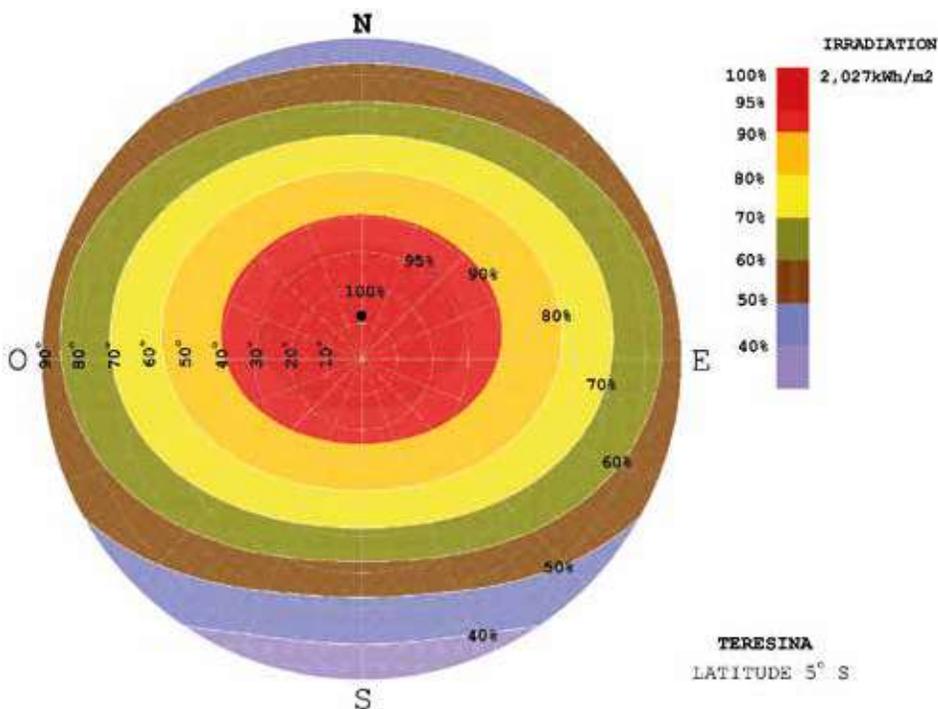
**Figura 11:** Comparação de aproveitamento solar das fachadas melhor orientadas



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 180).

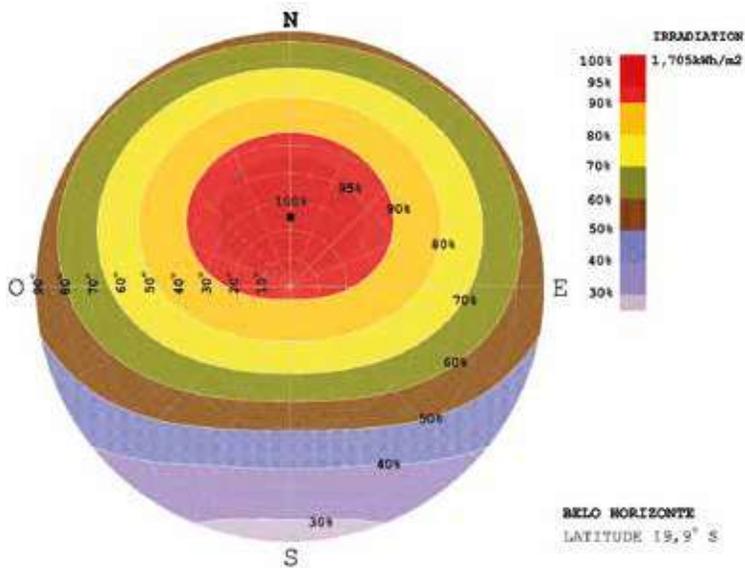
Embora abaixo de 60%, o aproveitamento potencial em *fachadas* apresenta um valor de irradiação anual consideravelmente elevado, se comparado aos valores observados em países onde essa tecnologia já está disseminada (Figura 11). Por exemplo, em Belém, o aproveitamento nas fachadas Leste/Oeste é de 56,3% (1.039 kWh/m<sup>2</sup>). Esse valor representa apenas 13% menos do que a fachada melhor orientada em Madri, na Espanha, e 14% a mais do que uma fachada Sul em Munique, na Alemanha. Situações muito semelhantes foram verificadas em outras cidades brasileiras na faixa de latitude entre -15° e -5°. Esses dados são significativos também em projetos de envoltórias inclinadas, como átrios e elementos de sombreamento de fachadas e janelas.

