

**ALVARO LUCATELLI RUSSI DE MORAES**

**Sistemas fotovoltaicos integrados à fachada de edifícios corporativos na  
cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto**

São Paulo

2019

**ALVARO LUCATELLI RUSSI DE MORAES**

**Sistemas fotovoltaicos integrados à fachada de edifícios corporativos na  
cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto**

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de pós-graduação  
*lato-sensu* em Tecnologia e Gestão na  
Produção de Edifícios

Orientador: Prof. MSc. Maurício Bernardes

São Paulo

2019

**ALVARO LUCATELLI RUSSI DE MORAES**

**Sistemas fotovoltaicos integrados à fachada de edifícios corporativos na  
cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto**

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de pós-graduação  
*lato-sensu* em Tecnologia e Gestão na  
Produção de Edifícios

Área de Concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. MSc. Maurício Bernardes

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

MORAES, ALVARO LUCATELLI RUSSI DE

Sistemas fotovoltaicos integrados à fachadas de edifícios corporativos na cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto/ A. L. R. D. MORAES -- São Paulo, 2019.

76p.

Monografia (MBA em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.BIPV I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

MORAES, A. L. R. **Sistemas fotovoltaicos integrados à fachada de edifícios corporativos na cidade de São Paulo: caracterização e orientações de projeto.** São Paulo. 2019. 76 p. Monografia Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

## RESUMO

O Brasil é um dos países que apresentam os maiores índices de irradiância solar do mundo. Apesar disto, sua matriz energética ainda é predominantemente hidráulica. Por outro lado, em boa parte dos países europeus, os maiores índices de irradiância solar são inferiores aos menores índices brasileiros, e mesmo com esta condição, estão muito à frente em termos de geração de energia elétrica fotovoltaica. Uma das formas de se aumentar a participação dessa energia no contexto brasileiro se daria por meio da integração fotovoltaica aos edifícios pelo conceito de BIPV (*Building Integrated Photovoltaic*). Para auxiliar neste processo de adoção da tecnologia, essa monografia contextualiza o atual cenário da energia fotovoltaica no Brasil, destacando as tecnologias de células fotovoltaicas mais utilizadas, caracterizando também os sistemas fotovoltaicos integrados aos edifícios, além de apresentar uma análise geral dos requisitos de desempenho aplicáveis à luz das normas vigentes e recomendações gerais de projeto. Para que os painéis fotovoltaicos sejam incorporados aos edifícios, otimizando o seu potencial energético, a alternativa mais eficiente ocorre pela aplicação nas fachadas, pelo seu “envelopamento” com o vidro fotovoltaico em detrimento do uso em coberturas. Atualmente já existem tecnologias que encapsulam as células fotovoltaicas em diversos tipos de vidro com cores variadas, tamanhos e índices de transparência, ampliando o leque de possibilidades arquitetônicas, construtivas e energéticas. Neste trabalho foram discutidos e apresentados os principais componentes e normas técnicas de forma a orientar o processo de projeto e subsidiar a avaliação do uso da tecnologia no Brasil.

Palavras-Chave: BIPV. Energia solar. Engenharia civil. Fachadas.

## **ABSTRACT**

Brazil is one of the countries that present the highest solar irradiance indexes in the world. Despite this, its energy matrix is still predominantly hydraulic. On the other hand, in much of the European countries, the highest indices of solar radiation are lower than the lowest Brazilian indices, and even with this condition, they are far ahead in terms of the generation of photovoltaic electric energy. One of the ways to increase the participation of this energy in the Brazilian context would be through photovoltaic integration to buildings by the concept of BIPV (Building Integrated photovoltaic). To assist in this process of adopting the technology, this monograph contextualizes the current scenario of photovoltaic energy in Brazil, highlighting the technologies of photovoltaic cells most used, also characterizing the photovoltaic systems integrated into buildings, in addition to presenting a general analysis of the performance requirements applicable in light of current standards and general design recommendations. In order for the photovoltaic panels to be incorporated into the buildings, optimizing their energy potential, the most efficient alternative is the application on the facades, by its "envelopment" with the photovoltaic glass to the detriment of the use in roofs. Currently there are technologies that encapsulate photovoltaic cells in various types of glass with varying colors, sizes and indices of transparency, expanding the range of architectural, constructive and energetic possibilities. In this work we discussed and presented the main components and technical norms in order to guide the project process and subsidize the evaluation of the use of technology in Brazil.

Keywords: BIPV. Civil Engineering. Facades. Solar Energy.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>1.1. Contexto</b> .....	7
<b>1.2. Objetivos</b> .....	9
<b>1.2.1. Gerais</b> .....	9
<b>1.2.2. Específicos</b> .....	9
<b>1.3. Justificativa</b> .....	9
<b>1.4. Método de pesquisa</b> .....	10
<b>1.5. Estrutura do trabalho</b> .....	11
<b>2. SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO</b> .....	12
<b>2.1. Caracterização</b> .....	12
<b>2.2. Geração distribuída e regulamentação fotovoltaica</b> .....	13
<b>3. ENERGIA SOLAR</b> .....	15
<b>3.1. Caracterização</b> .....	15
<b>3.2. Tecnologias de células fotovoltaicas</b> .....	17
<b>3.2.1. Células fotovoltaicas de primeira geração</b> .....	19
<b>3.2.2. Células fotovoltaicas de segunda geração</b> .....	20
<b>3.2.3. Células fotovoltaicas de terceira geração</b> .....	21
<b>3.2.4. Eficiência em células fotovoltaicas</b> .....	22
<b>4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS AOS EDIFÍCIOS (BIPV)</b> .....	25
<b>4.1. Caracterização</b> .....	25
<b>4.2. BIPV em fachadas de edifícios corporativos</b> .....	32
<b>4.2.1. Exemplos de BIPV em fachadas</b> .....	41
<b>4.3. Normatização para os BIPV</b> .....	45
<b>4.3.1. Especificações normativas de desempenho para os BIPV</b> .....	46
<b>4.4. Orientações gerais para o dimensionamento de BIPV</b> .....	50
<b>4.4.1. Análise do rendimento</b> .....	55
<b>4.4.2. Análise de custos</b> .....	60
<b>4.4.3. Recomendações gerais de projeto</b> .....	63
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	67
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	69

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Contexto

Dentre as novas fontes de geração, a energia solar fotovoltaica é a que mais cresce em todo o mundo. O Brasil é um dos países com maior irradiação solar direta no mundo, contudo, segundo o Banco de Informações de Geração da Aneel (ANEEL, 2019), somente 1,22 % da matriz de energia elétrica correspondeu a energia solar no ano de 2018, ou seja, há muito a ser explorado.

O aquecimento de água por meio de painéis solares coletores já é realidade em várias edificações brasileiras, porém a autogeração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos ainda é muito baixa. A instalação de painéis fotovoltaicos em edifícios é uma das alternativas para que haja uma drástica redução da dependência de energia fornecida pelas concessionárias minimizando os impactos de eventuais descontinuidades de fornecimento e das variações tarifárias.

No caso das grandes cidades, as edificações normalmente alcançam maiores alturas (verticalização), com coberturas cuja disponibilidade de espaço para disposição de elementos que possam captar energia solar é limitada, em função da interferência de outros subsistemas do edifício (equipamentos de ar condicionado, equipamentos de ventilação mecânica, heliportos, entre outros). Nesse cenário, uma alternativa é integração dos painéis fotovoltaicos à construção através das fachadas, em função da sua área de exposição, e pela própria possibilidade de integração arquitetônica, sendo que já há tecnologias disponíveis no mercado para tanto, apesar de no Brasil ainda serem utilizadas em pequena escala.

Em fachadas, os sistemas tradicionais de vedação em pele de vidro do tipo *stick* ou do tipo “unitizados” são adotados em larga escala principalmente em edifícios comerciais nas grandes cidades, sendo que nos últimos anos tais elementos começaram a desempenhar função complementar: geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos. Assim, sistemas fotovoltaicos integrados a edificações, do inglês *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) aplicados a fachadas tem, além da função de geração de energia elétrica, a função de vedação. Uma outra forma de

integração dos painéis fotovoltaicos às edificações são os BAPV, sigla em inglês para *Building Attached Photovoltaic*, que são sistemas em que os módulos fotovoltaicos foram sobrepostos à edificação após o projeto ou construção da mesma.

Os sistemas devem para tanto assegurar o atendimento aos requisitos de desempenho do subsistema de vedação, que para as aplicações nacionais se encontram descritos na NBR 15.575/2013 (ABNT, 2013), norma que apesar de estabelecer critérios de desempenho para habitações residenciais de até cinco pavimentos, não impede o uso de seus principais conceitos em outros tipos de edifício, com as devidas adaptações, complementados por eventuais normas específicas .

Destaca-se a premissa de se considerar, na questão da eficiência energética, o uso racional de energia, isto é, reduzir ao máximo o consumo mantendo as necessidades do usuários atendidas por meio de mudanças de hábito e utilização de sistemas eficientes, embarcados em projetos arquitetônicos com premissas bioclimáticas. Assim, inovações que privilegiam a eficiência energética dos edifícios devem estar associadas programas de redução da demanda pela mudança de perfil de consumo. De outro lado, dado que parte das grandes construtoras brasileiras já atingiram um nível satisfatório de racionalização e gestão em seus processos construtivos, existe um ambiente favorável à inovação, condição necessária para adoção da referida tecnologia.

Atualmente, grande parte das empresas nacionais e estrangeiras que alugam ou compram lajes corporativas para a instalação de seus escritórios demandam como pré-requisito, que o edifício possua alguma certificação ambiental. Prova disto, é o crescente número no Brasil de edificações certificadas, de acordo com o *Green Building Council Brasil*, GBC Brasil, uma organização não governamental que visa fomentar a indústria de construção sustentável no Brasil por meio de sua atuação junto ao governo e à sociedade civil, capacitação técnica de profissionais, disseminação de informações, praticas e conhecimentos, e a promoção de processos de certificação. Desde o ano de 2007, o número de edifícios brasileiros certificados LEED alcançou 1345, com uma taxa de crescimento médio nos últimos anos de 114 % a.a. (GBC, 2019).

Essa demanda por edifícios certificados fez com que as construtoras buscassem alternativas de projeto que promovessem este ganho de eficiência ambiental, envolvendo aspectos relacionados ao uso racional de água e energia, e a redução dos impactos das construções.

Os edifícios de escritórios corporativos foram escolhidos como foco deste trabalho, devido a quatro fatores: (1) grande disponibilidade de área nas fachadas para geração de energia; (2) consumo elevado de energia por metro quadrado e (3) maior disponibilidade de capital para investimento em geração fotovoltaica quando comparado com o setor residencial; (4) Maior preocupação com a redução do custo operacional do edifício. Neste contexto será discutido o presente trabalho.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Gerais**

Efetuar uma caracterização do setor fotovoltaicos e uma compilação de orientações para a utilização de BIPV em fachadas de edifícios corporativos.

### **1.2.2. Específicos**

Analisar o cenário fotovoltaico mundial e brasileiro, compilar as principais tecnologias de células fotovoltaicas disponíveis, caracterizar os sistemas fotovoltaicos com destaque aos sistemas fotovoltaicos integrados aos edifícios e efetuar uma análise das normas aplicáveis de forma a fornecer orientações para o processo de projeto.

## **1.3. Justificativa**

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2019) a matriz energética elétrica mundial está baseada em fontes não renováveis ou impactantes ao meio ambiente. No ano de 2016, 65,1% de toda a eletricidade produzida no mundo teve origem dos combustíveis fósseis, 16,6% hidroelétrica, 10,4% nuclear, 5,6 % solar, eólica e 2,3 % biocombustíveis (IEA, 2018). No Brasil, a operação dos edifícios consome cerca de 17,1 % de toda a energia elétrica produzida no país (EPE, 2018)

A redução no consumo de energia em edificações existentes mantendo o desempenho das atividades e as necessidades dos usuários atendidas, pode ser

atingida com a implementação de estratégias de aumento de eficiência energética em operações de *retrofit* como substituição de equipamentos por outros mais eficientes, como elevadores inteligentes, de forma a se evitar movimentos duplos e desnecessários; regeneradores de energia em elevadores; luminárias de alto rendimento e dimerizáveis, apresentando baixo consumo de energia e alta capacidade de iluminação com sensores de presença; sistema de gerenciamento do consumo de energia por controle digital, sistema de ar condicionado mais eficiente, automação, uso de vidros *low-e* (do inglês, *low emissivity*) pois apresentam, em uma de suas faces, um revestimento extrafino de metais e óxidos metálicos que proporciona baixa emissividade de calor. Invisíveis a olho nu, essas partículas nanométricas absorvem raios infravermelhos, permitindo controlar tanto o ganho quanto a perda térmica e tudo associado a uma mudança de hábito dos usuários, com foco na diminuição do consumo e na eficiência energética.

Por sua vez, iniciativas na concepção dos novos edifícios são essenciais para que se promova a eficiência e uso racional de energia em nossa sociedade, através de conceitos arquitetônicos bioclimáticos com a adoção de formas de geração renovável de energia nas próprias edificações.

Neste cenário, a energia elétrica por fonte fotovoltaica se caracteriza como uma geração de energia limpa, renovável, com elevado potencial no Brasil, e ainda, com a vantagem de possibilitar a produção de energia no próprio local de consumo, a chamada “autogeração”. Portanto, estudos nacionais que envolvam o uso de sistemas fotovoltaicos integrados às edificações são necessários para subsidiar a análise de viabilidade da tecnologia, apoiando a sua disseminação e uso mais frequente.

#### **1.4. Método de pesquisa**

Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico relativo tanto ao cenário atual do setor energético solar quanto às tecnologias disponíveis para integração dos sistemas fotovoltaicos às fachadas dos edifícios no Brasil e no mundo. Foram levantados e analisados teses, dissertações, monografias, artigos, catálogos de fornecedores, e consultas a especialistas, projetistas e fornecedores da área. Por meio desta pesquisa, foram reunidas informações para estabelecer recomendações

para implantação do sistema de captação de energia solar em fachadas através dos painéis fotovoltaicos integrados aos edifícios.

### **1.5. Estrutura do trabalho**

A monografia está organizada da seguinte forma: primeiro capítulo em que se contextualiza o tema e se discute objetivo do trabalho, justificando o seu desenvolvimento, a metodologia da pesquisa e, ainda, a sua estruturação. No capítulo 2 foi caracterizado o cenário de produção e distribuição de energia elétrica no Brasil incluindo conceitos de geração distribuída e regulamentação do setor. No capítulo 3 é abordado o fenômeno de radiação e da energia solar bem como apresentam-se os princípios do funcionamento das células fotovoltaicas e as características técnicas dos diferentes tipos de células. No capítulo 4 são reunidas informações sobre a caracterização e composição dos sistemas fotovoltaicos, e na sequência, dos sistemas fotovoltaicos integrados às edificações, com a apresentação de casos brasileiros e internacionais, além de apresentar as normas que regem a tecnologia, custos, desempenho e recomendações para o projeto de uma BIPV, por fim o capítulo 5 reúne considerações finais sobre a pesquisa e o capítulo 6 com as referências consultadas.

## 2. SISTEMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

### 2.1. Caracterização

O sistema elétrico brasileiro apresenta-se como um sistema essencialmente hidrotérmico de grande porte com forte predominância de usinas hidroelétricas e com múltiplos proprietários, formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Em abril de 2019, a partir do Banco de Informações de Geração da Aneel (ANEEL, 2019) a capacidade total de geração de energia elétrica no Brasil atingiu a marca aproximada de 172,9 GW sendo que 60,84% é de origem hídrica, 14,81% fóssil, 8,71% eólica, 8,55% biomassa, 1,20% solar, 1,15% nuclear e 4,70 de energia importada de países como Argentina, Paraguai, Uruguai e Venezuela. Pelos dados, verifica-se que a matriz energética brasileira é composta em sua maioria pela fonte hidrelétrica, de outro lado, energias de fontes renováveis como a solar possui um espaço muito grande para seu desenvolvimento e crescimento.

Devido às características de suscetibilidade do recurso hídrico ao regime de chuvas em conjunto com o crescimento da demanda de eletricidade, torna-se necessário diversificar as fontes de energia que compõem a matriz elétrica brasileira, buscando aproveitar fontes de energia que causem baixo impacto ao meio ambiente. (ABES, 2017)

Aliados à necessidade de diversificar as fontes de energia, existem ainda os compromissos apresentados pelo Brasil às Nações Unidas para redução de emissão de gases do efeito estufa. Esses compromissos foram ratificados em reunião na ONU realizada em setembro de 2016. O país incluiu, entre seus compromissos, a meta de alcançar 45% de participação de fontes renováveis de energia (incluindo fonte hídrica, com participação das demais renováveis entre 28% e 33% deste total) na matriz energética e reduzir em 43% as emissões de gases de efeito estufa até 2030 em relação aos níveis de emissões observados em 2005. (ABES, 2017)

Em dados obtidos através do Banco de Informações Gerais da Aneel, (ANEEL, 2019) em abril de 2019, dos empreendimentos em construção para geração de energia elétrica para uma potência outorgada de aproximadamente 7,7 GW, o que representa

um aumento de 4,6% na potência instalada no Brasil que está com atuais 169 GW, 52,92% terão como origem combustíveis fósseis, 17,31% nuclear, 12,44% hídrica, 11,41% eólica e 5,92% solar.

