

BIPV E BAPV: AVALIAÇÕES A PARTIR DE CONCEITOS TEÓRICOS, DE ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS E DE ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO ENERGÉTICO PARA REGIÕES DE BAIXA LATITUDE

Renata Torres Farias – retorres_86@hotmail.com
Paulo Nazareno Monteiro Junior – nazareno.paulo@gmail.com
André Cavalcante do Nascimento – andre.nascimento@ifpa.edu.br
Luis Carlos Macedo Blasques – blasques@ifpa.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA
Filomena Mata Viana Longo – menamata@gmail.com
Marco Valério de Albuquerque Vinagre – valeriovinagre@gmail.com
Universidade da Amazônia – UNAMA

Resumo. *O presente trabalho trata das aplicações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) integrados à edificação, analisando aspectos conceituais e vantagens e desvantagens de sistemas plenamente integrados à edificação (BIPV) e sistemas aplicados à edificação (BAPV). O estudo é motivado pelo recente aumento do interesse, no mundo e mais especificamente no Brasil, em instalações com características de integração total à arquitetura. Para relacionar os aspectos teóricos à principal funcionalidade de um sistema fotovoltaico, a geração de eletricidade, análises de desempenho energético são realizadas para localidades de baixa latitude, onde as instalações predominantemente verticais distanciam-se de maneira mais evidente do caso ótimo. O Brasil possui 15 capitais de estados situadas em latitudes entre 11° Sul e 3° Norte, incluindo todas da Região Norte. Em função disto, a cidade de Belém, capital do Estado do Pará, é utilizada como estudo de caso, por apresentar latitude muito próxima a zero (1° 27' 21" S). Conclui-se que, caso o projeto FV seja pensado de forma totalmente conjunta ao projeto arquitetônico, em etapas preliminares, as aplicações do tipo BIPV apresentam bons resultados, principalmente por integrar os benefícios energéticos da geração FV com a integração arquitetônica e os melhores resultados estéticos, mesmo que o desempenho energético do sistema seja inferior ao obtido em instalações do tipo BAPV. No entanto, nota-se também que a disponibilidade de materiais FV propícios para instalações do tipo BIPV, no Brasil e mais especificamente na Região Norte, é escassa, o que ajuda a explicar a maior ocorrência, nos dias de hoje, de instalações mais simples, do tipo BAPV, principalmente em função dos custos mais elevados das instalações BIPV.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, SFCR, BIPV, BAPV, Desempenho Energético.*

1. INTRODUÇÃO

De forma geral, os sistemas fotovoltaicos (FV) podem ser classificados em dois grupos: sistemas conectados à rede e sistemas isolados. Os sistemas isolados foram as primeiras aplicações de sistemas FV instalados, no mundo e no Brasil, contemplando desde aplicações espaciais, as primeiras a utilizarem energia solar para geração de eletricidade, até os sistemas atuais para eletrificação de residências ou aglomerados populacionais. Porém, desde a década de 90, os sistemas FV conectados à rede (SFCR) vêm sendo utilizados no Brasil (Rampinelle e Krenzinger, 2007).

Tratando especificamente de SFCRs, este tipo de aplicação também pode apresentar dois tipos de configurações básicas: instalação integrada à edificação, como nas fachadas ou coberturas de prédios, e instalação de forma centralizada, como em uma usina geradora convencional (Rüther, 2004). A primeira aplicação pode entregar energia diretamente à rede elétrica, de forma distribuída, próximo ao consumidor final, reduzindo as perdas na transmissão e distribuição, que se traduz no conceito de geração distribuída (GD). Esta conexão à rede pública, combinada com a integração do sistema à edificação, é um exemplo de geração de energia elétrica ideal para ambientes urbanos (Rüther e Salamoni, 2011).

De forma ainda mais específica, os SFCR integrados à edificação podem apresentar outras duas classificações, mais recentes, que são objeto principal do presente trabalho: sistemas do tipo BIPV (sistemas FV integrados à edificação, do inglês “*Building-Integrated Photovoltaics*”) e do tipo BAPV (sistemas FV aplicados à edificação, do inglês “*Building-Applied Photovoltaics*”).

Independente da classificação, sistemas FV instalados em edificações vêm apresentando um potencial crescente de aplicações em todo o mundo e o Brasil já vem desenvolvendo alguns estudos sobre este tema. Sistemas FV são apropriados à integração em edifícios, pois são fabricados para suportar as intempéries, podendo operar satisfatoriamente por um período de 25 anos ou mais, compatíveis com a vida útil da edificação. Este mercado gera grandes perspectivas de crescimento à medida que arquitetos e construtoras tomam conhecimento da potencialidade desse tipo de sistema (Pereira, 2009). No entanto, muito ainda deve ser feito para que os sistemas FV integrados à

edificação ocupem maior espaço no cenário mundial de geração de eletricidade. Em 2010, por exemplo, 440 MW foram instalados em aplicações do tipo BIPV no mundo (Schuetze, 2013), porém, foi instalado um total de 16,6 GW de capacidade FV naquele mesmo ano, o que indica uma participação de instalações integradas a edificações de somente 2,6 %.

2. ASPECTOS CONCEITUAIS DE BIPV E BAPV

Um sistema BIPV consiste na utilização de elementos de geração fotovoltaica como parte funcional da estrutura do edifício, sendo arquitetonicamente integrados a ele (Peng et al., 2011). Em sistemas BIPV, os elementos de geração são chamados de materiais fotovoltaicos, e substituem materiais de construção convencionais, podendo atuar como material de vedação de coberturas e de fachadas dos prédios, nos brises e pérgolas, dentre outros (Jelle et al., 2012). A Fig. 1 apresenta exemplos de instalações do tipo BIPV, com materiais FV atuando como elementos de vedação da cobertura em (a), e de fachadas em (b), ambos com determinado grau de transparência.



Figura 1- Exemplos de BIPV (Peng et al., 2011).

Segundo Hagemann (2002), sistemas BIPV podem ser descritos como uma aplicação de sistemas FV funcionalmente, esteticamente e energeticamente integrada a um edifício.