**Figura 12:** Teresina: Diagrama de irradiação para qualquer orientação e inclinação



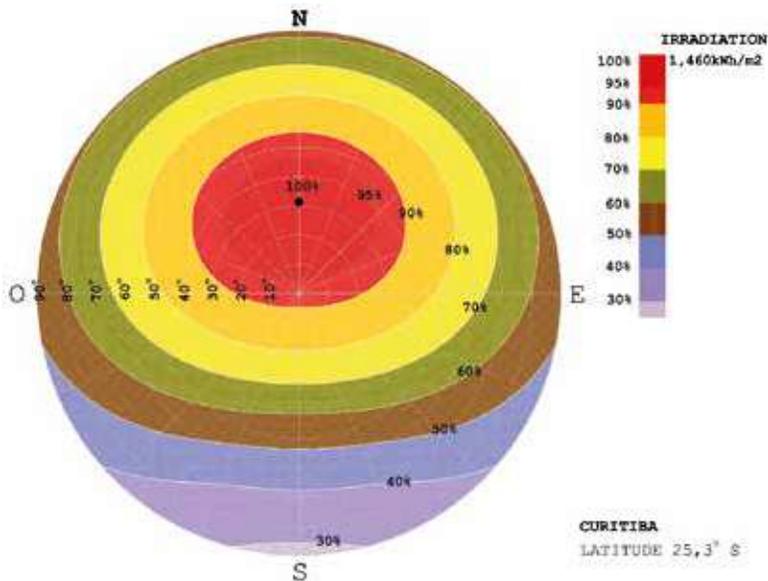
Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

**Figura 13:** Belo Horizonte: irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

**Figura 14:** Curitiba: irradiação para qualquer orientação e inclinação



Fonte: Cronemberger, Caamaño-Martín e Vega Sánchez (2012, p. 270).

### 13. Aspectos normativos de conexão à rede pública

A normativa de compensação de energia adotada no Brasil, apesar de tecnicamente interessante e elogiada por muitos especialistas internacionais, não inclui incentivos econômicos ao consumidor de energia, ao contrário de outros países como Espanha ou Alemanha. Isso faz com que sua aquisição deva ser autofinanciada, e, conseqüentemente, se retarde sua disseminação. A atual crise hídrica que afeta várias regiões do país aliada ao incremento acentuado das tarifas de energia elétrica observadas nos últimos anos podem contribuir para acelerar o processo de adoção dessa tecnologia.

Existem algumas poucas iniciativas de incentivo à instalação de sistemas FV, tais como o Fundo Solar, organizado pelo Instituto Ideal<sup>10</sup> com o *Grüner Strom Label*,<sup>11</sup> ou, ainda, o Crédito Produtivo SIC/Energias Renováveis, para pequenos consumidores. Nenhum deles é apoiado pelo Governo Federal. Ainda assim, estima-se que a capacidade instalada de geração distribuída crescerá, mantendo-se o atual cenário de ausência de incentivos federais, em 835MWp até 2023 (BRASIL, 2014).