Dos empreendimentos com construção ainda não iniciada com previsão de geração de energia elétrica na casa dos 12,7 GW, 35,05% eólica, 29,8% terão como origem combustíveis fósseis, 18,04% solar e 17,11% hídrica. Com os dados apresentados, nota-se que mesmo ainda tendo um percentual baixo em relação às demais fontes energéticas, os investimentos em energia solar têm um crescimento superior às fontes mais tradicionais como fóssil e hídrica, porém inferior à energia eólica.

## **2.2. Geração distribuída e regulamentação fotovoltaica**

No Brasil, a definição de Geração Distribuída (GD) é feita a partir do Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163/2004: “Considera-se geração distribuída toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de: (i) hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; (ii) termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%.” (BRASIL, 2004)

Pereira (2016) destaca os principais incentivos à geração distribuída no Brasil:

- O Governo Federal, através da Lei nº 13.169, isentou o PIS e COFINS a energia injetada na rede;
- Convênio ICMS114/2017 que autorizou os Estados a concederem isenção do ICMS sobre a energia solar gerada nos termos estabelecidos pela Resolução Normativa nº 482, de 17/4/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)
- O Governo Federal através do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) com intuito de fomentar a geração distribuída no Brasil;
- Aprovação na Comissão de Serviços de Infraestrutura do Senado, do projeto de Lei 371 de 2015 para o resgate do FGTS para aquisição de sistemas de microgeração;
- Disponibilidade de linhas de financiamento para a geração distribuída: Mais Alimentos (Pronaf), Economia Verde (Desenvolve SP), Finem (BNDES), PE Solar

(Agefepe), Crédito produtivo energia solar (Goiás Fomento), FNE Sol (BNB), Construcard (Caixa Econômica Federal), CDC Eficiência Energética (Santander), Proger (Banco do Brasil), Consórcio Sustentável (Sicredi) além das empresas que estão oferecendo soluções financiadas através de contratos de performance (ESCO) e alugueis.

Em 2015 foi publicada a Resolução Normativa nº 687 (ANEEL, 2015) que substituiu a RN nº 482/2012, atualizando e acrescentando alguns itens como a geração compartilhada que possibilita a instalação de uma micro ou mini usina de geração distribuída para que cada unidade consumidora utilize a energia gerada para redução da conta de energia como um único consumidor. Além disto, instituiu a figura do “autoconsumo remoto”: quando a geração for superior ao consumo, o gerador poderá compensar o consumo de outro local de sua propriedade e mesma titularidade, e que esteja sob mesma área de concessão, nas quais a energia excedente será compensada. (ANEEL, 2015)

Miranda (2013) destaca que no mundo existem dois sistemas de compensação de energia, o primeiro, adotado no Brasil, segue o método de *net metering* no qual à unidade consumidora é dada a possibilidade de compensar seu consumo de eletricidade de forma parcial ou em sua totalidade. Caso a geração seja maior que o consumo, o saldo positivo fica disponível ao consumidor e pode ser utilizado em meses subsequentes, ou seja, o mecanismo dá igual valor à energia “injetada” na rede e a obtida junto a ela. Já o segundo sistema, o *feed in tariffs* (FIT) as tarifas são estabelecidas com contratos de longo prazo, geralmente maiores que 15 anos, para a geração por fonte renovável de energia, independentemente de sua utilização (autoconsumo ou para exportação). O valor da tarifa é estabelecido com base no custo de geração, a depender da fonte e do tipo de instalação.

O incentivo à produção de energia vem do fato de que o valor pago pela energia injetada na rede é maior que o da energia comprada da distribuidora. O mecanismo de FIT é a base da compensação energética e cumpre com seu objetivo de forma satisfatória em países como Alemanha, Espanha e Itália, sendo o mecanismo mais utilizado em toda a Europa (MIRANDA, 2013).

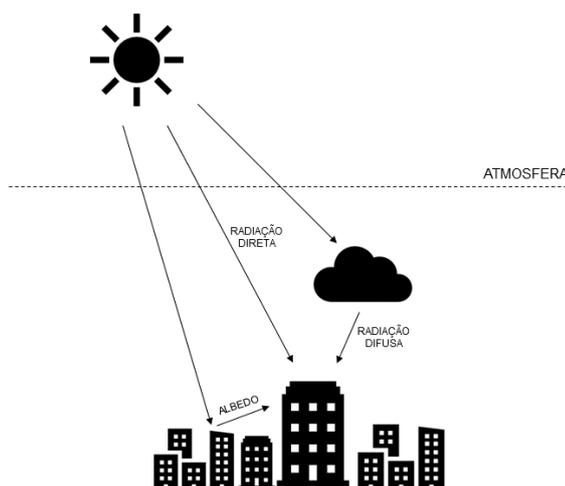
### 3. ENERGIA SOLAR

#### 3.1. Caracterização

O termo radiação solar é usado de forma genérica ao se referir a quantidade de energia solar que incide em uma superfície durante um certo período de tempo, expressa em Wh ou kWh por metro quadrado ( $\text{Wh/m}^2$  ou  $\text{kWh/m}^2$ ), sendo que quando é dada em termos de energia por unidade de área é denominado de irradiação solar, expressa em watt por metro quadrado ( $\text{W/m}^2$ ) (CRESESB, 2014).

A radiação solar ao entrar na atmosfera, sofre algumas alterações causadas por moléculas de gases, vapor d'água, poeira, e outras partículas de aerossóis, resultando em modificações na quantidade, na qualidade e na direção dos raios solares que atingem a superfície terrestre. Ela é composta por diferentes espectros, sendo eles: radiação direta, radiação difusa e albedo. A radiação solar direta consiste na parcela da energia radiante incidente no topo da atmosfera e que chega diretamente à superfície terrestre e que não sofre desvios em sua trajetória. A radiação solar difusa é a radiação que chega à superfície terrestre, através do espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera (INÁCIO, 2009). O albedo é a parcela proveniente da refletância das ondas que irradiam do sol em elementos de cobertura do solo, tais como as edificações e seus revestimentos (PEREZ et al., 2003). A Figura 1 ilustra os componentes da radiação solar descritos.

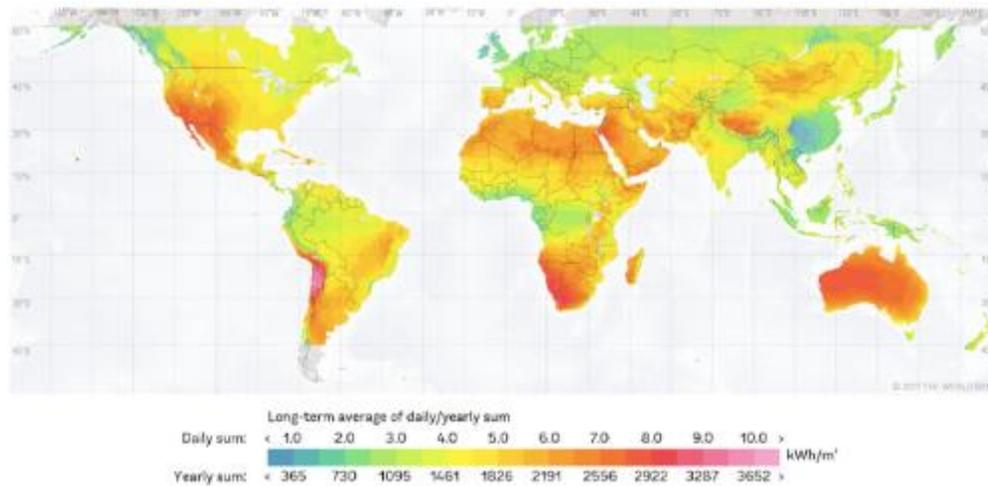
Figura 1 - Componentes da radiação solar



Fonte: Elaborado pelo autor baseado em PINHO *et al* (2008)

A mapa apresentado na Figura 2 mostra a irradiância solar direta em todo o globo terrestre.

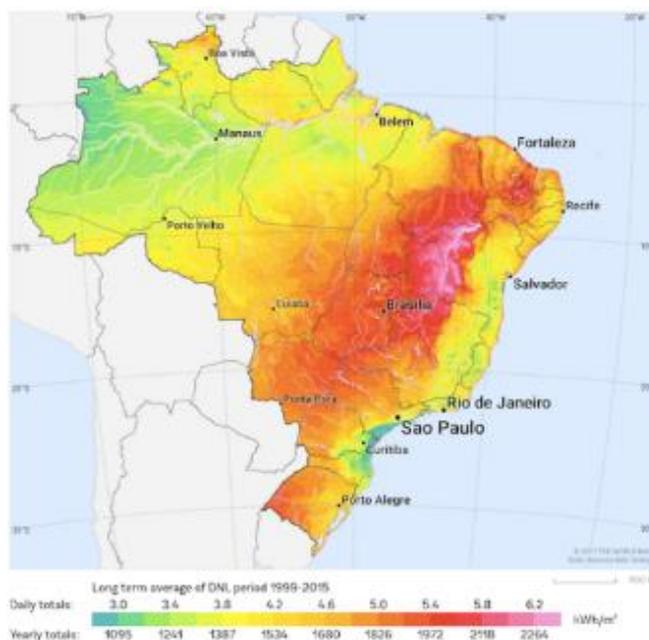
Figura 2 - Irradiância solar direta no mundo



Fonte: Global Solar Atlas (2019)

Ruther (2004) destaca que os índices de radiação solar, na região menos ensolarada do Brasil, são 40% maiores do que na região mais ensolarada da Alemanha. A radiação solar direta no Brasil, ilustrada pela Figura 3, é superior comparada aos países europeus que têm participação significativa no mercado mundial de sistemas a partir de energia solar, porém está longe de ser aproveitada na mesma proporção da sua disponibilidade.

Figura 3 - Radiação solar direta no Brasil



Fonte: Global Solar Atlas (2019)

De acordo com o relatório sobre o mercado fotovoltaico global, (IEA, 2018), atualmente a China é o país com a maior capacidade instalada com 131 GW, seguido dos Estados Unidos com 51 GW e o Japão com 49 GW. A Alemanha, que apresenta índices de radiação solar direta inferiores aos menores índices brasileiro, é atualmente o quarto país com maior capacidade instalada com 42 MW enquanto o Brasil possui somente 2 GW (ANEEL, 2019) com um potencial enorme a ser explorado.

### 3.2. Tecnologias de células fotovoltaicas

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade por meio do efeito fotovoltaico. (FADIGAS, 2012)

A utilização do efeito fotovoltaico, só foi conhecida a partir de 1839 (FRAIDENRAICH e LYRA<sup>6</sup>, 1995 *apud* SANTOS, 2009). Nesse ano, Becquerel demonstrou a possibilidade da conversão da radiação luminosa mediante a incidência da luz em um eletrodo mergulhado em uma solução de eletrólito. O mesmo foi observado em um sólido em 1877, por Adams e Day com o selênio. A primeira célula solar foi produzida em 1888 a partir do selênio, por Charles Fritts (PERLIN<sup>7</sup>, 1999 *apud* SANTOS, 2009)

A tecnologia de geração energética a partir da conversão fotovoltaica é feita através dos módulos fotovoltaicos. Cada módulo apresenta um conjunto de células fotovoltaicas que, unidas, promovem a geração de energia elétrica. Ao unir vários módulos em um arranjo, o sistema compõe um painel, que pode ser instalado em uma edificação ou sobre o solo (RÜTHER<sup>8</sup>, 2004 *apud* SANTOS, 2013)

A Figura 4 ilustra o funcionamento de uma célula fotovoltaica através do efeito fotovoltaico. Durante a operação, a superfície do módulo fotovoltaico é iluminada pela luz solar, composta por fótons. Esses fótons contêm quantidades diferentes de energia correspondente aos diferentes comprimentos de onda do espectro solar. Quando os fótons atingem uma célula fotovoltaica, podem ser refletidos, absorvidos

---

<sup>6</sup> FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. Energia solar: fundamentos e tecnologias de conversão heliotérmica e fotovoltaica. Recife: Universitária UFPE, 1995.

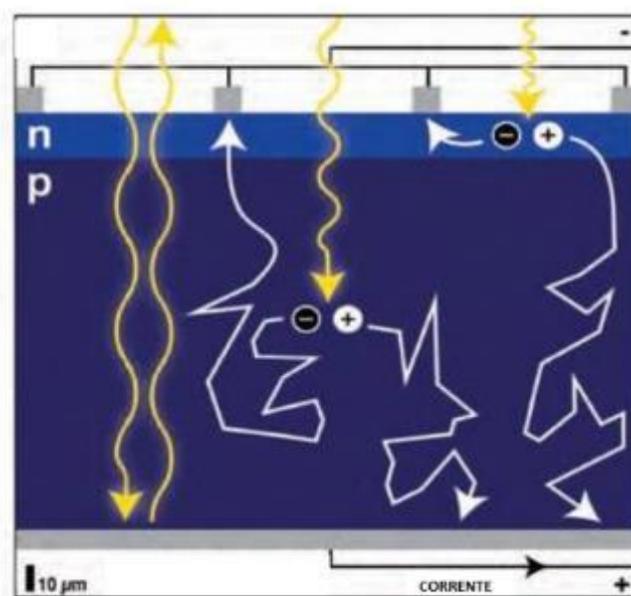
<sup>7</sup> PERLIN, J. From space to the earth: the story of solar electricity: aatec publications. Ann Arbor, 1999.

<sup>8</sup> RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

ou traspasar o elemento, ilustrados pelas setas amarelas da Figura 4. Apenas os fótons absorvidos geram eletricidade. (SCHMALENSEE *et al*, 2015). Machado *et al* (2014) destacam que:

*“Quando se forma a junção p-n no material, ou seja, a justaposição do material do tipo positivo (p) com o material do tipo negativo (n), surge um campo elétrico permanente na região da junção. Esse campo elétrico se forma devido ao fluxo de elétrons livres no lado n (carregado negativamente) para o lado p (carregado positivamente), tornando o lado n carregado positivamente e o lado p carregado negativamente. Ao ser exposto à luz, alguns elétrons do material da célula ficam mais energéticos devido à absorção de fótons. Com essa energia extra, os elétrons são acelerados, gerando uma corrente através da junção. Esse fluxo de corrente dá origem à diferença de potencial entre as duas faces da junção p-n. Esse é o efeito fotovoltaico. Para coletar a eletricidade gerada utilizam-se filamentos condutores conectados em cada lado das células, que fecham o circuito, tornando a eletricidade gerada aproveitável.”*

Figura 4 - Modelo esquemático do mecanismo fotovoltaico em uma célula



Fonte: Adaptado de *The Future of Solar Energy*, SCHMALENSEE *et al* (2015).

Assim, a conversão fotovoltaica acontece por meio de elementos que ao receberem luz tem a propriedade de convertê-la em energia elétrica em corrente contínua, e que com auxílio de inversores é transformada em corrente alternada, compatível com o padrão das concessionárias / equipamentos. Destaca-se que os painéis solares fotovoltaicos podem converter energia a partir de radiação direta e difusa e, portanto, conseguem operar sob condições de tempo nublado. (BERNARDES, 2015)

A eficiência de cada tecnologia depende do elemento ou composto utilizado, do tipo de irradiação prevalente, condições de exposição, entre outros, e define a partir da disponibilidade de área para instalação e recursos financeiros, além da orientação solar, a área necessária para se atingir uma determinada potência em cada projeto. (SANTOS, 2014)

As principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos são classificadas em três gerações. (CRESESEB, 2014)

### **3.2.1. Células fotovoltaicas de primeira geração**

A primeira geração é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), representam mais de 85% do mercado e são consideradas tecnologias consolidadas e confiáveis, além de possuírem a melhor eficiência comercialmente disponível. (CRESESEB, 2014)

As células de silício monocristalino (m-Si) respondem por cerca de 23% do mercado mundial, devido à sua alta confiabilidade, alta eficiência e tecnologia de fabricação consolidada. A célula com maior performance atualmente tem cerca de 25% de eficiência. As unidades comercializadas no Brasil têm eficiências em torno de 15%. Algumas das limitações dessa tecnologia estão relacionadas aos elevados custos de fabricação, à complexidade e alto consumo de energia dos processos de produção e à grande perda de material durante a fabricação. Entretanto o ganho de escala vem reduzindo o custo das células que usam essa tecnologia (FRAUNHOFER, 2016<sup>9</sup> apud OLIVEIRA, 2017).

As células de silício policristalino (p-Si) são fruto da tecnologia com maior participação no mercado, cerca de 70%, e são fabricadas com o mesmo material das células de silício monocristalino. A diferença entre a tecnologia policristalina e a monocristalina reside no fato de que ao invés de formarem um único grande cristal, solidificam-se em forma de um bloco composto de muitos pequenos cristais. Esse fato acarreta uma pequena redução da eficiência das células, mas o custo de fabricação reduz-se em função da menor quantidade de energia despendida (FRAUNHOFER, 2016<sup>9</sup> apud OLIVEIRA 2017).

A eficiência de módulos de p-Si atualmente se encontra entre 14 % e 16 % embora seja possível encontrar módulos dessa tecnologia com eficiências superiores a 17%. (BÜHLER *et al*, 2018)

### 3.2.2. Células fotovoltaicas de segunda geração

A segunda geração corresponde aos filmes finos, denominação dada a tecnologias fotovoltaicas que empregam materiais com espessuras da ordem de apenas 1  $\mu\text{m}$  (aproximadamente 100 vezes menos espessa do que lâminas de silício cristalino). Como os módulos empregam muito menos material na sua fabricação, essa tecnologia apresenta um alto potencial de redução de custos (BÜHLER *et al*, 2018).