Atualmente, a maior parte dos sistemas FV instalados no Brasil são aplicados a edifícios já construídos. Um sistema BAPV consiste na aplicação de módulos FV sobre a estrutura já construída da edificação, com características diferentes, ou não, de orientação e inclinação. Geralmente, esse tipo de sistema não substitui o material de vedação e nem a cobertura, são instalados sobrepostos à cobertura da edificação, necessitando de estruturas que sirvam como suporte e determinam a inclinação e a orientação dos módulos.

O Código Técnico da Edificação (CTE), publicado na Espanha, classifica os sistemas, quanto a sua integração na edificação, de duas formas: superposição de módulos FV e integração arquitetônica de módulos FV (Cerón et al., 2013). O segundo traduz exatamente o conceito de BIPV já apresentado; porém, o primeiro indica que a superposição de módulos FV ocorre somente quando estes equipamentos são instalados paralelamente à envoltória do edifício, porém sem a dupla função definida no conceito de BIPV. O CTE apresenta uma terceira possibilidade, denominada apenas de “geral”, que engloba sistemas instalados de forma não paralela à edificação. O presente trabalho agrupa estes dois últimos conceitos apresentados em uma única classificação, a de sistemas do tipo BAPV. A Fig. 2 apresenta dois exemplos de BAPV que seguem a linha de raciocínio aqui apresentada. Em (a) os módulos são instalados de forma paralela à cobertura da edificação, mas em (b) não.



Figura 2- Exemplos de BAPV (Peng et al., 2011; Blasques e Vale, 2012).

Apesar das inúmeras definições existentes, ainda hoje não se tem um consenso claro sobre quais sistemas se enquadram em cada categoria. Segundo Crassard e Rode (2007), os sistemas BIPV podem ser classificados em três níveis de integração: integração visual, adição construtiva, e integração construtiva, como apresentado na Fig. 3. No entanto, segundo a classificação apresentada anteriormente neste trabalho, a classificação em (c) seria exemplo clássico de BIPV, em (a) exemplo de BAPV, e em (b) estaria situada entre as duas, devendo ser analisada de forma mais específica para que seja classificada corretamente.

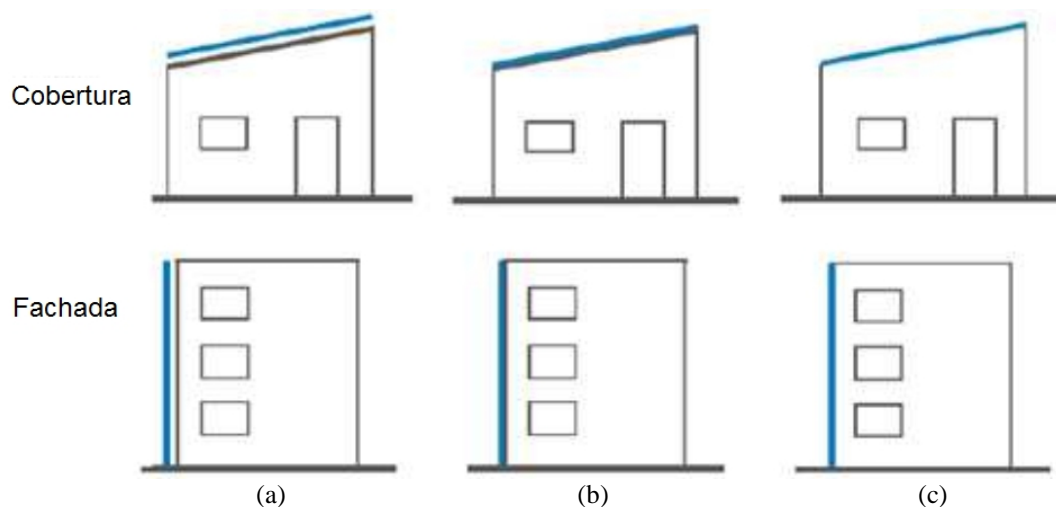


Figura 3- Tipos de integração fotovoltaica em edifícios: (a) integração visual; (b) adição construtiva; (c) integração construtiva. Adaptado de Crassard e Rode (2007).

3. ASPECTOS POSITIVOS E NEGATIVOS DE BIPV E BAPV

O objetivo comum de sistemas BAPV e BIPV é gerar eletricidade através da energia solar, porém a principal diferença entre esses dois sistemas está no grau de integração dos sistemas FV nas edificações (Peng et al., 2011).

Um sistema FV pode ser instalado tanto em edifícios já existentes como em novas construções, entretanto, devido a algumas vantagens, sistemas BIPV têm se mostrado uma das mais promissoras aplicações de produtos fotovoltaicos. Uma dessas vantagens é a combinação de geração limpa e arquitetonicamente atraente, que é um diferencial quando compara-se um edifício com BIPV a outros (Pereira, 2009). Mesmo com custos ainda elevados de produtos BIPV, os materiais tradicionalmente usados em coberturas, fachadas ou vidros podem ser substituídos por células ou módulos FV, o que gera uma redução de custos de materiais de construção (Peng et al., 2011). Outras vantagens relacionadas a sistemas BIPV estão no crescente mercado imobiliário, o que permite também um crescimento na integração de sistemas FV aos edifícios, pois a utilização de tais sistemas promove impacto visual e prestígio ao edifício (Hayter e Martin, 1998).

No entanto, o custo total do BIPV é maior que o do BAPV, devido ao custo mais elevado dos produtos BIPV, às complexas estruturas que precisam ser montadas para a integração dos módulos ao edifício e a sua difícil manutenção. Já em sistemas BAPV as estruturas, que têm como função o suporte, orientação e inclinação dos módulos, são mais simples de montar e manter, e os edifícios podem funcionar normalmente sem os módulos FV (Peng et al., 2011). Porém, os telhados dos edifícios já construídos podem necessitar de reforços, pois podem não ter sido projetados para suportar o peso adicional dos módulos e de suas estruturas de sustentação.

