Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

ANÁLISE COMPARATIVA DA REDUÇÃO DA ÁREA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PROPORCIONADA POR MÓDULOS BIFACIAIS

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE REDUCTION IN PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION AREA PROVIDED BY BIFACIAL MODULES

Guilherme Aguiar Coelho [1]
José Luiz Miotto [2]

Resumo: A ampla utilização de fontes energéticas poluidoras, para suprir a crescente demanda, acaba impactando diretamente o meio ambiente. O setor conta agora com alternativas renováveis, como é o caso da energia solar. O presente trabalho objetiva apresentar uma possível solução para geração de energia em espaços restritos, como é o caso de edifícios com mais de oito pavimentos, onde a demanda de energia é elevada em relação à área disponível para produção. Apresenta-se um estudo comparativo entre sistemas fotovoltaicos convencionais e sistemas com módulos bifaciais. Os resultados deste estudo indicam haver um aumento real da eficiência de geração, uma vez que o módulo bifacial utiliza da irradiação solar incidente, assim como da radiação solar refletida pela atmosfera para gerar uma quantidade maior de energia. Apesar de seu custo elevado, os módulos bifaciais constituem-se em uma alternativa viável, pois geram até 30% a mais de energia por metro quadrado quando comparado ao sistema convencional. No caso avaliado neste trabalho, a opção pela utilização dos módulos bifaciais representou uma redução de 31,9% na área de geração, quando comparada à área necessária para os módulos convencionais.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico. Módulo bifacial. Geração de energia. Sustentabilidade.

ABSTRACT: *The wide use of polluting energy sources to supply a growing demand ends up directly impacting the environment. The sector now has renewable alternatives, such as solar energy. This paper presents a possible solution for power generation in restricted spaces, such as buildings with more than eight floors, where the energy demand is high in relation to the area available for production. A comparative study is presented between used photovoltaic systems and systems with bifacial modules. The results of this study allow for a real increase in generation efficiency, since the bifacial module uses incident solar radiation as well as solar radiation reflected in the atmosphere to generate a greater amount of energy. Despite their high cost, bifacial modules are used as a viable alternative because they generate up to 30% more energy per square meter compared to the conventional system. In the test case in this work, an option to use bifacial modules represents a 31.9% reduction in the generation area when compared to the area required for the modules used.*

Keywords*: Photovoltaic system. Bifacial module. Power generation. Sustainability.*

[1]*Mestrando em Engenharia Urbana – Universidade Estadual de Maringá, UEM*
[2]*Professor, Universidade Estadual de Maringá, UEM*

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

1 Introdução

Nas últimas décadas houve uma crescente preocupação mundial com as mudanças climáticas, o que proporciona um aumento no interesse em projetos de geração de energias limpas, que causam um menor impacto ambiental quando comparadas à queima dos combustíveis fósseis.

Outro fator agravante, segundo Assis (2002), que leva à busca por fontes renováveis de energia, é o constante aumento no adensamento dos núcleos urbanos que pode causar redução no desempenho dos edifícios, provocando aumentos relevantes no consumo de energia referente à iluminação e a climatização artificial.

Diante das alternativas para a produção de energia limpa e renovável, evidencia-se a energia solar fotovoltaica, que apresenta aspectos muito positivos em sua concepção, sobretudo decorrentes da geração no próprio local de consumo, contribuindo para melhorar o nível de sustentabilidade das edificações que utilizam este tipo de tecnologia.

Existe uma grande importância contida na geração de energia de maneira descentralizada, como a redução da necessidade de linhas de transmissão de energia, diminuição de perdas pelo efeito Joule comum a distribuição convencional, redução de investimentos governamentais na produção de energia e até mesmo redução de impactos ambientais, pois as hidroelétricas requerem o represamento de águas, que geralmente alagam extensas áreas, afetando a fauna e a flora local. No caso das termoelétricas, onde são utilizados combustíveis fósseis para geração de energia, os impactos resultam especialmente da liberação de poluentes para a atmosfera.