É dividida em três cadeias produtivas: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). Esta geração apresenta menor eficiência do que a primeira. Existem dificuldades associadas à disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, no caso do cádmio, sua toxicidade, que retardam a sua utilização em maior escala. (CRESESB, 2014).

Os filmes finos constituem um grande campo de pesquisas e desenvolvimento de células fotovoltaicas de menor custo, com perspectivas de boa eficiência e durabilidade. São adequados para integração nas edificações devido à flexibilidade de instalação. Os principais tipos de células fotovoltaicas dispostas em filmes finos são: de silício amorfo, de disseleneto de cobre e índio, de telureto de cádmio e de arseneto de gálio. A principal vantagem desta tecnologia em relação às tecnologias cristalinas é sua menor sensibilidade ao sombreamento. (FRAUNHOFER, 2016<sup>9</sup> *apud* OLIVEIRA, 2017).

As células de silício amorfo (a-Si) foram utilizadas pela primeira vez em células solares no ano de 1974, sendo este o material mais estudado até o presente momento para aplicação em filmes finos. Este material apresenta uma resposta espectral mais

---

<sup>9</sup> FRAUNHOFER. 2016. Photovoltaics Report. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/photovoltaics-report-in-englischer-sprache.pdf>>. Acesso em 12 fev. 2019

voltada para a região do azul do espectro eletromagnético, o que aumenta a sua eficiência sob irradiação difusa. (BÜHLER *et al*, 2018)

A alta absorção ótica destes materiais, se comparados com as células de primeira geração, permite fabricar células fotovoltaicas bastante finas, nas quais camadas de poucos micrometros ( $\mu\text{m}$ ) de diferentes materiais semicondutores são depositadas sucessivamente, por técnicas de produção em larga escala sobre superfícies rígidas ou flexíveis. Desta maneira, o consumo de energia e de materiais semicondutores para produção das células é reduzido, resultando em menores custos. Além disso, as células de filmes finos não ficam restritas aos formatos das células de c-Si (quadriláteros) com a possibilidade de serem usadas em superfícies amplas e até flexíveis, o que aumenta o espectro de aplicações em arquitetura (CRESESB, 2014)

### 3.2.3. Células fotovoltaicas de terceira geração

A terceira geração, ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento com testes e produção em pequena escala é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (*CPV – Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (*DSSC – Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (*OPV – Organic Photovoltaics*). (CRESESB, 2014)

As tecnologias que pertencem à terceira geração possuem como principal objetivo o aumento da eficiência de conversão, redução no custo de fabricação e aplicações com características específicas, como por exemplo em BIPV. (GROSSIORD, 2012<sup>10</sup> *apud* BÜHLER *et al*, 2018).

Krebs (2009), destaca que:

*“Os módulos fotovoltaicos orgânicos (OPV) vem apresentando um crescente desenvolvimento devido à perspectiva de redução de custos e ao potencial de aplicações comerciais que demandem leveza, semitransparência, formatos variados e flexibilidade. O método de fabricação roll-to-roll possibilita a fabricação em larga escala e com um menor consumo de energia em*

---

<sup>10</sup> GROSSIORD, N., KROON, J. M., ANDRIESSEN, R., BLOM, P. W. M. Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices *Org. Electron.*, 13 (3) (2012), pp. 432-456. DOI:10.1016/j.orgel.2011.11.027

*relação às tecnologias fotovoltaicas convencionais. O método envolve um substrato no formato de uma folha muito longa a qual é enrolada em um rolo. O substrato é desenrolado e passa através das máquinas que irão realizar a pintura e o revestimento. Ao final do processo, o material é enrolado novamente. Entre a pintura e o revestimento, podem existir outros processos como aquecimento, secagem e cura por UV. Como o substrato entra por uma extremidade das máquinas e sai pela outra extremidade com a célula solar pronta, o processo é contínuo, gerando uma maior quantidade de produto com um menor custo. “*

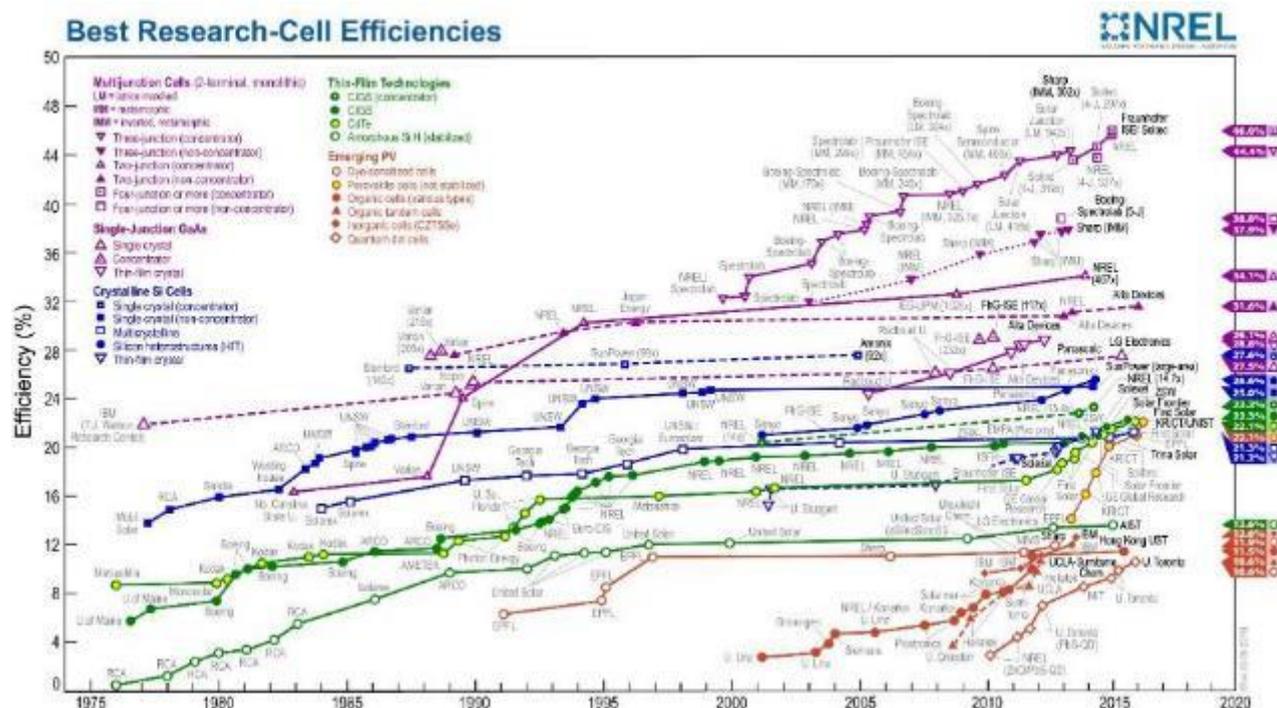
Porém, para que as células OPV se popularizem no mercado fotovoltaico, é preciso melhorar a eficiência e a durabilidade dos seus módulos. Atualmente, a eficiência de um módulo comercial está em torno de 2 a 6 %. (GALDINO *et al*, 2018). Este tipo de célula apresenta uma espessura cerca de 1.000 vezes menor que uma célula de silício. (CRESESB, 2014)

#### **3.2.4. Eficiência em células fotovoltaicas**

A eficiência de cada tecnologia depende do elemento ou composto utilizado e está diretamente ligada à área necessária para se atingir uma determinada potência. Desta forma, pode-se escolher, entre as opções existentes, qual delas atende melhor aos objetivos de cada projeto. Por exemplo, se a intenção é utilizar uma pequena área com o intuito de gerar o máximo de energia, deve-se optar pela tecnologia mais eficiente. Já se o limitante não é a área, mas sim custo inicial, pode-se optar por uma tecnologia menos eficiente, que ocupará uma maior área, porém com custos iniciais mais atraentes, já que o investimento necessário para implantação de um sistema fotovoltaico guarda maior relação com a potência instalada do que com a eficiência da tecnologia. (ZOMER, 2014)

O Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos (NREL) possui um levantamento relativo à eficiência de diversos tipos de tecnologias de células fotovoltaicas desde 1976 até os dias atuais. Os valores foram compilados em um gráfico contido na Figura 5. Os valores foram medidos por laboratórios de testes independentes e reconhecidos e possuem uma base padronizada para a medição. Para medições de eficiência o padrão está baseado no Teste Padrão ou Condições de Relatório (STC - *Standard test conditions* com irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>, massa de ar de 1,5 e temperatura da célula de 25°C)

Figura 5 - Eficiência das tecnologias de células fotovoltaicas medidas em laboratório



Fonte: National Renewable Energy Laboratory (NREL). Disponível em < <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em 11 de abril de 2019

As células que são mais utilizadas em painéis fotovoltaicos como já mencionadas, são as de primeira geração (em azul no gráfico), segunda geração (em verde no gráfico) e terceira geração (em laranja no gráfico). As células de primeira geração são as que menos evoluíram em termos de aumento da eficiência nos últimos anos, estando praticamente estabilizadas há cerca de 25 anos. As células de segunda geração, tendo sua origem na mesma época que as de primeira geração, possuem um aumento de eficiência maior e uma menor estabilização em comparação às de primeira geração. As células de terceira geração são mais novas e as que apresentam um maior índice de aumento da eficiência comparado as outras duas tecnologias, porém a eficiência da maioria das células dessa categoria está abaixo das células de primeira e segunda geração.

No entanto, como destaca Zomer (2014) é importante salientar que as eficiências demonstradas na Figura 5 são superiores às eficiências encontradas em módulos fotovoltaicos disponíveis comercialmente, pois estes estudos em laboratórios utilizam apenas uma pequena área de material, com cerca de 1 cm<sup>2</sup>, enquanto um módulo fotovoltaico possui várias células muito maiores conectadas em série; e estas séries

conectadas em paralelo; com espaçamentos entre as células que aumentam a superfície do módulo; e, assim, reduzem sua eficiência.

De forma a limitar este estudo às tecnologias de células fotovoltaicas mais viáveis e portanto, mais utilizadas como componentes dos vidros fotovoltaicos, são destacadas as de maior eficiência, sendo elas as de silício monocristalino, silício policristalino, silício amorfo, telureto de cádmio e células orgânicas do tipo OPV. Os valores das eficiências máximas alcançadas em laboratório foram extraídos da publicação do NREL (Figura 5) ; e os valores das eficiências das células inseridas no BIPV foram fornecidos pelo pesquisador e especialista na área, Reinaldo Chohfi (2019)<sup>11</sup>.

Tabela 1 - Eficiências obtidas em laboratório e comercialmente disponíveis

TIPO DE CÉLULA		EFICIÊNCIA	EFICIÊNCIA DAS
		MÁX LABORATÓRIO (%)	CÉLULA NA CONDIÇÃO DE BIPV (disposição em painel de vidro) (%)
<b>PRIMEIRA GERAÇÃO</b>	silício monocristalino (m-Si)	25	17 a 18
	silício policristalino (p-Si)	21,3	15 a 16
<b>SEGUNDA GERAÇÃO</b>	silício amorfo (a-Si)	13,6	3 a 6
	telureto de cádmio (CdTe)	22,1	7 a 17
<b>TERCEIRA GERAÇÃO</b>	célula orgânica (OPV)	11,5	2 a 6

<sup>11</sup> Informação fornecida por Reinaldo Escada Chohfi, sócio gerente da empresa GeoDesign Internacional, por e-mail. São Paulo, março de 2019.

## 4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS AOS EDIFÍCIOS (BIPV)

### 4.1. Caracterização

Os principais componentes de um sistema fotovoltaico são os módulos e os inversores. Os módulos fotovoltaicos são formados pela associação de células, devidamente protegidas e estruturadas que em conjunto são responsáveis por transformar a energia luminosa solar em corrente elétrica. O inversor é um equipamento que faz a interface entre um ou mais painéis e a rede elétrica adequando as formas de onda da geração do painel que ocorre em corrente contínua (DC) as formas de onda da corrente alternada (AC) utilizadas nas redes de transmissão das concessionárias e portanto exigidas pela ANEEL. (SANTOS, 2014)

Os módulos fotovoltaicos geram corrente elétrica contínua, com tensão e corrente variáveis em função principalmente do nível de insolação, temperatura ambiente e temperatura da superfície dos módulos e dos requisitos da carga. Portanto, quando se necessita fornecer carga para sistemas de corrente alternada são necessários inversores. Como há consumo de energia variável durante todo o dia em um edifício, para que haja um balanceamento entre a geração e consumo, pode-se dispor de acumuladores elétricos (baterias) e controladores de carga para proteção das baterias contra cargas e descargas excessivas, a fim de se acumular a energia gerada nos momentos de insolação. (OLIVEIRA, 2017)

Existem duas tipologias de sistemas fotovoltaicos: Sistemas Fotovoltaicos Autônomos (SFA) e Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCR)

Os sistemas fotovoltaicos autônomos têm como característica a não conexão à rede elétrica de distribuição. No Brasil, estes sistemas atendem às comunidades isoladas dos centros urbanos, fornecendo eletricidade, na maior parte dos casos, para iluminação, refrigeração e outras cargas baixas de energia (CRESESB, 2013<sup>12</sup> apud OLIVEIRA, 2017)

---

<sup>12</sup> CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Energia Solar: Princípios e Aplicações.2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 14 fev. 2019

Já os sistemas fotovoltaicos conectados à rede, como destaca Oliveira (2017), podem ser usados tanto para geração de energia em grande escala por meio de instalações centralizadas em usinas (geração centralizada), quanto na configuração de geração distribuída. No caso do micro e da mini geração distribuída, a quantidade de energia gerada e consumida é quantificada pelo medidor bidirecional da concessionária, que em muitos casos pode também possuir outras funções como por exemplo seleção de períodos de consumo de energia da concessionária em função da variação horo-sazonal da tarifa (“*smartmeter*”).

Consumidores cujo sistema PV está ligado à rede, isto é, sem armazenamento de energia no local de geração, necessitam do suplemento de eletricidade da concessionária durante períodos em que sistema PV não é capaz de satisfazer a demanda. No entanto, durante períodos em que a produção da eletricidade excede esta demanda, o excedente é injetado na rede. (CORREIA, 2017)

Os BIPV são caracterizados como a prática de incorporar painéis fotovoltaicos ao edifício. Essa integração acontece quando os coletores solares fotovoltaicos desempenham diversas funções, como: geração de energia elétrica, isolamento térmico, design arquitetônico, compartimentação de espaços, sombreamento e proteção contra intempéries ao substituir ou ser incorporado a um elemento convencional da construção, como claraboias, telhados, janelas ou fachadas. (SANTOS, 2015)

Desta forma, o módulo BIPV, além da geração de energia elétrica, pode substituir um elemento convencional de construção, incluindo os componentes elétricos necessários para conectar os módulos fotovoltaicos aos circuitos CA ou CC externos, além dos sistemas mecânicos de montagem necessários para integrar o subsistema BIPV ao edifício.

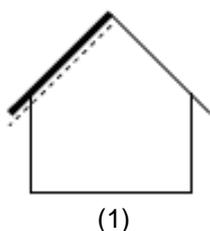
A integração arquitetônica de tecnologias fotovoltaicas em fachadas pode ser realizada de diversas formas como em fachadas ventiladas, parede-cortina, em janelas, *brise soleil* (dispositivo arquitetônico utilizado para impedir a incidência direta de radiação solar nos interiores de um edifício, de forma a evitar aí a manifestação de um calor excessivo), no guarda corpo de varandas e em pele de vidro. Vaninni (2011) destaca que algumas características do módulo PV podem variar adequando-se a

necessidade de cada fachada como o tamanho e forma, a estrutura construtiva, a transparência e disposição dos módulos, cor e quantidade de células.

As Normas EN 50583 – 1 e 2 (CENELEC, 2016), referências para aplicação de BIPV na Europa, discutidas na próxima sessão, classificam os BIPV em 5 categorias. As classificações são baseadas na localização dos módulos - se estão em coberturas ou em fachadas, e se os módulos são ou não acessíveis a partir do interior da edificação. Os quadros de 1 a 5 compilam as aplicações de cada categoria, juntamente com respectivos exemplos, de forma a facilitar o entendimento do BIPV, incluindo o caso específico de aplicação em fachadas de edifícios, que será melhor explorado mais adiante na presente monografia.