Os sistemas FV que são montados diretamente sobre o telhado, sem espaço para ventilação, apresentam um aumento na temperatura de operação do módulo, o que é um ponto negativo do sistema BAPV, pois o aumento da temperatura do módulo provoca uma queda de desempenho do sistema, diminuindo sua eficiência. Logo, a ventilação tem um papel importante no arrefecimento dos módulos (Hrica et al., 2011). Uma possível solução para minimizar este problema em sistemas BAPV é a instalação dos módulos em estruturas elevadas na cobertura, e não diretamente sobre o telhado, o que permite maior circulação de ar e conseqüente redução da temperatura de operação das células. Nestes casos, os módulos geram sombras na cobertura da edificação, com possibilidade de redução de carga térmica interna (Castanheira e Corbella, 2010). No entanto, tal solução gera um problema estético ainda maior, o que comprova uma das principais vantagens de sistemas BIPV: a melhor integração e os melhores resultados estéticos.

A localização geográfica do edifício já construído limita o dimensionamento e a otimização de um sistema do tipo BIPV, pois, geralmente, condiciona a orientação e a inclinação dos módulos à mesma orientação e inclinação do edifício, que nem sempre são aquelas que otimizam o desempenho energético dos sistema. Esta questão específica, no entanto, será abordada no item 4 do presente trabalho.

3.1. Tecnologias fotovoltaicas

Existem diferentes tipos de tecnologias de células FV que podem ser utilizadas em uma instalação solar. Estas células podem estar dispostas em módulos, com ou sem molduras, em estruturas opacas (normalmente com cobertura posterior em tedlar), ou com dado grau de transparência (conhecido como encapsulamento vidro-vidro), ou ainda dispostas em estruturas sem uma forma definida, como fitas, estruturas flexíveis, adaptadas para substituir uma determinada parte da envoltória da edificação, dentre outras. Dependendo do tipo de edificação e do local onde o sistema será instalado, utiliza-se a tecnologia mais adequada à aplicação, o que propicia um SFCR mais eficiente, além de deixar a cobertura e/ou a fachada da edificação esteticamente mais agradáveis (Jelle et al., 2012).

O elemento mais utilizado em células FV comerciais é o silício, devido ao fato da microeletrônica ter aperfeiçoado continuamente sua tecnologia, além da sua grande abundância no planeta. Estas células são encontradas na forma de silício monocristalino (mono-Si), policristalino ou multicristalino (poli-Si) e amorfo (a-Si) (Zilles et al., 2012). Outras tecnologias de células foram desenvolvidas com o passar do tempo, como o arseneto de gálio (GaAs); o disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂, ou simplesmente CIS); o disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe₂); e o telureto de cádmio (CdTe). Mais recentemente, alguns materiais orgânicos estão sendo estudados para utilização na conversão FV. As tecnologias de silício amorfo (a-Si), GaAs, CuInSe₂, CuInGaSe₂, e CdTe são denominadas de tecnologias de filmes finos, em função de sua composição estrutural.

Em aplicações FV integradas à edificação, três características são particularmente consideradas na escolha da tecnologia FV a ser empregada: a eficiência de conversão, a potência produzida por unidade de área (densidade de potência, dada em W/m²), e a aparência da célula, normalmente avaliada em função de sua coloração e de seu grau de transparência. A Fig. 4 apresenta uma tabela comparativa entre as tecnologias de células mais difundidas comercialmente, com destaque para as características aqui citadas.







	Tecnologia FV	Dimensões	Eficiência	W/m ²	W/célula
	Si Policristalino	156 x 156 125 x 125	16%	120	1,46 - 3,85
	Si Monocristalino	156 x 156 125 x 125	18%	130	2,60 - 4,02
	Si Monocristalino - Alta eficiência	125 x 125	21%	155	2,90 - 3,11
	Si Monocristalino - Semitransparente	125 x 125	17%	105	1,90 - 2,20
	Si amorfo (filme fino) - Opaco	576 x 976	5%	50	32
	Si amorfo (filme fino) - Semitransparente	576 x 976	4%	40 - 45	27

Figura 4- Características de diferentes tecnologias de células FV, pertinentes ao estudo de aplicações integradas à edificação. Adaptado de Ertex Solar (2013).

Com a finalidade de minimizar o impacto visual causado pelos módulos FV tradicionais, de estruturas rígidas, as tecnologias de filme fino se mostram bastante atraentes. Tal tecnologia pode ser subdividida em vidros fotovoltaicos, folhas e membranas de telhado rígidas ou dispostas sobre substratos flexíveis. Podem facilmente ser integradas a fachadas e telhados gerando energia com menor, ou nenhum, impacto visual (Mercaldo et al., 2009). Algumas empresas mundo afora vêm inovando ainda mais no conceito de aplicação de tecnologias FV a materiais propícios à integração arquitetônica plena. Empresas especializadas em produtos em vidro utilizam sua expertise e a somam a células FV para fabricarem produtos ideais para BIPV, mesmo com tecnologia de célula cristalina, as mais eficientes comercialmente disponíveis. Uma dessas empresas permite inclusive uma completa simulação para análise da aparência final de um produto BIPV em vidro, considerando variações na forma, nas dimensões, no tipo de célula e na coloração do vidro, conforme ilustra a Fig. 5 (Vidurglass, 2013).