Atualmente as fontes de energia elétrica no Brasil estão distribuídas da maneira como ilustrado na Figura 1 (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

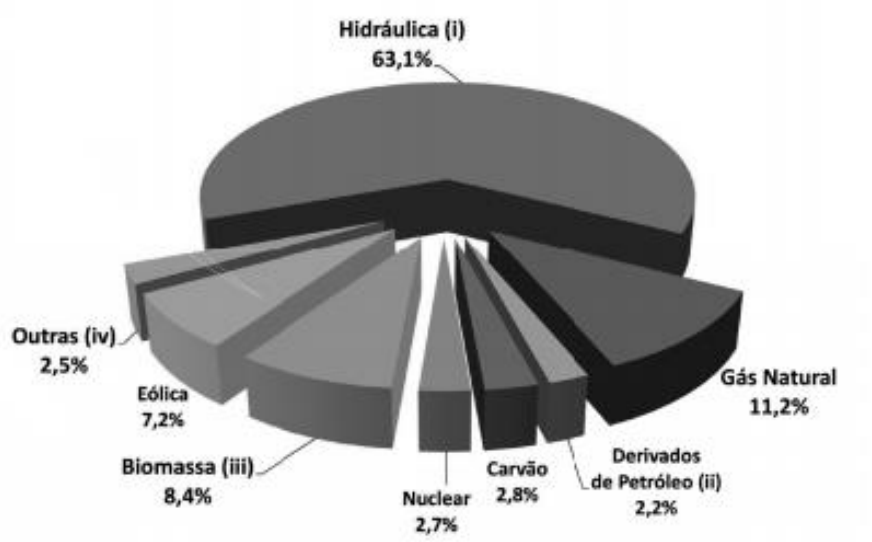

Figura 1. Fontes de Geração de Energia Elétrica em 2017 no Brasil

i) Inclui autoprodução.
ii) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível.
iii) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia.
iv) Outras: recuperações, solar e outros secundários.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2018), as edificações residenciais no Brasil são responsáveis por 28,8% do consumo total de energia do país. Por outro lado, a energia solar representa uma parcela mínima da geração energética total, não só no Brasil, mas no contexto global, porém este cenário vem sofrendo mudanças nos últimos anos. Em 2010, a produção de energia fotovoltaica representava 0,1% da demanda global, em 2015 passou para 1,1%, representando um expressivo aumento em apenas cinco anos.

Edificações com mais de oito pavimentos enfrentam um problema em comum na geração de energia fotovoltaica, ocorre que a área de geração disponível no último pavimento é insuficiente para o posicionamento da quantidade de módulos necessários para atender a demanda energética da edificação, para solucionar tal problema, existem alguns métodos que podem ser empregados, dentre eles destaca-se a adoção dos recém desenvolvidos módulos fotovoltaicos bifaciais. Estes módulos têm a capacidade de absorção da radiação e da irradiação proveniente da luz solar em suas duas faces, logo a quantidade de energia gerada por metro quadrado é maior, reduzindo a área ocupada e suprindo as necessidades energéticas da edificação. O sistema fotovoltaico gera energia elétrica tendo como combustível a irradiação solar, usando a rede de energia apenas de modo a auxiliar em períodos de pouca ou nenhuma irradiação. O painel fotovoltaico é formado por um conjunto de células ligadas em série, constituídas de silício mono ou poli cristalino, sendo o silício (Si) responsável por absorver os fótons oriundos da luz solar e transformá-los em elétrons. Após associados, os painéis fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, que passa pelo inversor para ser transformada em corrente alternada, corrigindo sua voltagem e frequência, para que possa ser utilizada nos eletrodomésticos das residências (WÜRFEL, 2009).

Para que o sistema funcione adequadamente, o medidor de energia convencional monofluxo deverá ser substituído por um de fluxo duplo, pois, uma vez que a energia gerada pelo sistema em horários de grande incidência solar,seja maior que o consumo instantâneo da edificação, haverá um excesso de energia que será transmitido para a rede pública de maneira automática, sendo monitorada pelo medidor que trabalhará girando no sentido contrário. Por outro lado, em horários em que a geração é menor que a demanda, como no período noturno, a rede pública atua fornecendo a energia necessária ao consumo, girando o medidor de energia em sentido normal.