Quadro 1 - Categoria A para os BIPV de acordo com a EN 50583-1 e 2

<b>DISPOSIÇÃO</b>	Inclinados, integrados à cobertura, não acessíveis a partir do interior do edifício. Os módulos fotovoltaicos são instalados na envoltória do edifício na cobertura em um ângulo entre $0^{\circ}$ e $75^{\circ}$ com uma barreira abaixo, de forma a não ser acessível a partir do interior do edifício
-------------------	--



Fonte: (1) EN 50583-1: 2016 – Photovoltaics in buildings (CENELEC, 2016)

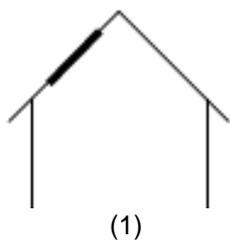
(2) Hanergy. Disponível em

<<http://en.hanergythinfilmpower.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=145>>. Acesso em 02 mai. 2019

Quadro 2 - Categoria B para os BIPV de acordo com a EN 50583-1 e 2

**DISPOSIÇÃO**

Inclinados, integrados à cobertura, acessíveis a partir do interior do edifício. Os módulos fotovoltaicos são instalados na envoltória do edifício na cobertura em um ângulo entre  $0^{\circ}$  e  $75^{\circ}$



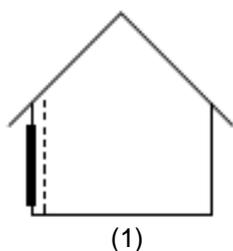
Fonte: (1) EN 50583-1: 2016 – Photovoltaics in buildings (CENELEC, 2016)

(2) Romag. Disponível em <<https://www.romag.co.uk/projects/kings-cross-station/>>. Acesso em 02 mai. 2019

Quadro 3 - Categoria C para os BIPV de acordo com a EN 50583-1 e 2

**DISPOSIÇÃO**

Verticais, integrados às fachadas, não acessíveis a partir do interior do edifício. Os módulos fotovoltaicos são instalados na envoltória do edifício nas fachadas em um ângulo entre  $75^{\circ}$  e  $90^{\circ}$  precedido de uma barreira, que torna o BIPV não acessível a partir do interior do edifício



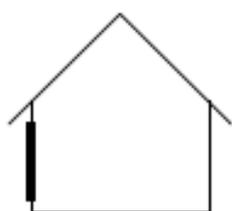
Fonte: (1) EN 50583-1: 2016 – Photovoltaics in buildings (CENELEC, 2016)

(2) Universidade de Washington. Onyx Solar. Disponível em <<https://www.onyx-solar.com/pv-fins-solar-glass-w-university>>. Acesso em 09 mai. 2019

Quadro 4 - Categoria D para os BIPV de acordo com a EN 50583-1 e 2

**DISPOSIÇÃO**

Verticais, integrados às fachadas, acessíveis a partir do interior do edifício. Os módulos fotovoltaicos são instalados na envoltória do edifício nas fachadas em um ângulo entre 75° e 90°



(1)



(2)

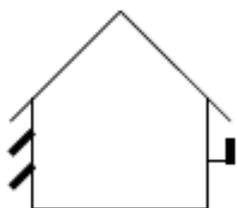
Fonte: (1) EN 50583-1: 2016 – Photovoltaics in buildings (CENELEC, 2016)

(2) Digital trends. Disponível em < <https://www.digitaltrends.com/home/zero-emission-blauhaus-solar-panel>>. Acesso em 02 mai. 2019

Quadro 5 - Categoria E para os BIPV de acordo com a EN 50583-1 e 2

**DISPOSIÇÃO**

Externamente integrados, acessíveis ou não acessíveis a partir do interior do edifício. Os módulos fotovoltaicos são montados no edifício e formam uma camada externa adicional ao seu envelope (por exemplo, balcões, persianas, toldos, brise soleil etc.)



(1)



(2)

Fonte: (1) EN 50583-1: 2016 – Photovoltaics in buildings (CENELEC, 2016)

(2) Digital trends. Disponível em < <https://www.digitaltrends.com/home/zero-emission-blauhaus-solar-panel>>. Acesso em 02 mai. 2019

Conforme ilustrado em cada uma das categorias mencionadas, o sistema fotovoltaico torna-se, portanto, uma parte integrante da construção, para oferecer, além da geração de eletricidade, isolamento térmico e acústico, sombreamento e modulação da luz natural, proteção física, aprimoramento estético e uma percepção visual de modernidade. (POZZETTI, 2013, tradução nossa)

O posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação ao norte geográfico (azimute) e à inclinação vertical são elementos fundamentais para permitir a captação da maior irradiação solar possível. Os maiores níveis de irradiação são absorvidos por uma superfície que esteja em um azimute orientado ao norte (para obras no hemisfério sul) ou ao sul (no caso do hemisfério Norte), e que esteja inclinado em ângulo igual à latitude local (BROGREN, 2003).

Em residências, galpões industriais e construções com grande área de cobertura, o uso de telhas fotovoltaicas pode vir a ser um dos principais exemplos de integração fotovoltaica nos próximos anos, devido ao maior rendimento quando comparado ao das aplicações verticais (fachadas), e devido também à sua facilidade de instalação tanto no caso de *retrofit*, como em construções novas.

Contudo, nos edifícios de escritórios corporativos a instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura pode ser bastante limitada, devido à disputa deste espaço com outras instalações para acomodação de áreas técnicas e de seus equipamentos, e em alguns casos, heliportos. Nesse contexto, as fachadas aparecem como alternativa para geração de eletricidade, através da tecnologia fotovoltaica integrada à arquitetura. Há ainda outros dois fatores dos edifícios comerciais favoráveis a instalação de PV integrados às fachadas (BIPV): o consumo elevado de energia e a maior disponibilidade de capital para investimento em soluções que reduzam o custo de operação, por exemplo por meio de geração de energia elétrica com dispositivos fotovoltaicos, quando comparados com empreendimentos do setor residencial. (SANTOS, 2015)

Gomes (2015) destaca que a fachada é um subsistema da edificação que está diretamente ligado ao elevado custo de manutenção, desempenho térmico e acústico, manifestações de patologias e estanqueidade, comprometendo o desempenho da envoltória.

Do ponto de vista de instalações elétricas e da construção civil, as tecnologias necessárias à incorporação de painéis solares fotovoltaicos a projetos de construção convencionais já estão bem estabelecidas, já que a utilização de painéis de vidro em fachadas e em coberturas é uma prática comum no setor da construção para o segmento corporativo brasileiro. A conexão elétrica dos painéis à rede e os dispositivos periféricos necessários à interconexão são acessíveis no mercado, que oferece tais elementos para diversos tipos de configuração ou porte de instalação. (RÜTHER, 2004)

A tecnologia fotovoltaica integrada à edificação apresenta-se como uma opção inteligente de geração energética próxima ao ponto de consumo, não ocupando área adicional, e, sob o ponto de vista ambiental, não interferindo negativamente no entorno em que se encontra (BRAUN *et al.*, 2011<sup>13</sup> *apud* ZOMER, 2014).

No Brasil, algumas certificações voltadas a edificações com desempenho ambiental superior valorizam a instalação de sistemas fotovoltaicos, como destaca Santos (2014). A Certificação Internacional LEED por exemplo, prevê na tipologia *New Construction*, no Critério “Energia e Atmosfera”, pontuação de acordo com o percentual de energia gerada no local da edificação (de 1 a 13%). No critério “Qualidade Ambiental interna”, também são valorizadas instalações de módulos fotovoltaicos que promovam sombreamento à estrutura ou equipamentos, já que reduz o ganho térmico pela radiação solar. Na certificação para edifícios existentes, envoltória e estrutura principal, lojas de varejo e outras modalidades, também é valorizada implementação de sistemas fotovoltaicos na edificação. (GBC, 2019)

Já o Programa Brasileiro de Etiquetagem do PROCEL para edifícios comerciais, de serviço e públicos, prevê bonificação para edificações que contenham geradores fotovoltaicos em sua envoltória (envelope) e que supram no mínimo 10% da energia consumida anualmente pela edificação (INMETRO<sup>14</sup>, 2010 *apud* SANTOS, 2014)

---

<sup>13</sup> BRAUN, P.; ZOMER, C.; RUTHER, R. Análise da contribuição energética associada à integração de sistemas fotovoltaicos em edificações comerciais. Revista Brasileira de Energia Solar. v.2, p.49-59, 2011.

<sup>14</sup> INMETRO. Portaria 372 - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos, 2010.

## 4.2. BIPV em fachadas de edifícios corporativos

As fachadas do tipo cortina, do inglês *curtain-wall*, além de ser um sistema bastante utilizado em edifícios corporativos na cidade de São Paulo podem ser adotadas sem grandes alterações como um BIPV. Por ser um sistema já usado em larga escala no Brasil, contando com diversas publicações e normas aplicáveis o presente trabalho abordará em linhas gerais os componentes do sistema, priorizando o enfoque aos vidros fotovoltaicos.

Figura 6 - Exemplo de edifícios corporativos na cidade de São Paulo com fachadas do tipo *curtain-wall*



Fonte: Fonte: Do autor. Imagem fotografada em 20 mai. 2019

A norma europeia EN 50583 partes 1 e 2 (CENELEC, 2016), em se tratando dos materiais que compõem o sistema, referencia outras normas como as de vidros e caixilhos. No Brasil, há também normas específicas em vigor que estão relacionadas ao sistema de fachada, e que devem ser observadas em aplicações de BIPV, as quais foram reunidas na Tabela 2:

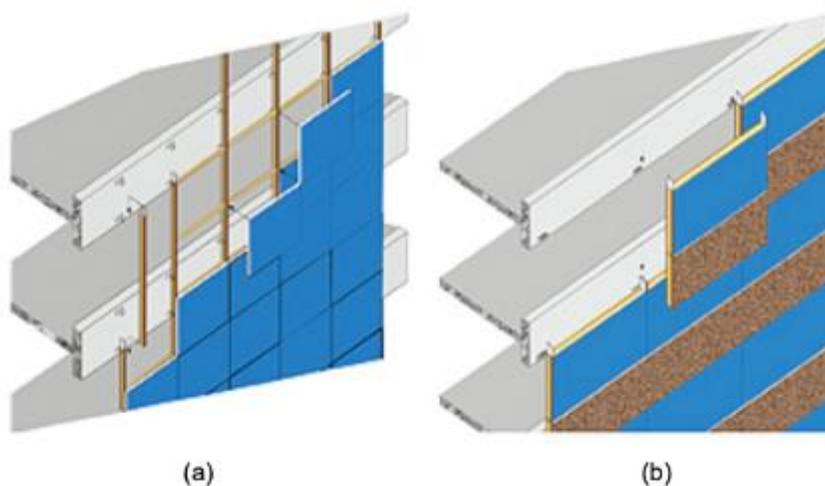
Tabela 2 - Normas técnicas brasileiras em vigor relacionadas às fachadas

CÓDIGO ABNT	TÍTULO
<b>NBR 6123:1988</b>	Forças devidas ao vento em edificações
<b>NBR 7199:2016</b>	Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações
<b>NBR 10821-1 a 5:2017</b>	Esquadrias para edificações
<b>NBR 14697:2001</b>	Vidro Laminado
<b>NBR 15737:2009</b>	Perfis de alumínio e suas ligas com acabamento superficial - Colagem de vidros com selante estrutural

Para melhor entendimento da aplicação dos conceitos normativos nacionais ao BIPV, recorre-se inicialmente à NBR 10821-1 (ABNT, 2017). Esta norma traz em suas definições a qualificação da fachada tipo cortina, tradicionalmente adotada no BIPV: “Esquadrias interligadas e estruturadas com função de vedação que formam um sistema contínuo, desenvolvendo-se no sentido da altura e/ou da largura da edificação, sem interrupção, por pelo menos dois pavimentos”.

Khoury (2002)<sup>15</sup> *apud* Vedovello (2012) divide os sistemas de fachada-cortina em duas categorias básicas: sistema *stick* e sistema unitizado.

Figura 7 - Representação dos sistemas de fachada cortina (a) *stick* (b) unitizado



Fonte: Revista Tèchne. Disponível em < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/122/artigo286403-2.aspx>>. Acesso em 04 mai.2019

O sistema fachada cortina *stick*, ilustrado pela Figura 7(a), é composto por componentes individuais enviados desmontados ao local de aplicação, onde são montados e instalados. Os painéis são fixados mecanicamente à vedação externa do edifício ou à sua estrutura, se mantendo estanques por meio de uma combinação de perfis emborrachados, sistemas de drenagem e selantes específicos. A quantidade e espessura do selante utilizado são determinadas de acordo com as pressões de vento positivas e negativas do local, altura do edifício e linha do perfil utilizado. As colunas e travessas ainda são contínuas e presas à estrutura, e a montagem é feita manualmente com o uso de andaimes externos ou de plataformas móveis. Intempéries como sol extremo e chuva atrapalham a montagem. (ARRUDA, 2010)

<sup>15</sup> KHOURY, J. Curtain Walls. In: KOHN, A. E.; KATZ, P. Building type basics for office buildings. New York: John Wiley & Sons, 2002. p. 139-181.

O sistema unitizado, ilustrado pelas Figura 7(b) e (8), atualmente é o mais utilizado em edifícios corporativos na cidade de São Paulo de acordo com o Engenheiro projetista de fachadas Julio Cesar Petrucci (2019)<sup>16</sup>. Cada módulo é constituído por vidros, perfis emborrachados, eventuais articulações, e de uma estrutura de perfis de alumínio permitindo a sua instalação concomitantemente à execução da estrutura do edifício, contudo alguns andares abaixo. O sistema de montagem demanda a utilização de equipamentos mecanizados para movimentação vertical dos painéis pré-fabricados (normalmente em instalações fabris o que aumenta o controle tecnológico e garante maior qualidade de vedação à fachada). (VEDOVELLO, 2012)

Figura 8 – Edifício corporativo em construção com fachada em sistema unitizado



Fonte: Do autor. Imagem fotografada em 09 mai. 2019

No que se refere ao sistema unitizado, os principais componentes são: sistemas de ancoragem à estrutura do edifício; compartimentação horizontal contra o fogo entre os módulos e a estrutura do edifício e vedação externa, estrutura e requadros de alumínio; vidros; sistema de vedação através de perfis emborrachados.

O sistema de ancoragem normalmente utiliza placas de alumínio com furos oblongos capazes de permitir ajuste na planicidade da montagem da fachada, além de elementos telescópicos para seu nivelamento. As placas normalmente são fixadas às

---

<sup>16</sup> Informação fornecida por Julio Cesar Petrucci, engenheiro projetista de fachadas da empresa Petrucci Consultoria e Engenharia, por reunião. São Paulo, maio de 2019.

vigas/lajes no perímetro do edifício por chumbadores químicos ou de expansão, ou pela sua solidarizarão à estrutura por meio de concreto de alta resistência. A estrutura suporte e as ancoragens devem ser dimensionadas para resistir aos esforços do vento, peso próprio e cargas acidentais. Recomenda-se o emprego de chumbadores de aço inoxidável para assegurar durabilidade e vida útil de projeto ao sistema. A capacidade de resistência de todos os parafusos empregados deve ser verificada. Recomenda-se sempre a utilização de parafusos de aço inoxidável (ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EDIFICAÇÕES, 2008<sup>17</sup> *apud* VEDOVELLO, 2012)

A fixação dos vidros à estrutura de alumínio usualmente adota selante estrutural de cura neutra (*glazing*) ou fita adesiva estrutural dupla face. O dimensionamento da largura e espessura do cordão de colagem deverão ser calculadas em função da dimensão dos painéis de vidro, da espessura dos vidros, do tipo de perfil e acabamento do mesmo, cargas dinâmicas (ação dos ventos), ângulo de inclinação da superfície do vidro (VEDOVELLO, 2012)

De acordo com as NBR 7199 (ABNT, 2016) e 14.697 (ABNT, 2001) é obrigatória em fachadas a utilização de vidros de segurança de qualquer tipo, visando à integridade física dos usuários dos edifícios e dos transeuntes externos.

Pela ótica do desempenho térmico e lumínico, alguns conceitos sobre os vidros foram destacados por Vedovello (2012), embasados na NBR 15220 (ABNT, 2005) e são importantes no entendimento da eficiência energética da utilização de BIPV em edifícios, destacando-se:

- *Fator Solar (FS): é a relação entre a energia total que passa através do vidro e a energia solar incidente. A energia total é o somatório da energia solar que entra por transmissão direta e a energia que o vidro transfere ao ambiente interior devido ao seu aquecimento por absorção energética. Quanto maior o FS, mais o vidro permite a passagem de energia térmica. Assim, para uma adequada proteção solar, o FS deverá ser o mais baixo possível;*
- *Valor-U: refere-se a uma medida de ganho ou perda de calor pelo vidro devido à diferença na temperatura interna e externa. Fator-U ou Valor-U também é chamado de coeficiente global de transferência de calor ou transmitância térmica. Quanto menor o Valor-U, maior o*

---

<sup>17</sup> Alternativas tecnológicas para edificações. Coord. de manuais técnicos: Josiane Souza. São Paulo: PINI, 2008. 237p. v.1

isolamento térmico e, portanto, maior o nível de eficiência. A unidade é expressa em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ;

- *Valor-R: refere-se à medida da resistência do envidraçamento ao fluxo de calor. É o resultado da divisão de 1 pelo Valor-U, ( $Valor-R = 1/Valor-U$ ). Um Valor-R mais alto indica propriedades de isolamento do envidraçamento melhores. O Valor-R normalmente não é usado como um dado dos produtos de envidraçamento.*
- *Coefficiente de Ganho de Calor Solar (CGCS): é a quantidade de calor do sol que atravessa o vidro para dentro do edifício por radiação; quanto menor for este valor, menos calor estará passando pelo vidro. O CGCS é a porcentagem de energia solar incidente no vidro que se transfere para o lado interno tanto diretamente quanto indiretamente. A porção de ganho direto é a transmissão de energia solar, ao passo que o ganho indireto é fruto da incidência de energia solar no vidro que é absorvida e re-irradiada ou retransmitida para dentro do ambiente.*
- *Coefficiente de Sombreamento: é uma medida de ganho de calor por meio do vidro por radiação solar. Especificamente, o Coeficiente de Sombreamento é a razão entre o ganho de calor solar para um tipo determinado de vidro e de vidro transparente incolor de 3 mm. Um Coeficiente de Sombreamento menor indica ganho de calor solar mais baixo.*
- *Taxa de transmissão de luz visível: por definição é a porcentagem de luz visível transmitida diretamente pelo vidro; quanto maior a porcentagem de transmissão de luz visível, mais luz estará atravessando o vidro.*

Em se tratando de BIPV, o sistema de fachada unitizada deve ter o vidro comumente utilizado, substituído por um vidro fotovoltaico, mantendo os demais componentes sem alterações, como a estrutura de fixação, a estrutura do próprio módulo de vidro e as vedações.