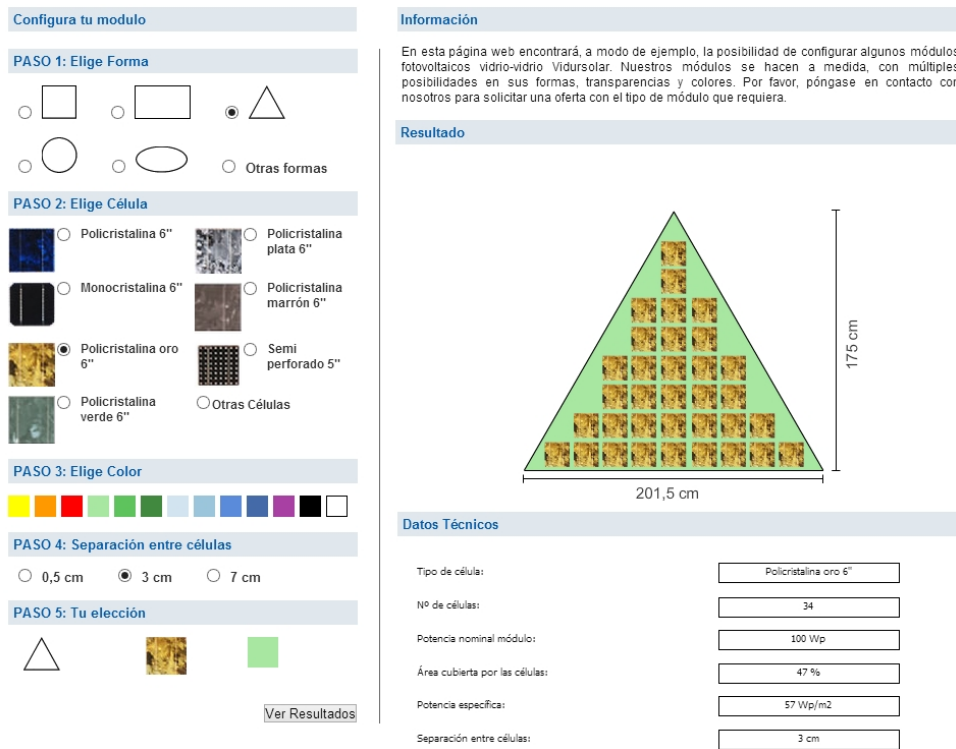


Figura 5- Ambiente para simulação de aparência de células FV em configuração vidro-vidro (Vidurglass, 2013).

3.2. Aspectos construtivos

Em termos construtivos, segundo Chivelet e Solla (2010), integrar a função dos elementos FV à arquitetura significa que as coberturas e as fachadas FV passam a desempenhar o mesmo papel conferido a coberturas e fachadas convencionais, ou aos elementos de revestimento que substituem. Isto envolve a cor, a imagem e o tamanho dos elementos de vedação externa, a impermeabilidade, a estabilidade, a resistência a cargas dos ventos, a resistência ao fogo, a durabilidade e a manutenção, a segurança elétrica durante a construção e o uso e, finalmente, os custos.

Coberturas. O telhado representa a parte externa da cobertura de um edifício e tem como funções a proteção, o isolamento e o suporte. Além disso, esta área apresenta grande possibilidade de integração, devido a sua posição na estrutura do edifício, com privilegiado acesso ao recurso solar e menos propícia a sombreamentos originados por elementos no entorno da edificação (Pereira, 2009). Os telhados dos edifícios são os locais em que os sistemas FV são mais comumente instalados, pois a área disponível em um telhado é muitas vezes desaproveitada (López e Lill, 2009).

A classificação mais habitual de telhados em edificações é a de telhados inclinados e telhados planos. Os telhados inclinados são a forma mais antiga nesse tipo de construção, e sua inclinação garante o escoamento da água mais facilmente. Quanto à instalação de sistemas FV, há duas possibilidades. Uma delas é a inserção de uma estrutura de suporte sobre o telhado, possibilitando que os módulos fiquem acima de seu nível, e a outra possibilidade é integrar os módulos ao mesmo nível do telhado (López e Lill, 2009), sobre a estrutura do telhado ou substituindo total ou parcialmente a cobertura.

Neste último caso, quando os módulos substituem a cobertura, eles passam a fazer parte da estrutura da edificação e, além da produção de eletricidade, têm como função proteger o interior da edificação do clima, propiciar isolamento térmico e acústico, gerar sombra e impedir a infiltração de água por entre os módulos (Pereira, 2009), o que justifica as complicadas tecnologias de montagem de sistemas BIPV. Uma dessas tecnologias de montagem é a fixação de uma estrutura em substituição à própria estrutura do telhado para sustentar os módulos, que servirão de cobertura. Este sistema de montagem é semelhante ao utilizado pelas telhas convencionais, que consiste na introdução de módulos FV em ganchos fixados nas ripas da cobertura, conforme ilustra a Fig. 6.



Figura 6- Sistema de suporte para se obter uma integração completa (López e Lill, 2009).

Nos telhados considerados planos, o ângulo de inclinação é bastante reduzido, geralmente abaixo dos 5°, o que, dependendo da localização geográfica, pode prejudicar a incidência da radiação solar em comparação com a inclinação ótima. Nesse tipo de cobertura, o sistema FV pode ser montado no mesmo plano de inclinação do telhado, com integração praticamente plena, como no caso da Fig. 7, onde instala-se uma tela solar como se fosse uma membrana impermeável, ou dispondo os módulos diretamente sobre a cobertura, com elementos de integração, como na Fig. 8 (GREENPRO, 2004). Outra possibilidade é montar uma estrutura que levante e incline os módulos para se obter a máxima produção energética, porém sem integração arquitetônica, caso típico de BAPV (López e Lill, 2009).



Figura 7- Aplicação de tela solar em telhados planos (GREENPRO, 2004).

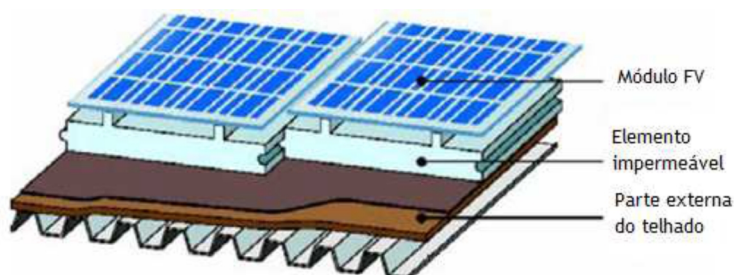


Figura 8- Aplicação de telhas solares em telhados planos (GREENPRO, 2004).