Caso a produção seja maior que o consumo energético, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) o consumidor receberá créditos, podendo ser utilizados em até 36 meses, em qualquer residência do mesmo titular estando localizada dentro da área territorial abrangida pela distribuidora, sujeito ao pagamento de uma pequena taxa referente ao transporte e acessibilidade da energia pela rede de distribuição.

Os módulos fotovoltaicos devem ser instalados faceados a norte, uma vez que que o sol, durante todas as estações do ano, fica inclinado a norte devido à inclinação do eixo rotacional terrestre. Segundo a ABNT NBR 10889 (2013) a inclinação ideal é a latitude do local onde ocorrerá o posicionamento do painel, acrescida de 10º.

Existem diversas outras características a serem levadas em conta no projeto de sistemas fotovoltaicos, como por exemplo a adoção de módulos fotovoltaicos bifaciais, que produzem energia recolhendo a radiação e a irradiação solar, através dos lados frontal e traseiro do módulo, respectivamente. Assim, a parte traseira é responsável pela absorção da energia difusa refletida pelo solo e/ou atmosfera (SINGH et al., 2006)

Vale lembrar que de maneira geral, para aumentar a credibilidade de edificações que utilizam processos e práticas sustentáveis, algumas ferramentas foram criadas com o intuito de permitir uma distinção dessas edificações quando comparadas às edificações convencionais. Nesse sentido, o *U.S. Green Building Council* criou o selo LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*, que certifica que uma determinada edificação atende a uma série de

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

requesitos sustentáveis, dentre eles destaca-se a geração local de energia renovável (MIOTTO, 2013). No Brasil também estão disponíveis, para esse mesmo propósito, os selos *AQUA* e *Casa azul*.

Módulos bifaciais demonstram um elevado ganho em rendimento energético quando comparados com módulos monofaciais com o mesmo pico de Watt (Wp) (COMPAROTTO et al., 2014; GUERRERO-LEMUS et al., 2016). Uma grande vantagem de aumento de geração energética por metro quadrado poderia ser obtida em locais com espaço reduzido, como em cobertura de edifícios. Estudos e pesquisas voltadas para a interação de sistemas fotovoltaicos em edificações têm, em parte, focado seu desenvolvimento no sombreamento da cobertura da edificação onde os módulos se localizam (LOULAS et al., 2012; HOFIERKA; KAŇUK, 2009). Com o intuito de aumentar sua eficiência na geração, deve-se analisar a área disponível e calcular a inclinação ideal dos módulos, sempre evitando perdas por sombreamento das células.

Apesar do grande potencial envolvido na geração de energia fotovoltaica, ainda há muitas variáveis desconhecidas (CRONEMBERGER et al., 2012; DI VINCENZO et al., 2010; VARTIAINEN, 2001; ORDENES et al., 2007; HWANGM et al., 2012). A maioria dos estudos acerca do assunto prevê que a edificação estaria inserida em um meio edificado, porém desprezam a influência do sombreamento proveniente de prédios vizinhos (LITTLEFAIR, 1998).

A introdução de módulos fotovoltaicos bifaciais acaba por revolucionar o conceito de geração de energia em relação à área ocupada, uma vez que utiliza o efeito Albedo para gerar energia, no qual a radiação e a irradiação solar são aproveitadas, tudo isso em um ambiente urbano onde, segundo Tregenza (1998) e Ng (2001), a altura e posicionamento das edificações são essenciais.