O projetista pode lançar mão de diferentes níveis de transmissão de luz nas fachadas de um edifício. Um sistema típico de parede cortina pode combinar vidro fotovoltaico semitransparente para as áreas em que se pretenda maior conforto aos usuários pela maior integração com o ambiente externo pelo seu contato visual, juntamente com vidros totalmente escuros para áreas opacas da vedação externa do edifício. Esta estratégia contribui para otimizar o rendimento energético do sistema.

A Figura 9 obtida junto a um fabricante espanhol de vidros fotovoltaicos, mostra os diferentes níveis de transparência e potência de geração de energia por metro quadrado. Nota-se que uma característica dos vidros é que quanto maior o nível de transparência, menor é sua potência de geração de energia.

Figura 9 - Níveis de transparência e potência de geração em vidros fotovoltaicos silício amorfo



Fonte: Onyx Solar. Disponível em < <https://www.onyxsolar.com/all-you-need> > .Acesso em 02 abr. 2019

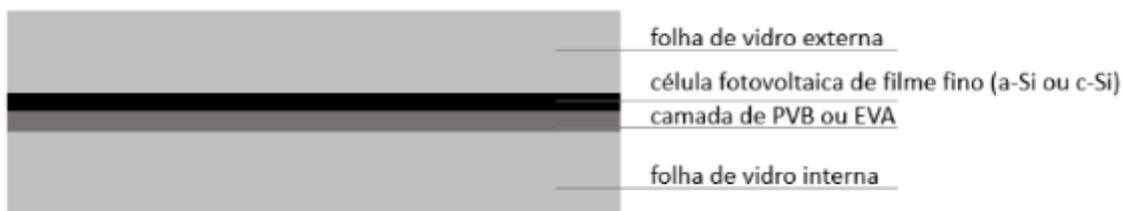
Em consulta ao pesquisador Reinaldo Escada Chohfi (2019)<sup>18</sup>, este informou que o vidro fotovoltaico pode ser do tipo laminado ou insulado, e contém na camada intermediária células fotovoltaicas que normalmente podem ser de silício monocristalino (m-Si), silício policristalino (p-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) ou OPV.

A escolha pela tecnologia depende das necessidades do projeto, como grau de transparência, cor e paginação dos vidros fotovoltaicos em função da forma e tamanho dos módulos no caso de fachadas de edifícios. Não há requisitos especiais para as folhas de vidro que compõem uma unidade fotovoltaica, podendo apresentar os mesmos tratamentos térmicos, características e propriedades mecânicas, de um envidraçamento tradicional. Da mesma forma, não necessitam de uma estrutura de suporte e fixação específicas. Sendo assim, a empresa responsável pela montagem da fachada unitizada não incorrerá em serviços adicionais ao escopo que lhe é tradicional, cabendo ao contratado para as instalações elétricas do edifício, considerar a interconexão dos módulos de fachada à rede elétrica. A composição do vidro

<sup>18</sup> Informação fornecida por Reinaldo Escada Chohfi, sócio gerente da empresa GeoDesign Internacional, por e-mail. São Paulo, março de 2019.

fotovoltaico na condição de “vidro laminado” é dada pelas seguintes camadas conforme ilustrado pela Figura 10.

Figura 10 - Composição padrão de um vidro fotovoltaico laminado



Fonte: Elaborado pelo autor

A camada intermediária estruturante do vidro laminado com película de PVB (polivinil butyral) ou EVA (acetato-vinilo de etileno) conforme a tecnologia das células solares são responsáveis também pelo nível de transparência e pela coloração do conjunto;

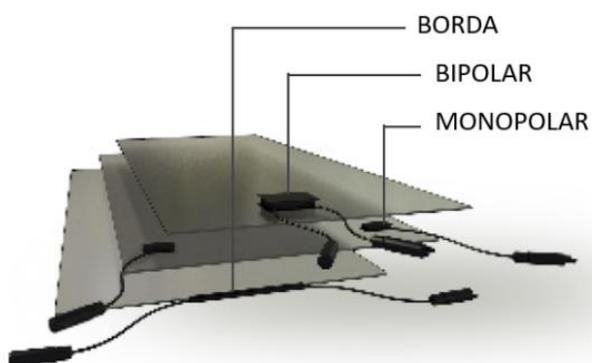
Além destes elementos, há ainda a “caixa de conexão”, componente que faz a conexão do vidro fotovoltaico às outras unidades, e à toda fiação do sistema, ilustrado pela Figura 11. A caixa de conexão também abriga diodos de desvio (*by-pass diodes*) para proteção de cada unidade de vidro fotovoltaico. Elas são conectadas à unidade de vidro fotovoltaico na borda ou na parte traseira da composição. A ligação elétrica desta caixa pode ser bipolar ou monopolar. O sistema bipolar é o mais utilizado para o vidro fotovoltaico, sendo que o sistema monopolar requer duas unidades por módulo, conforme ilustrado pela Figura 12. Todo o cabeamento é feito por meio dos perfis de alumínio da estrutura de suporte, que possuem espaços internos de forma a possibilitar a passagem dos cabos até os inversores, e também entre as placas, como ilustra a Figura 13.

Figura 11 – Caixa de conexão para vidros fotovoltaicos



Fonte: GeoDesign Internacional. Disponível em <<http://vidrofv.geodesign.com.br>>. Acesso em 11 mai. 2019

Figura 12: Tipos de caixa de conexão em vidros fotovoltaicos



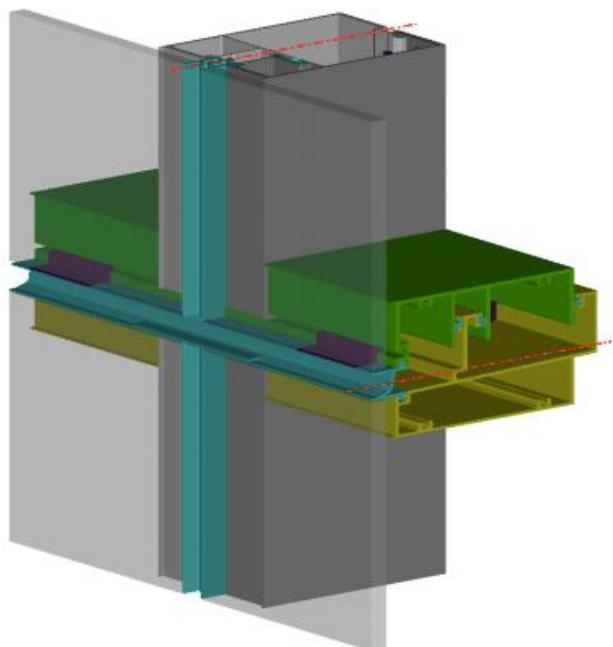
Fonte: Onyx Solar. Disponível em <<https://www.onyxsolar.com/documents/Professional-Experience-Book-English.pdf>> .Acesso em 04 abr.2019. Tradução nossa

Para uso em fachadas, o vidro fotovoltaico mais adequado, segundo Ricardo Escada Chohfi<sup>19</sup> (2019) é o de silício amorfo (a-Si) pois pelo próprio processo de fabricação, através da deposição de vários tipos de silício tratado em uma superfície de vidro, seguido de gravação a laser para estabelecer as ranhuras das células, cria-se

<sup>19</sup> Informação fornecida por Reinaldo Escada Chohfi, sócio gerente da empresa GeoDesign Internacional, por e-mail. São Paulo, março de 2019.

transparência de até 30 % como ilustrado pela Figura 9, proporcionando um nível suficiente de visão para o ambiente externo. Além disto, possui maior capacidade de captação da radiação difusa, fundamental para a condição de utilização em fachadas visto que a inclinação dos módulos neste caso é de 90°, sujeitos ao sombreamento de edificações no entorno. Além disto, os módulos de (a-Si) possuem uma maior flexibilidade no que tange às formas e cores.

Figura 13: Detalhe do sistema de suporte dos vidros em fachadas unitizadas com espaços internos, e que podem servir diretamente ao propósito de cabeamento dos sistemas fotovoltaicos de fachada ou indiretamente, ao receber perfis complementares com esta finalidade



Fonte: Imagem fornecida pelo Eng. Julio César Petrucci por e-mail em 23/05/2019

### 4.2.1. Exemplos de BIPV em fachadas

No que tange aos BIPV, diversos edifícios, principalmente na Europa e Estados Unidos, já foram concebidos para a integração fotovoltaica por meio dos BIPV. Os primeiros casos datam de 2003. Os principais fabricantes estão localizados nessas regiões, sendo que no Brasil não há muitos casos, devido principalmente a baixa oferta de fabricantes nacionais, e ao elevado custo de importação de componentes de sistemas já consolidados internacionalmente.

Há diversos exemplos de aplicação de BIPV em fachadas de edifícios comerciais, em diferentes países, conforme ilustrado a seguir:

Quadro 6 - Exemplo de aplicação de BIPV em Lisboa – Portugal



Empreendimento	Nature Towers
Localização	Lisboa – Portugal
Tipo de módulos	Células laminadas entre dois vidros
BIPV	Trechos opacos da fachada
Fabricante	Ertex Solar (Áustria)
Potência instalada	53,6 kWp

Fonte: Ertex Solar. Disponível em: [https://www.ertexsolar.at/fileadmin/user\\_upload/ReferenzenNeu/Fassade/VSG/PT\\_FACADE\\_nature\\_towers\\_VSG.pdf](https://www.ertexsolar.at/fileadmin/user_upload/ReferenzenNeu/Fassade/VSG/PT_FACADE_nature_towers_VSG.pdf). Acesso em 12 mar. 2019

Quadro 7 - Exemplo de aplicação de BIPV em Copenhague - Dinamarca



Empreendimento	Copenhagen International School
Localização	Copenhague – Dinamarca
Tipo de módulos	Células laminadas entre dois vidros – Kromatix®
BIPV	Trechos opacos da fachada
Fabricante	Swiss INSO (Suíça)
Potência instalada	720 kWp

Fonte: Swiss INSO. Disponível em: <<https://www.swissinso.com/cis>>. Acesso em 12 mar. 2019

Quadro 8 - Exemplo de aplicação de BIPV em Londres – Reino Unido



Empreendimento	Heron Tower
Localização	Londres – Reino Unido
Tipo de módulos	Células laminadas entre dois vidros (vidro insulado)
BIPV	Fachada – módulos semitransparentes
Fabricante	Scheuten Glass (Alemanha)
Potência instalada	153 kWp

Fonte: Solar Blogger. Disponível em: <<http://www.solarblogger.net/2018/05/bipv.html>>. Acesso em 12 mar. 2019

Quadro 9 - Exemplo de aplicação de BIPV em Paris - França



Empreendimento	Palácio de Justiça
Localização	Paris – França
Tipo de módulos	<i>Brise Soleil</i> fotovoltaicos
BIPV	Fachada – <i>Brise Soleil</i>
Fabricante	ISSOL (Bélgica)
Potência instalada	325 kWp

Fonte: Issol. Disponível em:

<[http://www.issol.eu/wpcontent/uploads/2016/03/Project\\_Datasheets.pdf](http://www.issol.eu/wpcontent/uploads/2016/03/Project_Datasheets.pdf)>. Acesso em 12 mar. 2019

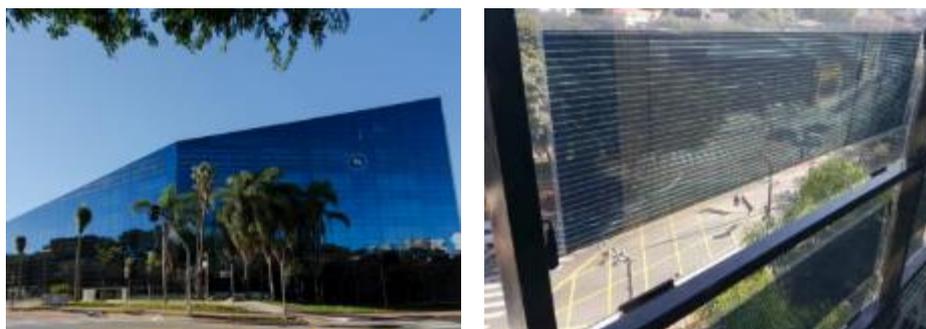
Quadro 10 - Exemplo de aplicação de BIPV em Manchester – Reino Unido



Empreendimento	CIS Solar Tower
Localização	Manchester – Reino Unido
Tipo de módulos	Placas sílicio poli cristalino
BIPV	Fachada opaca – Curtain Wall
Fabricante	Sharp (Reino Unido)
Potência instalada	391 kWp

Fonte: PVdatabase Disponível em: <[http://www.pvdatabase.org/projects\\_view\\_details.php?ID=363](http://www.pvdatabase.org/projects_view_details.php?ID=363)>. Acesso em 12 mar. 2019

Quadro 11 - Exemplo de aplicação de BIPV em São Paulo – SP – Brasil



Empreendimento	Sêneca
Localização	São Paulo
Tipo de módulos	Organic PV laminado (entre vidros)
BIPV	Fachada
Fabricante	Sunew (Brasil)
Potência instalada	2 kWp

Fonte: Arcoweb. Disponível em: <<https://www.arcoweb.com.br/projetodesign/tecnologia/finestra-inovalli-real-state-e-banco-de-ideias-edificio-seneca-sao-paulo>> Acesso em 12 mar. 2019

Quadro 12 - Exemplo de aplicação de BAPV em São Paulo – SP – Brasil



Empreendimento	Centro Administrativo Tatuapé Itaú-Unibanco S.A.
Localização	São Paulo
Tipo de módulos	Vidro fotovoltaico de silício amorfo laminado
BAPV	Fachada ventilada
Fabricante	Onyx Solar (Espanha)
Potência instalada	10,6 kWp

Fonte: Chohfi (2018)

### 4.3. Normatização para os BIPV

No Brasil ainda não há uma norma específica para os BIPV, as normas técnicas em vigor, compiladas na Tabela 3 são relacionadas à sistemas fotovoltaicos gerais e sua interface de conexão com a rede elétrica.

Tabela 3 - Normas técnicas brasileiras em vigor relacionadas à sistemas fotovoltaicos

<b>CÓDIGO ABNT</b>	<b>TÍTULO</b>
<b>NBR IEC 62116:2012</b>	Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica
<b>NBR 16149:2013</b>	Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição
<b>NBR 16150:2013</b>	Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade
<b>NBR 16274:2014</b>	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho

Internacionalmente, porém, em 2016 entraram em vigor as normas europeias EN 50583-1: Sistemas Fotovoltaicos em Edifícios - Parte 1: módulos BIPV e a EN 50583-2: Sistemas Fotovoltaicos em Edifícios - Parte 2: sistemas BIPV. Estas normas se aplicam a módulos e sistemas fotovoltaicos usados como produtos de construção e referenciam padrões internacionais, relatórios técnicos e diretrizes, dirigidas a fabricantes, planejadores, projetistas de sistemas, instaladores, institutos de testes e autoridades de construção.

A EN 50583-1 (CENELEC, 2016) é aplicada aos módulos fotovoltaicos que são utilizados como produto de construção, focando nas propriedades destes módulos fotovoltaicos relevantes para atendimento dos requisitos essenciais do edifício, conforme especificado na Norma Europeia de Produtos para Construção CPR 305/2011, além de propriedades e requisitos eletrotécnicos aplicáveis (Norma de Baixa Tensão 2006/95/EC). Tais documentos abordam os requisitos aplicáveis especificamente aos módulos fotovoltaicos, não incluindo, portanto, requisitos

aplicáveis à sua estrutura de suporte, os quais são tratados no âmbito da EN 50583-2.

A EN 50583-2 (CENELEC, 2016) é aplicada aos sistemas fotovoltaicos que estão integrados aos edifícios com os módulos fotovoltaicos utilizados como um insumo da construção civil, focando nas propriedades destes sistemas fotovoltaicos e na estrutura de montagem para integração relevantes para os requisitos essenciais do edifício, conforme especificado na Norma Europeia de Produtos para Construção CPR 89/106/EEC, além de propriedades e requisitos elétricos específicos (Norma LVD 2006/95/EC).

#### **4.3.1. Especificações normativas de desempenho para os BIPV**

A definição de desempenho segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013) é:

*“Desempenho é o comportamento em uso de uma edificação e seus subsistemas, em que os edifícios e seus subsistemas devem cumprir suas funções quando sujeitos a ações de diversas naturezas ao longo de sua vida útil”*

A mesma norma define requisitos de desempenho como:

*“as condições que expressam qualitativamente os atributos que a edificação habitacional e seus sistemas devem possuir, a fim de que possam atender as requisitos do usuário e define também critérios de desempenho como as especificações quantitativas dos requisitos de desempenho, expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados.”*

Em relação aos sistemas BIPV destaca-se que estão sujeitos a um conjunto de requisitos gerais, conforme especificado na Norma Europeia do Produto de Construção CPR 305/2011, relacionados a:

- Economia de energia e retenção de calor;
- Higiene, saúde e meio ambiente;
- Isolamento térmico e acústico;
- Proteção contra intempéries: chuva, neve, vento e granizo;
- Resistência mecânica e estabilidade;
- Segurança em uso e operação;

- Segurança em caso de incêndio;
- Separação entre ambientes internos e externos e,
- Utilização sustentável dos recursos naturais.