Fachadas. As fachadas são elementos estruturais que também expressam a aparência de um edifício e têm como funções básicas a separação entre o interior e o exterior do edifício, a proteção visual, o aproveitamento da luz do dia e a proteção solar. As fachadas podem ser classificadas em dois tipos: fachadas frias e fachadas quentes (GREENPRO, 2004).

A fachada fria consiste na divisão da fachada em duas partes independentes, com cavidades para circulação do ar, sendo que a parede exterior tem a função de proteger o edifício contra a ação do clima e a parede interior funciona como estrutura e para garantir isolamento térmico. Este tipo de construção é excelente para a integração de elementos FV. As cavidades para circulação do ar podem ser aproveitadas para o cabeamento, além de favorecer a ventilação dos módulos, facilitando a dissipação do calor e evitando altas temperaturas, o que possibilita uma maior produção energética (López e Lill, 2009). A Fig. 9 (a) apresenta exemplo de fachada fria.

As fachadas quentes consistem de elementos que envolvem o edifício e que têm como funções a proteção climática e o isolamento térmico e acústico, podendo fazer parte da estrutura do edifício, porém sem ventilação (GREENPRO, 2004). A Fig. 9 (b) apresenta exemplo de fachada quente.

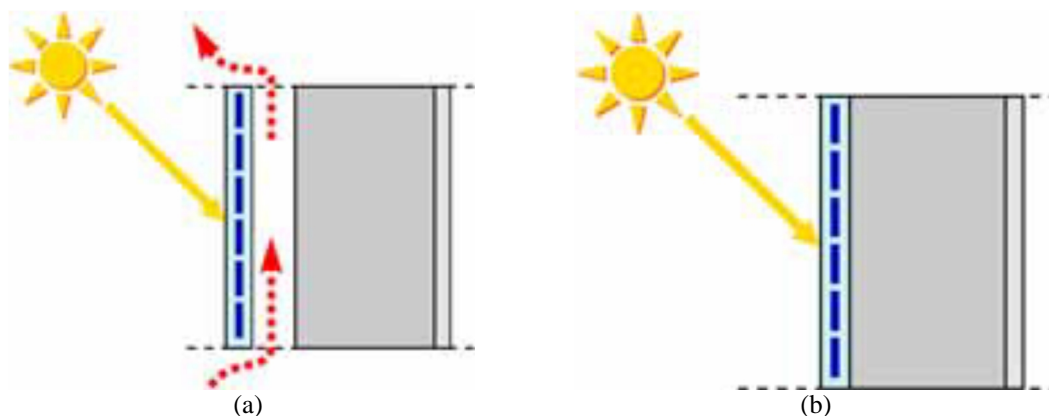


Figura 9- Ilustrações com exemplos de (a) fachada fria, e (b) fachada quente (GREENPRO, 2004).

As fachadas são elementos verticais, porém, como apresentado no subitem anterior, em algumas regiões, sistemas FV instalados na vertical perdem eficiência na geração quando comparados a sistemas instalados com inclinações próximas à latitude local. Esta aparente desvantagem das fachadas para receberem módulos FV pode ser superada em função da grande área normalmente disponível, principalmente em edifícios com predominância de verticalidade, e das boas técnicas de integração existentes, como as fachadas frias, em que os módulos não são responsáveis somente pela geração de eletricidade, mas também agem como elementos passivos na edificação.

4. ESTIMATIVAS DE DESEMPENHO ENERGÉTICO

A integração de sistemas FV a edificações pode ser considerada um tema multidisciplinar, por envolver arquitetos e engenheiros trabalhando em conceitos como condicionantes estéticas, conforto ambiental, eficiência energética e geração de eletricidade, dentre outros. Em muitos casos, a falta de comunicação entre as áreas pode levar a sistemas esteticamente agradáveis, porém, ineficientes energeticamente, ou ainda sistemas com elevado desempenho energético, mas com estética duvidosa. Hagemann (2004) define uma integração FV de sucesso como aquela que proporciona uma correta inter-relação entre questões estéticas, elétricas e construtivas. No mesmo trabalho, são apresentados diversos casos de sucesso de sistemas BIPV no mundo, com relações adequadas entre estética e desempenho energético.

O Brasil, no entanto, ainda tem pouquíssimas instalações do tipo BIPV. Do primeiro sistema instalado com estas características, em 1997 (Rüther, 1998), aos dias de hoje, pouco foi feito, efetivamente. Como aspecto positivo, pode-se destacar que a pesquisa nesta área no país, com ênfase no compromisso entre forma e função, já vem se desenvolvendo de maneira mais intensa nos últimos anos (Santos, 2013; Urbanetz et al., 2011; Vannini, 2011).

Com o objetivo de contribuir para esta discussão, este item apresenta como a relação entre instalações aplicadas e integradas à edificação pode influenciar no desempenho energético de sistemas instalados em regiões de baixa latitude.

Duas diferentes abordagens podem ser usadas para caracterizar as variações de desempenho energético entre sistemas BIPV e BAPV: a tecnologia FV utilizada e a disposição física dos sistemas instalados. A primeira já foi abordada anteriormente e, mesmo que as tecnologias de silício cristalino, mais eficientes, já estejam sendo bem aplicadas a elementos de integração arquitetônica, como ilustrado pela Fig. 5, no Brasil esta realidade ainda está razoavelmente distante. Em função disto, a análise aqui apresentada considerará a utilização de módulos de silício cristalino em aplicações do tipo BAPV, e de silício amorfo em aplicações do tipo BIPV.

No segundo ponto, a disposição física dos sistemas instalados, está o principal elemento de variação de desempenho energético entre sistemas BIPV e BAPV. Esta variação se torna mais acentuada à medida que os locais de instalação se aproximam da latitude zero, caso de 15 das 27 capitais brasileiras, que encontram-se em latitudes entre 11° Sul e 3° Norte. 4 delas, Macapá, Belém, São Luís e Boa Vista, encontram-se em latitudes bastante próximas a zero, entre 3° Sul e 3° Norte. A título de estudo de caso, Belém, situada em latitude 1° 27' 21" S, será analisada. A variação dos resultados para outras localidades de latitudes baixas é pequena, sendo o objetivo principal do presente trabalho a identificação das variações médias de desempenho para diferentes configurações de sistemas.