Para Leder e Pereira (2009), Ng e Wong (2004), Sánchez et al. (2005) e Li et al. (2006), levantar a disponibilidade de radiação e luz natural incidente sobre a edificação inserida no contexto urbano é de vital importância, tendo em vista que – segundo Ordenes et al. (2007), Hwangm et al. (2012) e Vartiainen (2001) – estes dados deverão ser utilizados no cálculo da geração de energia necessária a suprir a demanda da edificação. Há dados precisos de monitoramento por satélite, disponíveis em *softwares* e *websites*, para a quantificação da irradiação. No caso da radiação requer-se um estudo muito mais aprofundado para quantificá-la, pois depende da dinâmica da atmosfera, nuvens e dos demais módulos que estão a refletir a luz solar.

Um método utilizado para avaliar a viabilidade econômica do investimento consiste no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL). Geralmente quando o VPL se apresenta positivo, o investimento se demonstra viável. A determinação do VPL se caracteriza como um método mais completo que o *payback*, que estima o tempo necessário para a total recuperação do capital inicialmente investido no projeto. "*Payback* é o período de recuperação de um investimento e consiste na identificação do prazo em que o montante de dispêndio de capital efetuado seja recuperado por meio dos fluxos líquidos de caixa gerados pelo investimento" (KASSAI et al., 2000).

Por outro lado, a Taxa Interna de Retorno (TIR), segundo Gitman (2001), é basicamente a taxa de desconto mensal que acaba por zerar o VPL, indicando que o investimento inicial foi completamente amortizado pelos fluxos de entrada de caixa. A TIR, de acordo com Braga (1989), proporciona uma compensação entre o fluxo de entrada de caixa aos correspondentes valores relativos ao investimento líquido de capital. Para se tornar viável, um projeto deve possuir a TIR maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Logo, um projeto que conta com a TMA maior que a TIR deve ser descartado, por se apresentar como um investimento inviável, visto que a TMA pode ser considerada como o a taxa de retorno mínima a ser superada. Na prática esta pode ser representada como sendo os juros anuais da poupança.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

Para Weston e Brigham (2000) e Gitman (2001), a Taxa Interna de Retorno é a taxa de desconto que iguala o valor presente de fluxos de entradas de caixa com o investimento inicial associado a um projeto, por conseguinte tornando o VPL = 0.

Ainda que a edificação possua um medidor de energia elétrica convencional, deverá ocorrer a substituição do mesmo visto que este registra apenas a energia que a rede de distribuição pública fornece ao edifício. O novo medidor deve atender a um novo requisito exigido pelo sistema, o de registrar o fluxo de energia em âmbito bidirecional, ou seja, não só monitorando a energia que a concessionária fornece às residências, mas também registrando a energia que o sistema fotovoltaico fornece à rede pública em períodos em que a produção supera a demanda. Portanto, o novo medidor de fluxo duplo se apresenta indispensável para a viabilidade econômica do sistema como um todo.

Diante do exposto, este estudo busca analisar comparativamente a implantação de sistemas fotovoltaicos constituidos por módulos fotovoltaicos monofaciais e bifaciais, tendo como base a viabilidade econômica, destacando os benefícios ambientais da aplicação deste tipo de tecnologia e visando solucionar problemas de aplicações em espaços reduzidos, como em edifícios residênciais de médio e grande porte

2 Materiais e Métodos

2.1 Objeto do estudo

Esta pesquisa consiste em um estudo exploratório que visa avaliar a redução da área de geração de energia baseada no aumento da capacidade de produção por metro quadrado, por meio da implantação de módulos fotovoltaicos bifaciais

Após a realização da revisão de literatura, que compreendeu a identificação e análise de artigos, livros, monografias e demais publicações correlatas, consultou-se o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2018), disponível no site da Empresa de Pesquisa Energética (EPE),pelo qual se levantou a demanda de energia média por residência no Brasil. Em seguida foi escolhida uma edificação residencial composta por oito pavimentos tipo e 28 apartamentos, localizada na cidade de Maringá – PR, onde o espaço disponível para produção em relação à demanda de eletricidade se tornou um empecilho para adoção de sistemas fotovoltaicos. O projeto desta edificação serviu de referência para os cálculos e análises posteriormente realizados.