Ainda de acordo com normativas internacionais, como são produtos de construção, os módulos BIPV e a sua estrutura de montagem, devem ser concebidos de forma a suportar cargas de vento, de neve (no caso de países de clima frio) e mecânicas, bem como outros requisitos estabelecidos nos *Eurocode* EN 1990, EN 1991, EN 1993, EN 1995 e EN 1999.

No Brasil, no que se refere ao desempenho de subsistemas de vedação vertical exterior, podemos fazer um paralelo à norma NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Essa norma, traz o mesmo conjunto de requisitos gerais aplicados às edificações da norma europeia, com exceção ao item “retenção de calor”, visto que o Brasil é um país tropical, não havendo sentido nesse requisito para as edificações, ou seja, no que tange às especificações de desempenho, pode-se adotar a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) com referência inicial para avaliação de aspectos relacionados à segurança de utilização do BIPV, complementada por requisitos específicos que serão apresentados com base nas normativas internacionais.

As normas EN 50583 – 1 e 2 (CENELEC, 2016) compilaram os requisitos aplicáveis a cada categoria, já mencionadas na sessão 4.2 da presente monografia. A Tabela 4 foi elaborada baseada na referida família de normas, com requisitos complementares para o BIPV que contenham vidros e que sejam aplicáveis às fachadas. Além das informações presentes nas normas europeias, foram acrescentadas referências normativas brasileiras, para subsidiar o processo de avaliação técnica da aplicação da tecnologia.

Tabela 4 - Requisitos para os BIPV que contenham painéis de vidro segundo as Normas EN 50583-1 e 2 e Normas brasileiras de conteúdo equivalente

REQUISITOS	NORMAS INTERNACIONAIS	TÍTULO/COMENTÁRIOS	NORMAS BRASILEIRAS DE CONTEÚDO EQUIVALENTE
Resistência mecânica e estabilidade	EN 12179 EN 13116	Fachadas cortina: Resistência à carga de vento - Método de teste e Requisitos de desempenho	NBR 10821-1 a 5
	EN 12488	Vidro no edifício - Recomendações de vidros - Princípios de montagem para vidros verticais e inclinados	NBR 7199 NBR 14697
	EN 12600	Vidro na construção - Testes de pêndulo - Método de teste de impacto e classificação para vidro plano	NBR 7199 NBR 14697
Segurança em caso de incêndio	EN 13501-2	Classificação de incêndio dos produtos de construção e elementos de construção — Parte 2: Classificação utilizando dados de ensaios de resistência ao fogo, excluindo os serviços de ventilação	IT <sup>21</sup> 08 a 11 NBR 15575
Higiene, saúde e meio ambiente	EN 13022-2 ETAG <sup>22</sup> 002	Selantes para vidros em fachadas cortina.	NBR 15737
Proteção contra ruídos	EN 12758	Vidro na construção — Vidros e Isolamento Acústico — Descrições do produto e determinação das propriedades	NBR 7199 NBR 15575
Economia de energia e retenção de calor	EN ISO 12631 EM 673	Método de cálculo para resistência térmica e transmitância térmica de construção de fachada	NBR 15220 – 2;4 e 5 NBR 15575

<sup>21</sup> Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo

<sup>22</sup> *European Technical Approval*

		Determinação da transmitância térmica de vidros (Valor-U) — Método de cálculo	
	EN 410	Vidro na construção — Determinação das características luminosas e solares dos vidros Cálculo das características de luz e energia solar. Aplicável somente se a camada interior é transparente ou translúcida.	NBR 16023
	EN 15804	Sustentabilidade das obras de construção — Declarações ambientais de produtos — Regras fundamentais para a categoria de produtos de construção	-
Utilização sustentável dos recursos naturais	CEN/TR <sup>23</sup> 15941	Sustentabilidade das obras de construção - Declarações ambientais de produtos — Metodologia para seleção e uso de dados genéricos	-
	EN 15942	Sustentabilidade das obras de construção — Declarações ambientais de produtos — Formato de comunicação <i>business-to-business</i>	-
	EN 15978	Sustentabilidade das obras de construção — Avaliação do desempenho ambiental dos edifícios — Método de cálculo	-

<sup>23</sup> Technical Report of European Committee for Standardization

Ainda em relação a requisitos de desempenho, os vidros fotovoltaicos na Europa, de acordo o fabricante Onyx Solar (2019)<sup>24</sup>, devem ser submetidos a ensaios embasados nas seguintes normas:

- IEC 61215: 2005 - Módulos fotovoltaicos terrestres de silício cristalino (PV) – qualificação e homologação de projeto
- IEC 61730-1:2007 - Qualificação de segurança para módulos fotovoltaicos para uso construtivo.
- IEC 61646:2009 - Módulos fotovoltaicos de filme fino – Especificações de projeto e ensaios.
- UL 1703 - Módulos e Painéis Fotovoltaicos de Placa Plana.
- EN 14449 - Vidro no edifício. Vidro laminado e vidro de segurança laminado. Avaliação de conformidade / padrão de produto

No Brasil não há normas correspondentes às normas mencionadas acima. Segundo a Portaria nº 004/2011 em seu anexo 1, os procedimentos de ensaios para os módulos fotovoltaicos, devem ser realizados tendo as normas IEC 61125:2005 e IEC 61646:2009 como referência. (INMENTRO, 2011)

#### **4.4. Orientações gerais para o dimensionamento de BIPV**

O projeto do BIPV realizado de forma integrada com as demais disciplinas de projeto, potencializa o aproveitamento do partido arquitetônico para aplicar os módulos de geração em função da sua localização geográfica e do seu entorno. Cabe ao projetista selecionar uma posição para o módulo que considere as questões arquitetônicas e necessidades de geração, explorando uma orientação solar que potencialize a eficiência do sistema.

Santos (2014) em seu trabalho, produziu diversos ábacos que mostram o potencial da radiação em todas as capitais brasileiras com variação no azimute e inclinação dos módulos fotovoltaicos. As áreas com diferentes cores da Figura 12, indicam os

---

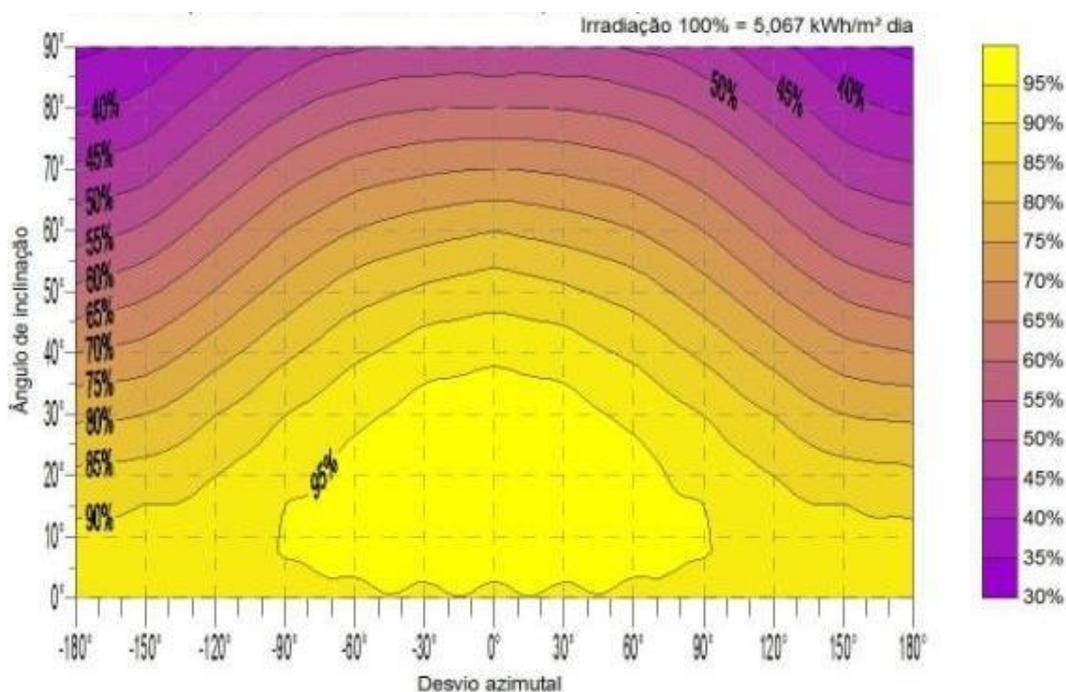
<sup>24</sup> Informação obtida pelo catálogo do produto “*Photovoltaic Glass for Buildings*” Disponível em: < <https://www.onyx-solar.com/documents/Professional-Experience-Book-English.pdf>> .Acesso em 04 abr. 2019

percentuais de irradiação recebidos pelas superfícies em função do ângulo de inclinação das placas.

A intensidade de irradiação recebida em cada plano que contém as placas fotovoltaicas é influenciada diretamente pela: longitude, latitude, orientação e inclinação em relação ao plano horizontal. Santos (2104) cita que o posicionamento dos módulos fotovoltaicos em relação à orientação ao norte geográfico (azimute) e à inclinação vertical, são elementos fundamentais para permitir a captação da maior irradiação solar possível. Dias (2014) complementa a discussão, ao qualificar uma grandeza que representa a porcentagem [%] de irradiação incidente sobre um plano, considerando sua orientação e inclinação, chamada de fator de orientação.

O ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies na cidade de São Paulo – SP (Figura 14) mostra nas cores mais claras as orientações e inclinações que estão expostas aos índices mais altos de irradiação solar ao longo do ano, e nas cores mais escuras as menores incidências de irradiação. No eixo horizontal encontram-se as variações de orientação ( $0^\circ$  indicando o Norte, com variações de  $+180^\circ$  e  $-180^\circ$ ), e o eixo vertical apresenta as variações de inclinações da superfície (de  $0^\circ$  indicando uma superfície horizontal e  $90^\circ$  indicando uma parede vertical). (SANTOS, 2014)

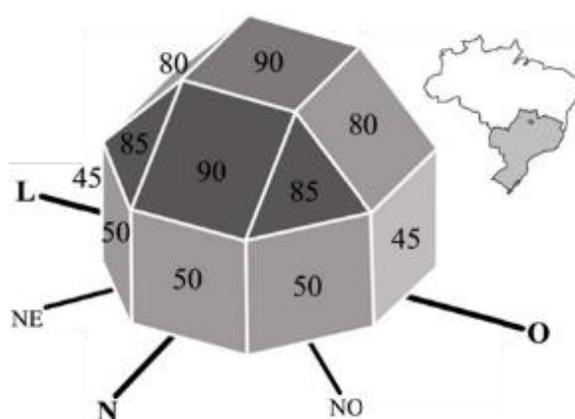
Figura 14 - Ábaco do potencial de radiação recebido pelas superfícies em São Paulo – SP



Fonte: Santos, 2013

Dias (2014) por sua vez, elaborou um ábaco volumétrico (Figura 15), com base nos valores presentes no ábaco da Figura 14 da pesquisa de Santos (2014) de forma a destacar o valor dos fatores de orientação em diferentes superfícies. Nota-se pelos ábacos que na cidade de São Paulo as máximas irradiações são obtidas em azimute entre  $-60^\circ$  e  $+60^\circ$  e com inclinação entre  $5^\circ$  e  $30^\circ$ . No caso de as placas estarem localizadas em fachadas com uma inclinação de  $90^\circ$ , o fator orientação em que é obtido o máximo de aproveitamento de acordo com o ábaco é de 50 % com desvios azimutais entre  $-60^\circ$  e  $+60^\circ$ , com isso, o valor do total de radiação solar que atinge o BIPV seria de  $2,53 \text{ kWh/m}^2$ .

Figura 15 - Ábaco volumétrico representativo das porcentagens [%] do potencial de radiação recebido por diferentes inclinações na cidade de São Paulo.



Fonte: Dias, 2014

Apesar da diferença significativa entre a geração pela cobertura e as fachadas (cerca de 50%) devido à diferença de inclinação dos módulos, esse valor limita, mas não impede o uso da tecnologia, uma vez que a área disponível nas fachadas é muito superior à área disponível na cobertura, bem como a geração pelas fachadas não compete com outros usos de superfície assim como ocorre em coberturas. (SANTOS, 2015).

No caso de fachadas o maior limitante é a necessidade de luminosidade associado à transparência. No projeto deve-se haver um balanceamento entre as necessidades dos usuários do edifício e o potencial de geração de energia pois como já discutido,

em vidros fotovoltaicos a capacidade de produção de energia é inversamente proporcional à transparência.

O dimensionamento da potência a ser instalada em uma integração BIPV pode ser feito de acordo com as necessidades da edificação, que pode ser: buscar um balanço energético zero, dependendo do tipo de tarifação existente no país; instalar o máximo possível para ter na tarifa prêmio, uma fonte de receita; ou ainda instalar conforme as possibilidades da composição arquitetônica. Em qualquer caso, este dimensionamento influenciará diretamente a arquitetura do edifício. (THOMAS, 1999<sup>25</sup> *apud* SANTOS, 2014).

Após o cálculo do valor estimado da radiação solar que atingirá o BIPV em determinado projeto, deve-se calcular o potencial de geração (potência instalada ou capacidade instalada de projeto do sistema), esse valor é obtido multiplicando a potência nominal do módulo pelo número de componentes a serem instalados na fachada, conforme a eq. **(1)**.

$$P_{BIPV} = P_{módulo} * n \quad (1)$$

Sendo que:

$P_{BIPV}$  = potência instalada de projeto em corrente contínua em kWp

$P_{módulo}$  = potência instalada de um módulo - valor fornecido pelo fabricante em (kWp)<sup>26</sup>.

$n$  = número de módulos em função da área disponível para a instalação do sistema BIPV

Dias (2014) destaca que a eficiência nominal dos módulos é um dos atributos mais importantes dos módulos fotovoltaicos, e traz implicações diretas sobre o rendimento do sistema e sobre a área de aplicação do plano de geração. Destaca-se que na eq. **(1)**, no valor da potência instalada do módulo já está sendo considerada a eficiência com base na potência nominal informada pelo fabricante do módulo ou sistema, que é medida nas “Condições Padrão de Teste” (STC)<sup>20</sup>.

<sup>25</sup> THOMAS, R. Photovoltaic in buildings: a design guide. Londres: ETSU, 1999.

<sup>26</sup> Wp (watt-pico) é a potência nominal dos módulos fotovoltaicos, testada em laboratório em STC (Standard test conditions) com irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>, massa de ar de 1,5 e temperatura da célula de 25°C).

Em tais condições padronizadas de teste (STC), se considera uma geração máxima (de pico) de 1kW / m<sup>2</sup> (base 100) Isso significa que se os módulos fossem 100% eficientes, seria necessária uma área de 1 m<sup>2</sup> para obter um sistema com uma potência de pico de 1kW. Essa relação é dada pela eq. **(2)**.

$$P_{módulo} = A_{módulo} * E_{módulo} \quad (2)$$

Sendo que:

$P_{módulo}$  = potência instalada de um módulo, valor fornecido pelo fabricante em kWp (quilowatt pico)

$A_{módulo}$  = área de um módulo em m<sup>2</sup>

$E_{módulo}$  = eficiência nominal do módulo em %

A partir da capacidade instalada de projeto do BIPV das fachadas de uma edificação, é possível quantificar a geração de energia elétrica através da conversão fotovoltaica.

Dias, (2014) destaca que a produção de energia de um sistema fotovoltaico é, em termos gerais, a quantidade de energia incidente sobre determinada área do plano de geração, menos uma série de coeficientes de minoração, definidos neste caso por: fator orientação, eficiência dos módulos e desempenho do sistema. A estimativa de produção energética diária do sistema é dada pela eq. **(3)**, adaptada de Dias (2014) e Zomer (2014).

$$E = I * FO * P_{BIPV} * PR \quad (3)$$

Sendo que:

$E$  = Geração solar fotovoltaica diária (kWh).

$I$  = Irradiação diária recebida no plano do painel fotovoltaico (kWh/m<sup>2</sup>.dia)

$FO$  = Fator de orientação em %, obtido através das Figuras 9 ou 10

$P_{BIPV}$  = potência instalada em kWp, obtido através da eq.**(1)**.

$PR$  = Rendimento do sistema (inversor e conexões). Observação: A efetiva medida do  $PR$  de um sistema fotovoltaico só pode ser conhecida com o acompanhamento do desempenho do sistema em funcionamento, porém para estudos iniciais é utilizado tipicamente o valor 0,80 por ser a média dos valores frequentemente encontrados na literatura (0,75 a 0,85). (ZOMER, 2014)

Observação: Caso sejam necessários para estudos iniciais os valores de produção de energia mensais ou anuais, deve-se efetuar as devidas conversões na eq. (2).