Com base nos conceitos de geometria Sol-Terra, sabe-se que as duas grandezas que influenciam na incidência de radiação solar sobre uma superfície coletora, e que podem ser variadas em função das diferentes topologias de instalação, são a inclinação da superfície e o ângulo azimutal da superfície, definidas abaixo (Pinho et al., 2008).

Ângulo azimutal da Superfície (α). Determina a orientação da superfície coletora. É o ângulo compreendido entre a projeção da normal à superfície no plano horizontal e a direção norte-sul. No hemisfério sul o deslocamento é tomado a partir do Norte, estando compreendido entre -180° e 180° , sendo considerado positivo quando a projeção se encontra à esquerda do Norte, e negativo quando encontra-se à direita.

Inclinação da superfície (β). Ângulo compreendido entre o plano da superfície coletora e a horizontal.

Variando-se estes dois ângulos e considerando dados de irradiância obtidos do Programa METEONORM®, versão 7.0.22, para a cidade de Belém, pode-se avaliar os pontos ótimos de instalação de sistemas na cidade. A Fig. 10 apresenta uma carta de disponibilidade de irradiância global anual para Belém, em função de γ e β (Zilles et al., 2012), onde pode-se notar, como esperado, que as melhores disposições de instalação são próximas à horizontal, com o ponto ideal sendo $\gamma = 0^\circ$ e $\beta = 6^\circ$, que segundo o METEONORM resulta em uma irradiância global anual de 1.851 W/m^2 .

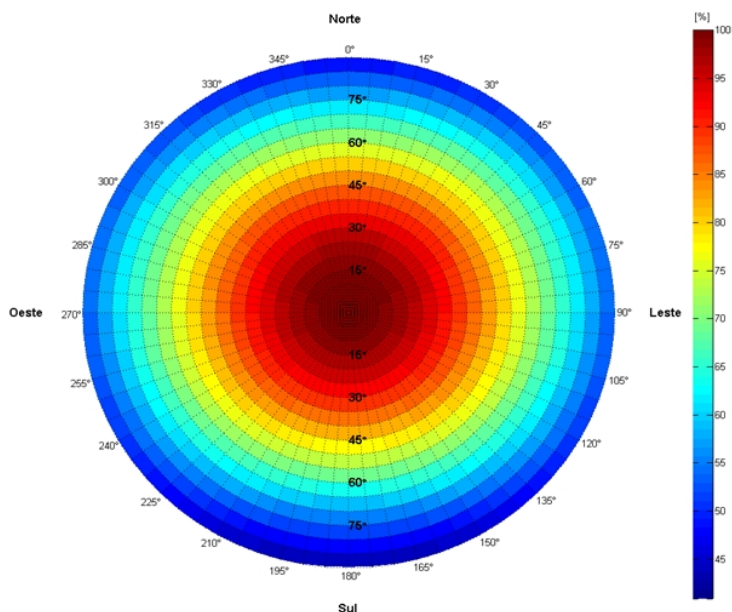


Figura 10- Disponibilidade de irradiância global anual para Belém, em função de γ e β (Zilles et al., 2012).

Considerando o valor deste ponto ideal como 100 % de aproveitamento da irradiância incidente, a Fig. 11 apresenta um esquema com possíveis disposições de sistemas FV em Belém, com diferentes ângulos γ e β e apresentando as variações percentuais de disponibilidade energética para cada caso.

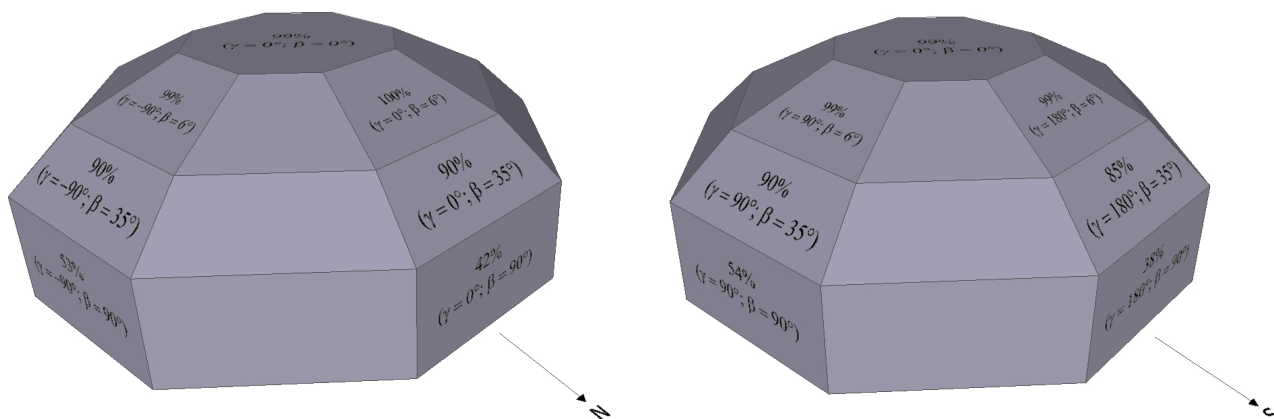


Figura 11- Variações percentuais de disponibilidade energética para diferentes combinações de γ e β , considerando o caso ideal como 100 %. Fonte: Elaboração própria.

Com o auxílio da Fig. 11 e de outras referências, algumas conclusões podem ser obtidas. Para qualquer orientação, com inclinações de até 40°, uma superfície coletora em Belém captará valores próximos a 90% da irradiância ótima, sendo as orientações para leste e oeste mais favorecidas à medida que a inclinação aumenta (Cronemberger et al., 2012).