2.2 Estruturação da pesquisa-ação

A condução da pesquisa-ação foi realizada através da escolha proposta por um sistema de geração de energia fotovoltaico, com o objetivo de suprir toda a demanda energética da edificação. O sistema indicado é do tipo *on grid*, ou seja, é ligado à rede pública de distribuição, dispensando o uso de baterias para armazenamento de energia, como demonstrado na Figura 2 (ENERGITEC, 2016).

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

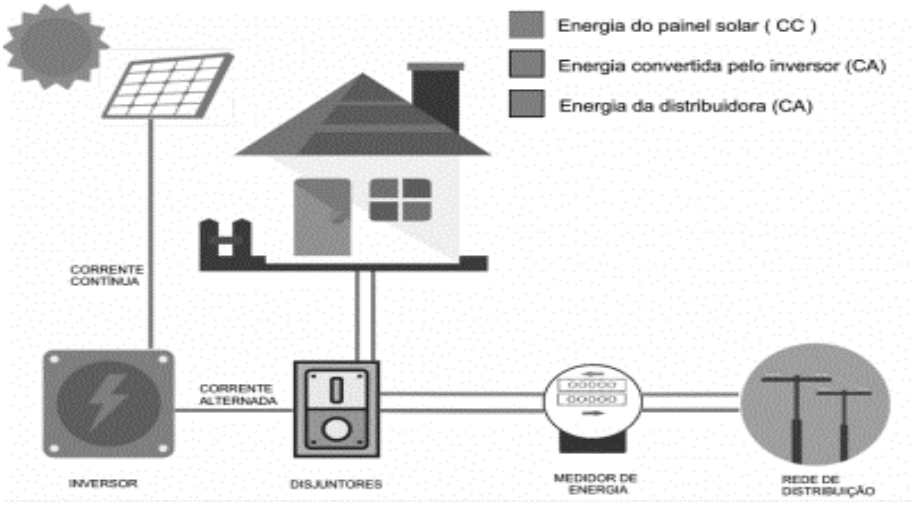

Figura 2. Composição do sistema solar fotovoltaico ligado à rede

A escolha dos módulos deve estar respaldada pela análise de algumas características do sistema proposto e tecnologia aplicada, entre elas destacam-se: **(1)** a durabilidade do sistema – quanto maior a durabilidade maior será a viabilidade deste como um todo; **(2)** o tipo de tecnologia do módulo – dentre as opções disponíveis, o Silício Monocristalino se destaca por ser mais eficiente, portanto, supre a deficiência d/e espaço no telhado do edifício, gerando uma quantidade maior de energia por metro quadrado, apresentando também peso reduzido se comparado a módulos constituídos de Silício Policristalino.**; (3)** corrente e Tensão elevadas – devem ser levadas em consideração, uma vez que o sistema proposto não terá auxílio de baterias. Então o sistema deverá apresenta-se suficientemente adequado para atender à demanda direta da edificação e (4) O custo benefício do módulo – condição imprescindível para tornar o sistema viável do ponto de vista econômico. Ainda que o módulo disponha de exímia potência e eficiência, de nada adiantaria se tudo isso viesse acompanhado de um custo de aquisição demasiadamente elevado.

Atendendo tais características optou-se pelos módulos da Canadian Solar, por apresentarem potência elevada e peso reduzido, tendo uma excelente relação custo-benefício. As características dos módulos estão expressas na Tabela 1.

Tabela 1 – Ficha Técnica dos módulos adotados

Modelo do Módulo	CS6K-300MS	CS3K-305PB-FG
Fabricante	Canadian Solar	
Tecnologia	Silício Monocristalino	Silício Policristalino
Potência normal (W)	300	305~397
Eficiência de conversão (%)	18,33	18,19~23,68
Perda de potência anual (%)	0,8	0,8
Corrente (A)	9,24	9,28~12,06
Área do painel (M²)	1,636	1,676
Peso (Kg)	18,2	24,3
Tensão do circuito aberto VOC (V)	39,7	39,5
Coeficiente de temperatura da tensão	0,30% / C°	0,29% / C°
Classificação INMETRO	A	A