#### 4.4.1. Análise do rendimento

A estimativa do desempenho a longo prazo dos sistemas fotovoltaicos é um fator crucial para avaliar adequadamente a sua viabilidade (capacidade de geração x custo da geração de eletricidade fotovoltaica) e, conseqüentemente, a rentabilidade e atratividade das diferentes tecnologias. A combinação de fenômenos, tais como a radiação solar média disponível no local, condições de manutenção (sujidades / presença de poeira), sombreamento ou a radiação UV (responsável pela elevação de temperatura da superfície das células fotovoltaicas e conseqüente perda de rendimento), afetam de maneira diferente o desempenho real de cada um dos sistemas fotovoltaicos disponíveis. (Aste *et al*, 2016)

As principais formas de avaliar o rendimento de um sistema fotovoltaico são através de seu *yield*, e através de sua *performance ratio* (PR). Com estes índices é possível comparar sistemas com diferentes configurações, dimensões, tecnologias e localizações (MARION *et al.*, 2005<sup>29</sup> *apud* ZOMER, 2014).

A produtividade de um sistema, do inglês *yield*, reflete o desempenho de cada sistema fotovoltaico normalizado em relação à potência instalada. Matematicamente, é o resultado da divisão da energia elétrica total gerada pelo sistema na saída do inversor em determinado intervalo de tempo, dividido pela potência nominal do sistema fotovoltaico (kWh/kWp) (MARION *et al.*, 2005<sup>21</sup> *apud* ZOMER, 2014) e está diretamente relacionado à disponibilidade de irradiação solar na superfície dos módulos fotovoltaicos. Ela permite comparar sistemas fotovoltaicos de diferentes

---

<sup>29</sup> MARION, B.; ADELSTEIN, J.; BOYLE, K.; HAYDEN, H.; HAMMOND, B.; FLETCHER, T.; CANADA, B.; NARANG, D.; SHUGAR, D.; WENGER, H.; KIMBER, A.; MITCHELL, L.; RICH, G.; TOWNSEND, T. Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems. In: 31st IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition, 2005a. Anais. Lake Buena Vista, Florida: NREL/CP-520-37358, 2005a.v.p. 1601-1606.

tamanhos pois normaliza a produção de energia em relação a potência nominal. (SILUK, 2017)

Já a taxa de desempenho, do inglês *performance ratio*, é a relação entre a produtividade (*yield*) e a irradiação incidente medida por um período anual de operação. Essa relação, expressa em porcentagem, é um parâmetro para avaliar a geração de energia elétrica de um dado sistema fotovoltaico, por levar em consideração a potência real do sistema sob condições de operação e todas as perdas envolvidas. (SILUK, 2017). Em outras palavras, *expressa* o desempenho real de um sistema fotovoltaico em comparação com o mesmo sistema sem perdas, para uma mesma localização geográfica e indica o quanto o sistema real se aproxima do sistema ideal, ou seja, a relação entre o rendimento esperado e o rendimento real do sistema. (BLAESSER, 1997<sup>30</sup> *apud* ZOMER, 2014).

Para Zomer (2014) o desempenho dos sistemas fotovoltaicos pode variar de 60 a 90%, sendo que PR abaixo de 70% são considerados baixos e acima de 80% considerados bons.

Vários parâmetros podem afetar o rendimento de um gerador fotovoltaico, tanto em função da tecnologia propriamente dita, quanto em relação a fatores externos. O principal fator externo de influência é a irradiação, que depende, como já mencionado fundamentalmente da localização geográfica da instalação, e do regime climatológico local, bem como de sua inclinação e orientação, além de possíveis sombreamentos. O sombreamento parcial dos módulos e o seu estado de limpeza também influenciam no desempenho do sistema gerador. (BURGER *et al*, 2006 <sup>31</sup>RÜTHER, 2004<sup>32</sup> *apud* ZOMER, 2014).

A temperatura dos painéis também influencia o rendimento pois quanto maior a temperatura de operação em relação à temperatura padrão, menor a eficiência de conversão da radiação solar em eletricidade. Os módulos de silício cristalino podem perder cerca de 0,4% de eficiência a cada 1 °C de aumento de temperatura (IEA,

---

<sup>30</sup> BLAESSER, G. PV system measurements and monitoring the European experience. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. Issue 1-4, v.47, p.167-176, 1997.

<sup>31</sup> BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy*. Issue 1, v.80, p.32-45, 2006.

<sup>32</sup> RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

1995<sup>33</sup> *apud* SANTOS, 2014). Segundo Morais (2009), o aumento da temperatura mantém a fonte de corrente, mas diminui a tensão, diminuindo assim a potência fornecida pelos módulos.

Para as demais tecnologias de células fotovoltaicas, Dias (2014), efetuou um levantamento com base na pesquisa de Weller *et al* (2010)<sup>34</sup>, destacados na Tabela 5, sendo que os dados para as células do tipo OPV não foram encontrados na literatura nem em catálogos técnicos de fornecedores.

Tabela 5 - Perda de eficiência aproximada dos módulos mais comuns, para cada grau centigrado de variação da temperatura

TIPO DE CÉLULA		PERDA DE EFICIÊNCIA COM O AUMENTO DA TEMPERATURA (%/°C)
PRIMEIRA GERAÇÃO	silício monocristalino (m-Si)	04 a 0,5
	silício policristalino (p-Si)	04 a 0,5
SEGUNDA GERAÇÃO	silício amorfo (a-Si)	01 a 0,2
	telureto de cadmio (CdTe)	02 a 0,3

Um gerador fotovoltaico apresenta desempenho otimizado quando iluminado homogeneamente. Dada a característica construtiva da maioria dos módulos fotovoltaicos, em que as células solares individuais são conectadas em série, uma pequena sombra sobre uma destas células pode reduzir acentuadamente o rendimento de todo o sistema. Isto se deve ao fato de que a célula sobre a qual incidir a menor quantidade de radiação é que irá determinar a corrente e, portanto, a potência de operação de todo o conjunto a ela conectado em série (RÜTHER, 2004<sup>35</sup> *apud* ZOMER, 2014).

Para evitar este efeito, podem ser utilizados diodos de *by-pass*. Eles são conectados em paralelo com os módulos para impedir que, em uma associação em série, o mau funcionamento de um dos módulos devido a defeitos de fabricação ou condições de

<sup>33</sup> IEA. Photovoltaic in buildings: A design handbook for architects and engineers. Paris, 1995.

<sup>34</sup> WELLER, Bernhard et al. Photovoltaics: Technology, Architecture, Installation. Munich: edition DETAIL, 2010.

<sup>35</sup> RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

sombreamento influencie negativamente no desempenho de todo o gerador. (CRESESB, 2014)

As perdas pelo sombreamento podem ser minimizadas por um planejamento cuidadoso na fase de projeto, a fim de maximizar a radiação solar incidente. Simulações do caminho diário e anual das sombras podem ser realizadas para definir a posição dos módulos solares, além de se avaliar a orientação e forma do edifício para otimizar as premissas e os objetivos do projeto. Se o sombreamento não pode ser completamente evitado, seus efeitos podem ser reduzidos adaptando a forma, a tecnologia e conexão elétrica entre os módulos.

Santos (2015) realizou algumas simulações de forma a avaliar o efeito do sombreamento do entorno na geração em fachadas fotovoltaicas integradas aos edifícios, em três dos principais eixos de ocupação de edifícios de escritórios corporativos da cidade de São Paulo, sendo eles a Av. Paulista, Av. Brigadeiro Faria Lima e Marginal Pinheiros. Pela análise dos resultados, é possível observar que o impacto do sombreamento na geração de energia é considerável, variando entre 26% (melhor caso) até cerca de 50% (pior caso).

O mesmo autor também realizou simulações de modo a avaliar a melhor orientação de forma a haver uma maior exposição ao sol. Notou-se que a geração de energia nas fachadas norte e leste sofrem as menores perdas por sombreamento (23,1% e 24,3%, respectivamente), quando comparadas com as fachadas oeste e sul (38,2% e 42,1%). Esses resultados reforçam a importância de se considerar a orientação da fachada com maior exposição ao sol no momento de analisar a viabilidade da adoção do BIPV.

Esses resultados sugerem que o sombreamento é um fator importante a ser considerado na fase de projetos, embora não seja possível reconhecer na publicação do autor referência ao uso do diodo *by-pass* nas simulações, porém não impede a adoção da tecnologia BIPV em ambientes urbanos de densa ocupação, demonstrando que existem oportunidades de aplicação da tecnologia nas fachadas orientadas ao norte dos eixos de ocupação da Av. Paulista e Av. Faria Lima, bem como nas fachadas leste e oeste do eixo de ocupação da Marginal Pinheiros. (SANTOS, 2015)

Uma ponderação deve ser considerada visto que a vida útil dos módulos em termos de geração de energia é de 25 a 30 anos: a NBR 15575 (ABNT, 2013) recomenda que as vedações verticais externas apresentem uma vida útil de projeto (VUP) de no mínimo 40 anos. O trabalho focou na utilização de vidros fotovoltaicos, como já mencionado, as células fotovoltaicas fazem parte de uma camada do vidro. As fachadas unitizadas em vidro tradicional, com as devidas manutenções, apresentam uma VUP suficiente para atender à esse critério da norma, porém os módulos a partir do final de sua vida útil não estarão mais com uma capacidade de geração de energia fotovoltaica inicial. De acordo com informação fornecida por Gabriel Lungo Lopes (2019)<sup>36</sup>, representante de uma grande fabricante de vidros, o período de 30 anos considera o valor médio para se atingir o T-80 (80% de eficiência) ou seja 80% da potência pico instalada originalmente contudo, o sistema fotovoltaico nas tecnologias que são laminadas em vidro, tende a durar exponencialmente mais, devido a proteção gerada pelo material, superando os 40 anos exigidos para vedação vertical conforme norma de desempenho.

Estudo de desempenho de sistemas fotovoltaicos dispostos em coberturas realizado no Politecnico de Milano por Aste *et al* (2016) indicou a viabilidade de se adotar pelo menos 25 anos como vida útil de projeto de sistemas deste tipo, com base em estudos laboratoriais e de campo, durante um período de cerca de treze anos de operação, na cobertura de um dos edifícios principais da universidade. Destaca-se que embora naquela aplicação, tenham sido utilizadas placas tradicionais de silício policristalino, diferindo portanto dos vidros fotovoltaicos discutidos fundamentalmente neste trabalho, os resultados de Aste *et al* (2016) podem ser extrapolados em parte ao BIPV abordado na presente pesquisa. Os resultados dos autores, indicam por exemplo que um bom projeto (detalhamento e correta especificação de componentes) foi um dos principais responsáveis pela reduzida perda de desempenho a longo prazo: o decaimento medido do *performance ratio* foi igual a 0,37% / ano, contra cerca de 0,6 %/ ano - perda usualmente considerada em sistemas de silício monocristalino. Além disso, a inspeção visual e a análise mostraram que nenhum módulo apresentou algum dano significativo. Esses resultados indicam que os módulos continuarão a operar com significativa eficiência durante os 25 anos estimados para sua vida útil. Este

---

<sup>36</sup> Informação fornecida por Gabriel Lungo Lopes por e-mail. São Paulo, maio de 2019.

resultado é devido, além de um bom design do sistema durante a fase preliminar, ao uso de componentes de alta qualidade, e também a ventilação traseira dos módulos, o que evita o superaquecimento nos períodos mais quentes do ano além da manutenção periódica adequada como limpeza e verificação das vedações. Ainda segundo o estudo de Aste *et al* (2016), considerando as tarifas de energia e irradiâncias na localidade da pesquisa, e uma taxa de juros anual de 3%, o *payback* para a instalação foi de cerca de 13 anos, com um custo de operação e manutenção de cerca 0,05% ao ano, em relação ao custo total desta instalação.

#### 4.4.2. Análise de custos

A análise de custos e benefícios para a seleção de um determinado sistema fotovoltaico deve ser realizada com base no ciclo de vida do módulo fotovoltaico e do edifício. Na viabilidade deve-se tomar o cuidado de considerar o custo incremental da vedação vertical externa realizada com a integração de painéis PV, avaliando inclusive se haverá substituição de elementos de fachada (trechos de alvenaria, brises, painéis arquitetônicos, entre outros), a partir de uma visão de custo global (custo inicial e operação). Assim, caso haja substituição de uma vedação vertical inicialmente prevista em alvenaria com pintura, por um BIPV, haverá por exemplo a redução de custo de operação pela exclusão da necessidade de repintura a cada cerca de 5 anos, ficando este custo associado então à limpeza dos painéis. (POZZETTI, 2013, tradução nossa)

Para uma análise de viabilidade, deve se considerar ainda o custo da eletricidade produzida durante o tempo de vida da unidade produtora de energia, seja ela de origem renovável ou não, sendo designada por *Levelized Cost Of Electricity*, com a sigla LCOE, ou seja, é o preço que a energia precisa ser vendida para igualar os custos envolvidos durante todo o seu ciclo de vida. A unidade utilizada é custo por energia gerada (\$/kWh) e, com ela, pode-se comparar os custos de diferentes fontes de geração energética (DARLING *et al.*, 2011<sup>37</sup> *apud* ZOMER, 2014).

O indicador calcula os custos totais de um sistema produtor de energia elétrica durante o tempo de vida útil do sistema, incluindo os custos do Investimento (CAPEX)

---

<sup>37</sup> DARLING, S. B.; YOU, F.; VESELKA, T.; VELOSA, A. Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. *Energy & Environmental Science*. Issue 9, v.4, p.3133-3139, 2011.

e os custos de Manutenção e Operação (OPEX) e compara esse custo com a estimativa da eletricidade que o sistema irá produzir durante o mesmo período. (PEREIRA *et al*, 2016)

O ponto que viabiliza um sistema fotovoltaico é o em que o sistema tem custo nivelado (LCOE) menor ou igual àquele pago junto à rede (tarifa), sendo assim preferível utilizar o sistema ao invés da rede. O custo nivelado indica o valor máximo que a energia pode ter com base na taxa de atratividade utilizada, de modo a garantir seu retorno mínimo. (MIRANDA, 2013). Em termos matemáticos a sua expressão é dada pela eq. (4).

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{I_t + M_t + B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{t=n} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4)$$

Onde,

t = tempo em anos

n = vida útil do sistema em anos

r = taxa de desconto

I<sub>t</sub> = investimento inicial em t=0 ou de substituição em t(CAPEX)

M<sub>t</sub> = Custo de operação e manutenção em t(OPEX)

B<sub>t</sub> = Custo de energia auxiliar em t = n

E<sub>t</sub> = Estimativa de geração de energia elétrica no ano t

A vida útil de um sistema é um parâmetro que depende da tecnologia envolvida, condições de manutenção e uso, do local onde a mesma é instalada, pois situações agressivas do ponto de vista ambiental, como por exemplo a proximidade do mar, ou instalações sujeitas à forte agressão por tempestades de areias ou deposição de poeiras, diminuem fortemente o tempo de vida útil de uma instalação. (PEREIRA *et al*, 2016).

Em relação aos aspectos da manutenção de um BIPV, recorre-se à NBR 15575 (ABNT, 2013) que define a manutenção como o conjunto de atividades a serem realizadas para conservar ou recuperar a capacidade funcional da edificação e seus sistemas constituintes a fim de atender às necessidades e segurança de seus usuários.

Em consulta ao pesquisador Reinaldo Escada Chohfi (2019)<sup>38</sup>, o mesmo informou que um plano de manutenção de fachada com vidros fotovoltaicos deve considerar:

- Limpeza a cada seis meses;
- Verificação regular da estrutura de suporte;
- Verificação regular da vedação de forma a manter a estanqueidade no caso de fachadas do tipo unitizada;
- Verificação periódica do funcionamento dos componentes elétricos do sistema: conectores, cabos e inversores.
- Monitoramento periódico dos dados fornecidos pelos inversores de forma a verificar se a capacidade de geração está de acordo com a estimada.

Considerando essa manutenção periódica, é estimada uma vida útil entre 25 a 30 anos para o BIPV, em termos de geração de energia.

Pereira *et al* (2016) por sua vez considera a vida útil entre 20 e 25 anos, aceitando-se que com uma manutenção adequada e para efeitos de cálculo se possa utilizar um período de 25 anos. O custo do investimento inicial (CAPEX) e dos investimentos de substituição deverão ser obtidos de acordo com a dimensão dos sistemas e dependem fortemente do mercado no momento da avaliação. O custo anual da operação e manutenção do sistema (OPEX) é em geral considerado como uma porcentagem do investimento inicial. Nos sistemas fotovoltaicos tradicionais é comum se assumir uma taxa de cerca de 1% do investimento inicial para os custos de manutenção e operação ao ano.

Para análise da viabilidade e consideração dos investimentos na adoção de um BIPV, deve ainda se levar em conta a taxa de desconto, que é o parâmetro utilizado na análise de outros tipos de investimento, e que permite atualizar os preços numa análise do tipo *cash flow* (cálculo do Valor Atualizado Líquido - VAL ou o cálculo da Taxa Interna de Rentabilidade - TIR). Quanto maior for o risco de um investimento maior é a taxa de desconto atribuída. As taxas de desconto são variáveis de acordo com a evolução da economia. Em geral é utilizado um valor mínimo entre 6.0 a 7.0 %. (PEREIRA *et al*, 2016)

---

<sup>38</sup> Informação fornecida por Reinaldo Escada Chohfi por e-mail. São Paulo, março de 2019.