Ainda na Fig. 11, observa-se que as instalações em fachadas são menos favorecidas. A fachadas leste e oeste, as mais indicadas para este tipo de instalação, apresentam irradiância anual equivalente a aproximadamente 55 % do valor ótimo. A partir destas análises, nota-se que em Belém a utilização de sistemas FV em fachadas pode ser muito melhor aproveitada em elementos de sombreamento, por exemplo, com inclinações de até 40°, do que na vertical. Ainda assim, a disponibilidade energética das fachadas leste e oeste em Belém é proporcional à disponibilidade verificada em fachadas sul de cidades de latitudes mais altas e onde as instalações do tipo BIPV são bem mais disseminadas do que no Brasil, casos de Madrid (disponibilidade 13 % superior a Belém nas condições citadas) e Munique (14 % inferior a Belém) (Cronemberger et al., 2012).

Um sistema FV hipotético de 10 kWp a ser instalado em uma edificação em Belém, apresentando as duas possibilidades, integração do tipo BIPV e BAPV, pode servir como base para a comparação de desempenho energético entre as duas diferentes configurações. Assume-se que o sistema BAPV apresentará módulos de silício monocristalino instalados em cobertura, com disposições ótimas ($\gamma = 0^\circ$ e $\beta = 6^\circ$), e que o sistema BIPV apresentará módulos de silício amorfo instalados na fachada oeste. Considera-se que ambos os sistemas apresentam semelhantes fatores de desempenho (PR – *Performance Ratio*), de 80 %, com a diferença principal entre eles sendo verificada na densidade de potência. Com base em dados de módulos reais comercializados no Brasil, o sistema com tecnologia de silício monocristalino necessita de área aproximada de 67 m² para os 10 kWp, enquanto a mesma potência em silício amorfo necessita de aproximadamente 108 m². Nas condições descritas, o sistema BAPV apresenta uma produtividade anual

(*yield*) de 1.480,8 kWh/kWp, fator de capacidade de 16,9 % e energia anual gerada de 14.808 kWh, enquanto o sistema BIPV apresenta um *yield* anual de 800,8 kWh/kWp, fator de capacidade de 9,1 % e energia anual gerada de 8.008 kWh.

Avaliando de forma mais específica a energia gerada, que é o parâmetro utilizado em análises econômicas, e considerando custos obtidos no mercado nacional dos mesmos módulos considerados acima, de R\$ 4,08/Wp para os módulos de silício cristalino e de R\$ 3,48/Wp para os módulos de silício amorfo, os custos de energia gerada de cada sistema, considerando os mesmos custos acessórios (R\$ 30.000,00 para inversores, materiais elétricos e instalação) e os mesmos indicadores econômicos (25 anos de vida útil e 6 % de taxa de desconto), seriam de R\$ 0,32/kWh para o sistema BAPV e de R\$ 0,53/kWh para o sistema BIPV. O custo consideravelmente superior do sistema BIPV ainda se reflete no principal entrave para a maior disseminação destes sistemas no Brasil, em especial na Região Norte, onde as variações de desempenho são maiores e a disponibilidade de materiais para integração do tipo BIPV é escassa. Ressalta-se ainda que a análise simplificada aqui apresentada não considerou um provável aumento de custos de instalação do BIPV, associados a estruturas mais complexas ou mesmo a maiores requisitos de instalação e manutenção.

5. CONCLUSÕES

Sistemas fotovoltaicos instalados em áreas urbanas, fazendo uso das próprias estruturas das edificações que recebem parte ou toda a energia gerada, já são uma realidade no mundo, e no Brasil começam a despontar como uma excelente solução para problemas energéticos, principalmente após a publicação da Resolução ANEEL nº 482, de 2012, que regulamenta a geração distribuída com fontes renováveis, dentre elas a solar FV.

O que muito se discute, em um passado não tão recente no mundo, mas bastante recente no Brasil, é a forma desta integração dos elementos de geração às edificações. Por ser uma forma de geração ainda nova no país, muitos projetistas de sistemas FV e proprietários de edificações que os recebem fazem questão que a integração torne o sistema o mais visível possível. Tal opção contrasta com o desejo de outros projetistas, que buscam pela integração plenamente estética, em que os sistemas FV se tornam parte da edificação, não sendo, portanto, diferenciados dela em uma primeira análise visual.

O presente trabalho, além de apresentar elementos que norteiam esta discussão recente, conclui, a partir das principais características associadas a este tipo de análise, que a decisão pela instalação de sistemas do tipo BIPV ou BAPV vai muito além de questões estéticas ou mesmo de otimização do desempenho energético. As técnicas de vedação FV na arquitetura, bem com os materiais disponíveis para uma integração plena, nos moldes de sistemas BIPV, ainda não são uma realidade no Brasil. Na Região Norte, muito menos. E esta região ainda apresenta uma característica diferenciada em relação às regiões sul e sudeste do país: o fato de estar situada em latitudes muito próximas a zero torna ainda mais discrepante o padrão de instalação ideal, próximo à horizontal, ao que se tem na maioria das instalações do tipo BIPV, predominantemente verticais.

Faz-se necessário, no Brasil como um todo, porém, mais especificamente na Região Norte, que pesquisas mais aprofundadas sejam conduzidas com relação ao potencial de aplicação de sistemas BIPV, às possibilidades de ganhos energéticos passivos na edificação, como minimização do uso de iluminação e climatização artificiais com uso de técnicas BIPV, à disponibilidade futura de materiais que possibilitem integração plena, e sobre a viabilidade econômica de utilização destes materiais, dentre outros estudos que podem concluir de maneira mais evidente sobre qual o real potencial de uso das instalações do tipo BIPV.