Publicada em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa 482/2012 – ANEEL regula a injeção de eletricidade de fontes renováveis à rede elétrica para os chamados mini e microgeradores (BRASIL, 2015). O documento, atualizado em 24 de novembro de 2015, pela Resolução Normativa 687/2015 - ANEEL (BRASIL, 2015) em vigor desde 2016, estabelece os procedimentos de conexão à rede e às condições para o sistema de compensação de energia (*net-metering*). A normativa define um sistema de microgeração distribuído como uma instalação com potência instalada de até 75 kW, para fontes hidráulicas, solares, eólicas, de biomassa ou de cogeração, conectada à rede como unidade de consumo. Sistemas com potência instalada entre 75 kW e 5 MW são considerados do tipo minigeração.

<sup>10</sup> Disponível em: <http://institutoideal.org>.

<sup>11</sup> Etiqueta de Eletricidade Verde (tradução nossa), originária da Alemanha.

O sistema de compensação baseia-se no empréstimo gratuito da energia gerada por um consumidor para a rede do distribuidor local de eletricidade, que é compensado pelo consumo subsequente da energia ativa dessa mesma rede. Isso pode ser feito no mesmo ponto em que a geração ocorreu ou em outro local de propriedade do mesmo consumidor. A cobrança de energia elétrica é feita por contabilização da energia ativa consumida menos a energia injetada, por período da tarifação. As taxas horárias são levadas em consideração, de modo que, quando a energia injetada em hora ponta for maior do que a consumida, a diferença será feita nos horários subsequentes, o que é uma vantagem para o consumidor. Uma das inovações que traz o regulamento é a possibilidade de que a geração distribuída também possa ser feita para unidades de consumo múltiplo, como condomínios e cooperativas.

### 14. Considerações finais

Em primeiro lugar, nota-se que a implementação de um sistema solar ativo em um edifício requer uma análise detalhada do ambiente urbano em que se situa. Contextualizando as conclusões deste capítulo, enfatiza-se que, para maximizar a produção fotovoltaica de qualquer tipo de instalação, integrada ou não em envolventes arquitetônicas, é necessário evitar ao máximo as perdas por sombreamento, temperatura dos módulos, dispersão de parâmetros e limpeza, o que pode ser um desafio no ambiente urbano.

A simulação e a análise dos dados de irradiação solar apresentados permitiram verificar que, nas cidades brasileiras estudadas, a inclinação ideal de uma superfície FV (ângulo ótimo) é quase sempre maior que o valor da latitude local, em até 9°. Apresenta-se como ferramenta de projetos uma expressão linear para calcular o ângulo ótimo nas latitudes brasileiras, com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,93$ .

Nas cidades verificadas, o aproveitamento em superfícies FV integradas em *coberturas* serão boas, muito boas ou ótimas, varrendo orientações que vão de Leste a Oeste em sentido anti-horário, com perdas máximas de até 15%. Em latitudes

de 0° a -25°, até mesmo superfícies orientadas a Sul podem ser beneficiadas com resultados igualmente bons, permitindo aplicações satisfatórias em diversas tipologias de coberturas. Desaconselha-se posicionar os módulos horizontalmente, uma vez que o escoamento de águas pluviais deve ser favorecido, o que é particularmente importante em cidades com altas taxas de precipitação, muito comuns na climatologia brasileira.

No caso de *fachadas*, os melhores potenciais de aproveitamento são encontrados nas superfícies orientadas a Norte, para latitudes -15° a -30°, ou orientadas a Leste/Oeste quando as latitudes variam do Equador até -10°, até um máximo de 60%. No caso de superfícies inclinadas, como em átrios e componentes de sombreamento, o aproveitamento pode chegar até 90% da irradiação disponível.

Ao contrário da crença geral, demonstra-se que a integração de módulos FV em superfícies verticais em baixas latitudes pode ser efetiva e sempre deve ser considerada, desde que os demais critérios de projeto sejam adequados. A boa disponibilidade da irradiação solar em uma ampla gama de orientações e inclinações no Brasil é evidente, o que permite afirmar que a integração FV em edifícios é adequada não só para coberturas, mas também a diversas tipologias de fachadas.