Outro parâmetro fundamental para análise de viabilidade, é a estimativa da energia elétrica produzida durante o tempo de vida útil vai, e dependerá de uma análise da produção de energia elétrica pela tecnologia e da forma como essa produção varia ao longo dos anos sendo que, em geral, existirá uma diminuição da produção ao longo da vida útil do sistema. No caso dos sistemas fotovoltaicos essa diminuição é tipicamente entre 0.5 % a 1% do valor estimado para a produção inicial. (PEREIRA *et al*, 2016)

#### 4.4.3. Recomendações gerais de projeto

Uma das fases mais importantes na implementação de tecnologias no processo de produção de edifícios é a etapa de projetos, em que de forma sistêmica cada uma das partes do edifício deve ser concebida para alcançar, potencialmente, o desempenho e a vida útil esperados pelos usuários com suas necessidades e requisitos bem definidos.

Destaca-se que para o BIPV, a fim de que sua integração ao edifício seja implementada com sucesso na etapa de construção é necessário que haja um equilíbrio de aspectos funcionais, estéticos e econômicos na fase de projetos, considerando:

- Caracterização do edifício: Deve-se levar em consideração o partido estrutural, arquitetônico e de instalações; em relação ao partido estrutural, as juntas entre os painéis PV devem considerar as deformações previstas nos elementos perimetrais do edifício. Além disto, os dispositivos de fixação e as cargas de trabalho do BIPV deverão ser consideradas previamente pelo projetista de estruturas. Além disto, o projeto para produção de estrutura deve considerar a imprecisão máxima admitida para desnivelamentos e desaprumos de elementos estruturais de fachada para não prejudicar nem encarecer a montagem do BIPV. Em consulta ao projetista de fachadas Julio Cesar Petrucci (2019)<sup>39</sup>, o mesmo informou que os desvios máximos em prumo e em nível que a estrutura do edifício pode atingir excepcionalmente, para que a ancoragem dos painéis de vidro seja adequada é de  $\pm 4$  cm.

---

<sup>39</sup> Informação fornecida por Julio Cesar Petrucci, engenheiro projetista de fachadas da empresa Petrucci Consultoria e Engenharia, por reunião. São Paulo, maio de 2019.

Em relação a arquitetura do edifício, importante destacar que além da influência significativa do BIPV na estética, dependendo da forma e da orientação do edifício em função de edificações vizinhas, haverá grande influência sobre a demanda por células PV e sobre a sua eficiência. Já no caso das instalações, aspectos relacionados à compatibilização da energia gerada com os padrões da concessionária e a forma de utilização: se baseada em injeção na rede ou em armazenamento, serão determinantes na fase de projetos. Além disto, a demanda por energia e os aspectos relacionados ao seu uso racional e às estratégias de eficiência energética do edifício condicionarão o uso do BIPV.

- Caracterização da região e do entorno: sombreamento, grau de insolação, temperatura, latitude, entre outros;
- Definição dos níveis de desempenho esperados: Com base nas expectativas dos clientes e em aspectos normativos, devem ser determinados para cada requisito de desempenho, níveis de atendimento, incluindo durabilidade, custo inicial, custo operação e de manutenção do edifício, e o prazo de execução das obras.
- Avaliação/Seleção da área adequada para a implementação do sistema PV: Assim como deve ser pensado o posicionamento dos módulos na fachada, também deve ser analisado o local de fixação do inversor e disjuntores. Esses devem ser instalados em local abrigado, de preferência no interior da edificação, seco e que não esteja sujeito a impactos ou manuseios por pessoas não autorizadas/habilitadas.
- Escolha da tecnologia a ser utilizada: O tipo de célula a ser utilizada depende das necessidades do projeto, como potencial nominal de geração de energia, grau de transparência, tamanho e forma dos módulos, efeito visual na fachada.
- Interação entre módulos e inversores: Os módulos fotovoltaicos ligados ao mesmo inversor devem ter a mesma orientação e ângulo de inclinação, a fim de agrupar os funcionamentos em condições semelhantes de modo a não haver interferência na capacidade de geração de módulos com orientações e inclinações diferentes.

- Estimativa do potencial de produção de energia elétrica por sistema PV: A estimativa deve incluir perfis da produção para diferentes escalas temporais. Uma série de softwares disponíveis disponibilizam dados de geração energética por sistemas fotovoltaicos a partir de bancos de dados de irradiação solar e de características dos sistemas, tais como tecnologia fotovoltaica utilizada, desvio azimutal e ângulo de inclinação dos módulos, eficiência do inversor, configuração de séries, existência ou não de sombreamento.

Dias (2014) compilou os principais exemplo de softwares, sendo eles: no âmbito internacional, o *Sunny Designs* da empresa de equipamento para sistemas fotovoltaicos SMA; nacionalmente, destacam-se o *SunData*, do CRESESB, e o RADIASOL, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Observação: Por não ser de aplicação direta neste trabalho o aprofundamento no uso dessas ferramentas computacionais, essa questão não será aprofundada.

- Cálculo do potencial econômico do sistema PV a implementar: O cálculo deve levar em conta:
  - i. A estimativa de custo do sistema e balanço energético anual, em relação ao consumo da edificação. O custo do Wp instalado é uma estimativa para uma informação básica sobre a previsão de custo do sistema (módulos mais inversores);
  - ii. Cobrança horo sazonal para edifícios corporativos – tarifas diferenciadas em que excedentes gerados ou armazenados possam ser consumidos ou comercializados;
  - iii. Aspectos relacionados ao custo de manutenção – limpeza da fachada para manter o rendimento esperado;
  - iv. Aspectos relacionados a manutenção preventiva e corretiva de sistemas de geração, conversão e armazenamento quando for o caso;
  - v. Perda de eficiência ao longo do tempo;
  - vi. Cenários de ocupação de entorno que futuramente façam reduzir a insolação;
  - vii. Custo da energia ao longo do tempo;
  - viii. Aspectos relacionados a eventual substituição ao término da vida útil das células e,

- ix. O valor que o cliente e a sociedade atribuirão a um edifício com uma fachada que gera energia limpa e renovável.

Um outro fator a ser levado em consideração no estudo de viabilidade e projetos é a comparação de custo entre os sistemas tradicionais de vedação em pele de vidro utilizado em larga escala principalmente em edifícios comerciais na cidade de São Paulo e um sistema BIPV aplicado com a mesma função de vedação, como “pele de vidro fotovoltaica”. Em linhas gerais o que difere uma fachada BIPV e uma fachada tradicional unitizada, seria o vidro em si e os inversores. O sistema de ancoragem e a estrutura das esquadrias são as mesmas. O projetista Julio Cesar Petrucci (2019)<sup>40</sup> também destacou que em fachadas tradicionais unitizadas, que o processo de aquisição se dá pela contratação individual do fornecedor de esquadrias para a estrutura da vedação e o fornecedor de vidros (que fornece o vidro para a colagem na estrutura de alumínio de forma a chegar já montado na obra para a ancoragem), cabendo portanto um gerenciamento de forma integrada destes fornecedores para que se mantenha uma garantia solidária do sistema . Dessa forma, o retorno do investimento deve ser considerado pelo custo do incremento do vidro fotovoltaico e componentes auxiliares, e não pelo custo total da fachada que se inclui as esquadrias.

---

<sup>40</sup> Informação fornecida por Julio Cesar Petrucci, engenheiro projetista de fachadas da empresa Petrucci Consultoria e Engenharia , por reunião. São Paulo, maio de 2019.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração fotovoltaica por meio dos BIPV às fachadas dos edifícios com vidros fotovoltaicos depende de processos de projeto, contratação e gestão de aplicação similares aos aplicáveis às atuais fachadas cortina unitizadas utilizadas em larga escala em edifícios corporativos no Brasil. Esta condição pode ser considerada como um facilitador para a difusão da tecnologia no país, desde que sejam considerados também os requisitos específicos do BIPV para assegurar o desempenho e vida útil da solução.

Os custos globais do uso e operação dos edifícios podem ser reduzidos com a racionalização do uso de energia elétrica, principalmente em horários de pico com a redução de consumo de energia da rede de forma a otimizar as tarifas das distribuidoras, em função da variação tarifária horo-sazonal, além de possibilitar menor dependência da energia que pode oscilar em termos de oferta em determinadas regiões nos horários de pico.

De outro lado, o BIPV, por ainda atender um nicho no mercado ainda reduzido, com componentes com dificuldades de importação (tempo e custo associados), falta de norma técnicas nacionais, carência de profissionais na área de projeto, ensino, instalação e fornecedores habilitados, a concorrência ainda é bastante reduzida impondo custos elevados e riscos de não se atingir os benefícios potenciais do uso desta tecnologia. Com o amadurecimento do mercado espera-se que tanto os custos como a qualidade sejam equiparáveis aos dos sistemas tradicionais e consolidados de fachada tipo cortina no Brasil.

O atual cenário brasileiro está oportuno para o desenvolvimento dos BIPV visto que, segundo dados da ANNEL (2019), a potência instalada acumulada de energia solar teve um crescimento de 99% de 2017 para 2018. Levando em conta somente a geração distribuída, o crescimento foi de 172%. Apesar de ainda pouco desenvolvido, possui grande espaço para crescimento, por meio de estímulos em decorrência de certificações ambientais, como por exemplo a certificação LEED, além de incentivos governamentais ainda insuficientes como pela isenção de ICMS para os componentes do sistema. Com isso, os BIPV em fachadas irão se consolidar à medida que a

tecnologia evolua e se difunda com uma redução dos custos de forma complementar à evolução em curso dos sistemas BIPV em coberturas.

O cálculo do incremento de custos pelo uso do BIPV não foi detalhado na presente monografia pela dificuldade de obtenção de informações precisas de custos junto aos fabricantes e projetistas, em sua grande maioria de fora do Brasil. Esse cálculo mais detalhado pode ser objeto de estudo em futuros trabalhos na medida que a tecnologia esteja mais presente no Brasil.

A partir do conteúdo discutido, com base em um levantamento bibliográfico, informações de fornecedores e projetistas foram identificados os principais pontos que devem ser considerados pelos projetistas, construtoras e incorporadoras para a análise de viabilidade de um projeto BIPV em fachadas de forma a utilizar o potencial da energia solar nos edifícios corporativos na cidade de São Paulo e nas grandes cidades brasileiras.

## 6. REFERÊNCIAS

ABES – **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2017. Disponível em:<  
[http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf)>. Acesso em: 04  
maio. 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 14697**: Vidro laminado.  
Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições,  
símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005. 8p.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de  
cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator  
solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15220-4**: Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição  
da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente  
protegida. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15737**: Perfis de alumínio e suas ligas com acabamento  
superficial - Colagem de vidros com selante estrutural. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ - **NBR IEC 62116**: Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para  
inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Rio de Janeiro,  
2012.

\_\_\_\_\_ - **NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro,  
2013.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho – Parte  
1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ - **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ - **NBR 16149:** Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ - **NBR 16150:** Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ - **NBR 16274:** Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_ - **NBR 7199:** Vidros na construção civil — Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10152:** Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10821-1:** Esquadrias para edificações Parte 1: Esquadrias externas e internas – Terminologia. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10821-2:** Esquadrias para edificações Parte 2: Esquadrias externas - Requisitos e classificação. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10821-3:** Esquadrias para edificações Parte 3: Esquadrias externas e internas - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10821-4:** Esquadrias para edificações Parte 4: Esquadrias externas - Requisitos adicionais de desempenho. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 10821-5: Esquadrias para edificações Parte 5: Esquadrias externas - Instalação e manutenção.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_ - **NBR 16673: Vidros revestidos para controle solar - Requisitos de processamento e manuseio.** Rio de Janeiro, 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica . Resolução Normativa 687, de 24 de novembro de 2015. **Diário Oficial da União**, 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informação de Geração** Brasília, Brasil. Disponível em [www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm)>. Acesso em 18 fev. 2019.

ARRUDA, T. S. **Estudos de modalidades para execução de fachada cortina.** 2010. 54 pág. Monografia (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ASTE, N.; DEL PERO, C.; LEONFORTE, F. **The first Italian BIPV project: Case study and long-term performance analysis.** Sol. Energy 2016, 134, 340–352.

BERNARDES, Maurício. **Um olhar para o futuro da energia solar.** 2015. Disponível em < <http://blogs.pini.com.br/posts/tecnologia-sustentabilidade/um-olhar-para-o-futuro-da-energia-solar-364227-1.aspx>> Acesso em 19 fev.2019

BRASIL. Decreto-lei nº 5.163 de 30 de julho de 2004. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF. 31 jul. 2004. Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm)> acessado em 18 fev. 2019

BROGREN, M.; GREEN, A. **Hammarby Sjostad-an interdisciplinary case study of the integration of photovoltaics in a new ecologically sustainable residential area in Stockholm**. Solar Energy Materials and Solar Cells. Issue 3-4, v.75, p.761-765, 2003.

BÜHLER, Alexandre José; DOS SANTOS, Fernando Hoefling; GABE, Ivan Jorge. **Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

CENELEC – European Committee for Electromechanical Standardization. **EN 50583-1: Photovoltaics in buildings – Part 1: BIPV modules**. Brussels. 2016

\_\_\_\_\_ - **EN 50583-2: Photovoltaics in buildings – Part 2: BIPV systems**. Brussels. 2016

CHOHFI, Reinaldo Escada. **Uma Fachada de Vidro Fotovoltaico de Silício Amorfo no Brasil**. In SmartEnergy. Paraná, 2018.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, CRESESB, 2014.

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

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia. **Relatório Final do Balanço Energético Nacional**. 2018. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados>

[abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_Int.pdf](#)>. Acesso em 19 fev.2019

European Commission Low Voltage Directive **LVD 2006/95/EC**. European Union Directive Brussels, 2006.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria do Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica**. USP. São Paulo, Brasil, 2012

GBC Brasil – **Green Building Council Brasil, Empreendimentos LEED**. Disponível em < <http://www.gbcbrazil.org.br/empreendimentos-leed.php>>. Acesso em 18 fev.2019

GALDINO, Janis Bezerra et al. **Caracterização de módulos fotovoltaicos orgânicos comerciais**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2018.

GOMES, Ana Silvia Schmidt. **Retrofit de Fachadas de Edifícios à luz da ABNT NBR 15.575**. São Paulo. 143 p. Monografia (Especialização em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2015

GSA – **Global Solar Atlas**, 2019. Disponível em <<https://globalsolaratlas.info/?c=11.609193,8.261719>>. Acesso em 25 fev.2019

IEA – International Energy Agency. **Electricity Information**, 2018. Disponível em <[https://webstore.iea.org/download/direct/2261?fileName=Electricity\\_Information\\_%202018\\_Overview.pdf](https://webstore.iea.org/download/direct/2261?fileName=Electricity_Information_%202018_Overview.pdf)>. Acesso em 19 fev. 2019

INÁCIO, Thais. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu**. 2009. viii, 72 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista , Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2009.

INMETRO. **Portaria 004** - Requisitos De Avaliação Da Conformidade Para Sistemas e Equipamentos Para Energia Fotovoltaica (Módulo, Controlador De Carga, Inversor e Bateria), 2011.

KREBS, F.. **Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques**. Solar Energy Materials & Solar Cells (2009) 93, 394-412

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

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. **Análise da Inserção de Geração Distribuída de Energia Solar Fotovoltaica no Setor Residencial Brasileiro**. Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

MORAIS, Josué. **Sistemas fotovoltaicos: da teoria à prática**. Lisboa: Ed. Martins Fontes, 2009.

OLIVEIRA, Paulo Henrique Breyner Saldanha de. **Avaliação do potencial de transformação do NIPE em uma edificação de energia zero**. 2017. 1 recurso online (95 p.). Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

PEREIRA, Manuel Collares; JOYCE, António; REIS, Pedro Cunha. **O valor e o custo da eletricidade produzida por sistemas Solares (Fotovoltaicos)(Levelised Cost of Electricity–LCOE, incentivos, política energética)**. Instituto Português de Energia Solar, Évora, 2016.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; MOORE, K.; et al. **A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation**. Solar Energy, v. 73, n. 5, p. 307–317, 2003.

POZZETTI, Luana. **Sistemi Fotovoltaici a bassa concentrazione per integrazione architettonica**. Tese de Doutorado. Università degli Studi di Ferrara, 2014.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos - Soluções energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília, Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2008.

RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.

SANTOS, Arthur Henrique Cursino dos. **Avaliação técnica e financeira da geração fotovoltaica integrada à fachada de edifícios de escritórios corporativos na cidade de São Paulo**. 2015. 186 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

SANTOS, Ísis Portolan dos et al. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista**. Florianópolis, 2009.

SANTOS, Ísis Portolan. **Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura**. Tese de Doutorado. PPGEC, Florianópolis: UFSC, 2009.

SANTOS, Í. P. DOS. **Minicurso Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) para Arquitetos e Engenheiros Civis** Recife International Energy Initiative, Florianópolis, 2014.

SCHMALENSEE, R. *et al.* **The future of solar Energy: An Interdisciplinary MIT Study**, MIT. Estados Unidos, 2015

SILUK, A. R. **Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico e suas relações com a arquitetura.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

VANNINI, Virgínia Czarnobay. **Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect.** Porto Alegre, UFRGS, 2011.

VEDOVELLO, Cintia Aparecida da Silva. **Gestão de projetos de fachadas.** 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012

ZOMER, Clarissa Debiazi et al. **Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações.** Florianópolis, 2014.