REFERÊNCIAS

- Blasques, L. C. M.; Vale, S. B., 2012. Análise preliminar de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica de 12,6 kWp, instalado em um prédio comercial na cidade de Belém, Estado do Pará. IV CBENS - IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Castanheira, R. G., Corbella, O. D., 2010. Painéis fotovoltaicos: Sombra e geração de energia nos telhados. III CBENS – III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém.
- Cerón, I., Caamaño-Martín, E., Neila, F. J., 2013. ‘State-of-the-art’ of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, vol. 58, pp. 127–133.
- Chivelet, N. M., Solla, I. F., 2010. Técnicas de Vedação Fotovoltaica na Arquitetura. Tradução Alexandre Salvaterra. Porto Alegre: Bookman, 194 p.
- Crassard, F., Rode, J., 2007. The Evolution of Building Integrated Photovoltaics (BIPV) in the German and French Technological Innovation Systems for Solar Cells. Master of Science Thesis in Management and Economics of Innovation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Cronemberger, J., Caamaño-Martín, E., Sánchez, S. V., 2012. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. *Energy and Buildings*, vol. 55, pp. 264–272.
- Ertex Solar, 2013. Disponível online em <http://ertex-solar.at/en/press/downloads/doc_download/181-ertex-solar-folder-english>, acesso em 27/12/13.
- GREENPRO, 2004. Energia Fotovoltaica - Manual sobre Tecnologias, Projecto e Instalação. Manual desenvolvido no projeto GREENPRO. Disponível online em <<http://www.greenpro.de/po/fotovoltaico.pdf>>, acesso em 20/12/13.

- Hagemann, I. B., 2002. Building Integrated Photovoltaic: Architectural Integration of Photovoltaics in the Building Envelope (em alemão). Müller Rudolf.
- Hagemann, I. B., 2004. Examples of Successful Architectural Integration of PV: Germany. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 12, pp. 461-470.
- Hayter, S. J., Martin, R. L., 1998. Photovoltaics for Building Cutting-Edge PV. National Renewable Energy Laboratory. Presented at UPVG Utility PV Experience (UPEX) '98, San Diego, CA.
- Hrica, J., Chatterjee, S., TamizhMani, G., 2011. BAPV Array: thermal modeling and cooling effect of exhaust fan. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Seattle, WA, pp. 3144-3149.
- Jelle, B. P., Breivik, C., Roekenes, H. D., 2012. Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities. Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 100, pp. 69-96.
- López, S., Lill, M., 2009. Guía de Integración Solar Fotovoltaica. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 96 p.
- Mercaldo, L. V., Addonizio, M. L., Noce, M. D., Veneri, P. D., Scognamiglio, A., Privato, C., 2009. Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues. Applied Energy, vol. 86, n. 10, pp. 1836-1844.
- Peng, C., Huang, Y., Wu, Z., 2011. Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China. Energy and Buildings, vol. 43, n. 12, pp. 3592-3598.
- Pereira, F. C., 2009. Estimativa da Produção de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edifícios, Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- 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., 2008. Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia. Ministério de Minas e Energia, Brasília.
- Rampinelli, G. A., Krenzinger, A., 2007. Comportamento do fator de forma de módulos fotovoltaicos sob condições variáveis de irradiância, temperatura e sombreamento de células. ASADES - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 11.
- Rüther, R., 1998. Experiences and operational results of the first grid-connected, building-integrated, thin-film photovoltaic installation in Brazil, WCPEC2, Vienna, Austria.
- Rüther, R., 2004. Edifícios Solares Fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Editora UFSC/LABSOLAR, Florianópolis.
- Rüther, R., Salamoni, I., 2011. O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração da energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. Fórum Patrimônio: Mudanças climáticas e o impacto das cidades, v.4, n.1.
- Santos, I. P., 2013. Desenvolvimento de ferramenta de apoio à decisão em projetos de integração solar fotovoltaica à arquitetura. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.
- Schuetze, T., 2013. Integration of Photovoltaics in Buildings – Support Policies Addressing Technical and Formal Aspects. Energies 2013, 6, pp. 2982-3001.
- Urbanetz, J., Zomer, C. D., Rüther, R., 2011. Compromises between form and function in grid-connected, building-integrated photovoltaics (BIPV) at low-latitude sites. Building and Environment, vol. 46, n. 10, pp. 2107-2113.
- Vannini, V. C., 2011. Otimização da forma para captação da radiação solar sobre superfícies de edifícios: um exercício de integração entre os programas Rhinoceros e Ecotect. Tese de Doutorado, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, UFRGS, Porto Alegre.
- Vidurglass, 2013. Disponível online em <<http://www.vidurglass.com/es/solar-pv-glass/vidrios-a-medida/tecnologia-cristalina>>, acesso em 27/12/13.
- Zilles, R., Macêdo, W. N., Galhardo, M. A. B., Oliveira, S. H. F., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. Oficina de Textos, São Paulo.

BIPV AND BAPV: ANALYSIS FROM THEORETICAL CONCEPTS, POSITIVE AND NEGATIVE ASPECTS AND ENERGY PERFORMANCE ESTIMATION FOR LOW-LATITUDE REGIONS

Abstract. *The present work deals with the application of building-integrated grid-connected photovoltaic systems, analyzing conceptual aspects and advantages and disadvantages of building-integrated PV systems (BIPV) and building-applied systems (BAPV). This study is motivated by the recent interest increase, in the world and more specifically in Brazil, in installations with characteristics of architectonic integration. Aiming to attach the theoretical concepts to the main functionality of PV systems, the electricity generation, this paper develops energy performance analysis for low-latitude regions, where predominantly vertical installations distance themselves more evidently from the optimum case. Brazil has 15 metropolis located at latitudes between 11° South and 3° North, including all of the Northern Region. Because of this, the city of Belém, capital of Pará state, is used as a case study, due to the fact that it is situated very close to zero latitude (1° 27' 21" S). It is concluded that if the PV project is designed fully joined to the architectural project in preliminary stages, BIPV applications present good results, mainly because it incorporates PV benefits of electricity generation with the architectural integration and better aesthetics results, even if the system's energy performance is lower than in BAPV installations. However, it is also observed that the availability of friendly BIPV materials in Brazil, and more specifically in the Northern Region, is limited, which helps to explain the greater occurrence, nowadays, of simpler installations, the BAPV ones, mainly due to the higher costs of BIPV installations.*

Keywords: Photovoltaic Solar Energy, GCPV, BIPV, BAPV, Energy Performance.