Apresentam-se diagramas que permitem desenvolver uma rápida análise gráfica do potencial de aproveitamento de irradiação solar em todas as orientações e inclinações para sete cidades brasileiras – Belém, Aracajú, Teresina, Brasília, Belo Horizonte, Curitiba e Porto Alegre –, os quais podem ser utilizados como ferramenta na busca de soluções arquitetônicas de integração FV, não apenas no Brasil, mas também em outras regiões localizadas em latitudes equivalentes.

O consumo de energia elétrica no Brasil em edifícios<sup>12</sup> representou, em 2014, um total de 41,1% da oferta nacional de energia elétrica (BRASIL, 2014). Isso sugere que os edifícios solares FV podem ser utilizados como uma estratégia energética vantajosa, que colabora para a otimização e a estabilidade da rede pública de distribuição.

---

<sup>12</sup> Setores residencial (20,5%), público (6,8%) e comercial (13,8%).

Há outro condicionante importante que talvez seja outro impulsor dessa tecnologia, já que é esperável que se confirme no Brasil a afirmação de que “o desenho verde é a razão básica para integrar sistemas BIPV em edifícios”<sup>13</sup> (REIJENGA, 2003, p. 1011, tradução nossa).

Seguindo a tendência de uma maior conscientização ambiental em todos os níveis da sociedade, já estão em vigor no país as normativas relacionadas aos projetos e construção de edifícios, focadas na obtenção do conforto ambiental e de eficiência energética (BRASIL, 2010a; BRASIL, 2010b; ABNT, 2003). Coerentes com outras normativas internacionais similares, essas normativas obrigarão que se cumpram requisitos mais exigentes em relação ao desempenho térmico, acústico e energético de edifícios, levando a uma adaptação dos sistemas e práticas construtivas atuais, podendo até mesmo desencadear uma verdadeira revolução no setor. A introdução de sistemas FV em edifícios no Brasil e outros países localizados em zonas de baixas latitudes é uma questão de tempo, razão pela qual se considerou oportuno apresentar uma revisão crítica da práxis no contexto internacional.

## Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR15220: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa Nº 482*, de 17 de abril de 2012. Brasília, 2010a.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Portaria INMETRO 372/2010, de 17 de setembro de 2010b. *Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos*. Brasília, 2010b.

---

<sup>13</sup> “Green design is the basic reason for integrating PV into buildings.”

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa Nº 687*, de 24 de novembro de 2015. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2015.

BRAUN, Priscila; RÜTHER, Ricardo. The role of grid-connected, building-integrated photovoltaics generation in commercial building energy and power loads in a warm and sunny climate. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 12. p. 2457-2466, 2010.

BUENO PEREIRA, Enio *et al.* *Atlas brasileiro de energia solar*. 2. ed.. Sao José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), 2017.

CERÓN, Isabel; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; NEILA GONZALEZ, Javier. State-of-the-art of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, v. 58, p. 127-133, 2013.

CHENG, C. L.; SANCHEZ JIMENEZ, Charles S.; LEE, Meng-Chieh. Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy*, v. 34, n. 6, p. 1644-1650, 2009.

CHRISTENSEN, Craig; BARKER, Greg. Effects of tilt and azimuth on annual incident solar radiation for United States locations. In: SOLAR FORUM 2001: SOLAR ENERGY: THE POWER TO CHOOSE, 2001, Washington, DC. *Anais...* Washington, 2001.

CRONEMBERGER, Joara *et al.* BIPV Technology application: highlighting advances, tendencies and solutions through Solar Decathlon Europe houses. *Energy and Buildings*, v. 83, p. 44-56, 2014.

CRONEMBERGER, Joara. *Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil*. Tese (Doutorado) – (Programa de Doctorado em Construcción y Tecnología Arquitectónica) - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Espanha, 2015.

CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; VEGA SÁNCHEZ, Sergio. Assessing The Solar Irradiation Potential For Solar Photovoltaic Applications In Buildings At Low Latitudes – Making the Case for Brazil. *Energy and Buildings*, v. 55, p. 264-272, 2012.

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; RUTTKAY-PEREIRA, Fernando Oscar. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 3, p. 27-42, 2014.

DUFFIE, John A.; BECKMAN, Willian. A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley. 2006.

ESPANHA. Real Decreto 314/2006 de 17 de março e atualizações. *Código Técnico de la Edificación. HE5 Ahorro de Energía* - contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica. Madrid. Versão, 2015. Disponível em: <https://www.codigotecnico.org/index.php/menu-ahorro-energia.html>. Acesso em: 12 dez. 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTHECNICAL STANDARDIZATION – CENELEC. *Photovoltaics in Buildings - DRAFT prEN 50583*. Bruxelas. 2014.

FRAUNHOFER – INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS – ISE. *Photovoltaics Report*. Freiburg. 2015.

GOPINATHAN, Kannam K. Solar radiation on variously oriented sloping surfaces. *Solar Energy*, v. 47, n. 3, p. 173-179, 1991.

GUNERHAN, Huseyin; HEPBASLI, Arif. Determination of the optimal tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, v. 42, n. 2, p. 779-783, 2007.

HAUSLADEN, Gerhard; DE SALDANHA, Michael; LIEDL, Petra. *Climate skin, building skin concepts that can do more with less energy*. Berlin: Birkhäuser, 2008.

HERAS CELEMÍN, Maria del Rosario; MONTORO, José Marco. *Comportamiento energético de edificios pasivos – Plan de Monitorización del Instituto de Energías Renovables*. Madrid: CIEMAT, 1990.

HERAS CELEMÍN, Maria del Rosario. *Energía solar en la edificación*. 4. ed. Madrid: CIEMAT, 2002. (Serie Ponencias del CIEMAT.).

HESTNES, Anne Grette. Building Integration of Solar Energy Systems. *Solar Energy*, v. 6, n. 4-6, p. 181-187, 1999.

HUSSEIN, H. M.; AHMAD, Gaffar; EL-GHETANY, H. H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy Conversion and Management*, v. 33, p. 400-405, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Solar Heating and Cooling Programme - SHC. Task 41: Solar Energy and Architecture. *Building Integration of Solar Thermal and Photovoltaics - Barriers, Needs and Strategies*. IEA. 2012.

LEWIS, Gladius. Optimal tilt of solar collector. *Solar & Wind Technology*, v. 4, p. 407-410, 1987.

LIU, Benjamin Y.; JORDAN, Richard C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffused and total solar radiation. *Solar Energy*, v. 4, p. 1-19, 1960.

LORENZO, Eduardo. Energy collected and delivered by PV modules. In: LUQUE LÓPEZ, Antonio; HEGEDUS, Steven (Ed.). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. New Jersey: JohnWiley and Sons. 2003. p. 905-967.

LUQUE, Antonio; HEGEDUS, Steven. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Chichester, West Sussex, Inglaterra: Wiley and Sons, 2003.

MARTÍN CHIVELET, Nuria; SOLLA, Ignacio Fernández. *Envolvente fotovoltaica en la arquitectura*. Barcelona: Reverté, 2007.

MARTINS, Fernando Ramos *et al.* Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2865-2877, 2008.

MONDOL, Jayanta Deb; YOHANIS, Yigzaw G.; NORTON, Brian. The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, v. 32, n. 1, p. 118-140, 2007.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Research Cell and Champion Module Efficiency Records. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/national-center-for-photovoltaics.html>. Acesso em: 5 out. 2017.

PRASAD, Deo; SNOW, Mark. *Designing with solar power: A sourcebook for Building Integrated Photovoltaics (BIPV)*. New York: The Images Publishing Group and Earthscan, 2006.

RUSSIA. *World Radiation Data Centre*. Disponível em: <http://wrdc.mgo.rssi.ru>. Acesso em: 12 mar. 2012.

RÜTHER, Ricardo; BRAUN, Priscila. Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates. *Solar Energy*, v. 83, n. 10, p. 1923-1931, 2009.

SOLARPOWER EUROPE. *Sustainability Working Group: Sustainability of Photovoltaic Systems - Fact Sheet on the The Carbon Footprint*. Bruxelas, 2011.

SOLARPOWER EUROPE. *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018*. Bruxelas, 2014.

REIJENGA, Tjerk. H. PV in Architecture. In: LUQUE LÓPEZ, Antonio; HEGEDUS, Steven (Ed.). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. New Jersey: JohnWiley and Sons, 2003. p. 1005-1042.

ROBERTS, Simon; GUARIENTO, Nicolás. *Building integrated photovoltaics: a handbook*. Basel: Birkhäuser Verlag AG, 2009.

ROOS, Maria; HENZE, Norbert; FUNTAN, Peter; CRONEMBERGER, Joara; FIRGES, Julian. MULTIELEMENT II – Verbesserung der bautechnischen und baurechtlichen Rahmenbedingungen für PV-Fassadenkomponenten. In: Sechstes Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik 2014: 11 de março de 2014, Kloster Banz, Bad Staffelstein. *Anais...* Bad Staffelstein. 2014. p. 113-120.

ROWLANDS, Ian H.; KEMERY, Briana Paige; BEAUSOLEIL-MORRISON, Ian. Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: an Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1397-1409, 2011.

SANTOS, Ísis Portolan; RÜTHER, Ricardo. Limitations in solar module azimuth and tilt angles in building integrated photovoltaics at low latitude tropical sites in Brazil. *Renewable Energy*, v. 63, p. 116-124, 2014.

SANTOS, Ísis Portolan *et al.* Estádios solares: potencial de aplicação da energia solar fotovoltaica nos estádios da Copa 2014. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2010, Belém-PA. *Anais...* III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém-PA, 2010.

SCOGNAMIGLIO, Alessandra; RØSTVIK, Harald N. Photovoltaics and zero energy buildings: a new opportunity and challenge for design. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 21, Special Issue: 27th EU PVSEC, Frankfurt, Germany, 2012.

# Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído

Este livro aborda conceitos, tecnologias e métodos relacionados aos aspectos energético, higrotérmico e lumínico, apresentando como pano de fundo o uso de programas de simulação computacional, diagramas e ferramentas simplificadas para estudos analíticos, aplicados ao espaço construído em diferentes climas. Na primeira parte do livro, “*Inputs* – conforto, vento e luz”, o Capítulo 1 apresenta a ferramenta alemã de simulação computacional ENVI-met e o seu potencial na análise do microclima urbano; o Capítulo 2 mostra as variáveis climáticas e os arquivos climáticos utilizados nas simulações higrotérmica; o Capítulo 3 aborda os programas de simulação aplicados à ventilação natural; e o Capítulo 4 trata da complexidade dos estudos de iluminação e a necessidade de avaliar várias dimensões, simultaneamente. Na segunda parte, “*Outputs* – ambiente construído e energia”, o Capítulo 5 ensina a identificar o potencial de aproveitamento das envoltórias para integrar sistemas de geração de energia; o Capítulo 6 traz a análise de uma casa pré-fabricada de balanço energético nulo; e o Capítulo 7 insere, à guisa de conclusão, uma visão sistêmica sobre o uso da energia elétrica no país. O livro dialoga com diversos perfis profissionais, pois contempla temas atuais e inovadores para estudantes e profissionais de Arquitetura, Engenharia, Geografia, Planejamento Urbano e áreas relacionadas com a qualidade e sustentabilidade do ambiente construído.



EDITORA



**UnB**