Fonte: Canadian Solar (2019)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

Em seguida foi realizado o dimensionamento do sistema de geração fotovoltaico. Para tanto foram necessárias as equações indicadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Ficha Técnica dos módulos adotados Equacionamento para o dimensionamento do sistema fotovoltaico

Equações		
Equação 1	$ED = ES.Ap.\eta p.TD$	Energia produzida por um painel (kWh)
Equação 2	$Np = \frac{E\text{necessária}}{EM}$	Número de painéis necessários
Equação 3	$AT = Np.Ap$	Área total ocupada pelos painéis (m²)
Equação 4	$PT = Np.Pp$	Peso total dos painéis (kg)
Equação 5	$VTS = VOP.NPS$	Tensão total da série de painéis (V)
Equação 6	$TD = \frac{ED}{ES.Ap.\eta p}$	Taxa de desempenho (%)
Equação 7	$\Delta V = VTS.V\%$	Variação da tensão por efeito da temperatura (V)
Equação 8	$Vcorr = VTS + \Delta V$	Tensão total da série de painéis corrigida pelo efeito da temperatura (V)
Equação 9	$PT = Np.PMAX$	Potência total do conjunto fotovoltaico (W)

Fonte: Autoria própria (2019)

E_D é a energia produzida pelo sistema com apenas um módulo fotovoltaico; E_s representa a radiação diária recebida pelo sol (em kWh/m²/dia); A_p é a área do módulo (em m²);n_pé a eficiência de conversão do painel (em %); TD é a taxa de desempenho do sistema (em %);
N_p representa o número total de módulos necessários; E_M é o total de energia produzida por um sistema com apenas um painel; $E_{necessária}$ é a demanda mensal de energia da edificação (em kWh);
A_T é a somatória das áreas ocupadas pelos módulos (em m²);
P_T representa o peso total dos painéis (em kg); P_p é o peso de um único painel;
V_{TS} é a tensão total em V dos módulos após a associação; N_{ps}é o número de painéis necessários no sistema; V_{OP}é a tensão de um único módulo (em V);
TD é a taxa de desempenho do sistema (em %);
ΔV é a variação de tensão por efeito da temperatura (em V); $V_{\%}$ representa da variação da tensão (em %);
V_{corr} é a tensão total da associação dos módulos (em V) corrigida pelo efeito da temperatura;
P_T representa a potência total do sistema após a associação (em W); P_{max} é a potência máxima desempenhada pelo módulo escolhido (em W).

A partir de consulta no site da *Cresesb* pode-se constatar a irradiação incidente a 36º de inclinação, tendo a cidade de Maringá, no Paraná como exemplo na elaboração do dimensionamento. Já os dados da temperatura foram obtidos junto à Estação Climatológica Principal de Maringá (ECPM), localizada no campus sede da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

Com o auxílio do *software* Excel®, os dados foram processados e organizados em tabelas comparativas para melhor visualização dos resultados, considerando-se os dois sistemas em análise: módulo convencional e módulo bifacial.

Para realização do cálculo de viabilidade econômica, houve o levantamento do Índice Geral de Preço do Mercado (IGP-M), publicado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), para obtenção da taxa de inflação. Para calcular o valor da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e o

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

acumulado do último ano do Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC), consultou-se as publicações do Banco Central do Brasil. Posteriormente aferiu-se a viabilidade econômica por meio do cálculo do *Payback* Simples, do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR).

3 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados todos os levantamentos de dados necessários e posteriormente o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos comparando módulos monofaciais e bifaciais.

3.1 Demanda de eletricidade

Para realizar o dimensionamento dos sistemas, foi considerada a média do consumo de energia elétrica mensal das famílias brasileiras nos últimos 5 anos, que equivale a 161,4 kWh/mês, como ilustrado na Figura 3. Nota-se uma oscilação no consumo em diferentes épocas do ano, decorrente da utilização inconstante de determinados eletrodomésticos, como chuveiro e aparelhos de ar-condicionado, que têm sua utilização diretamente ligada às condições climáticas da estação.

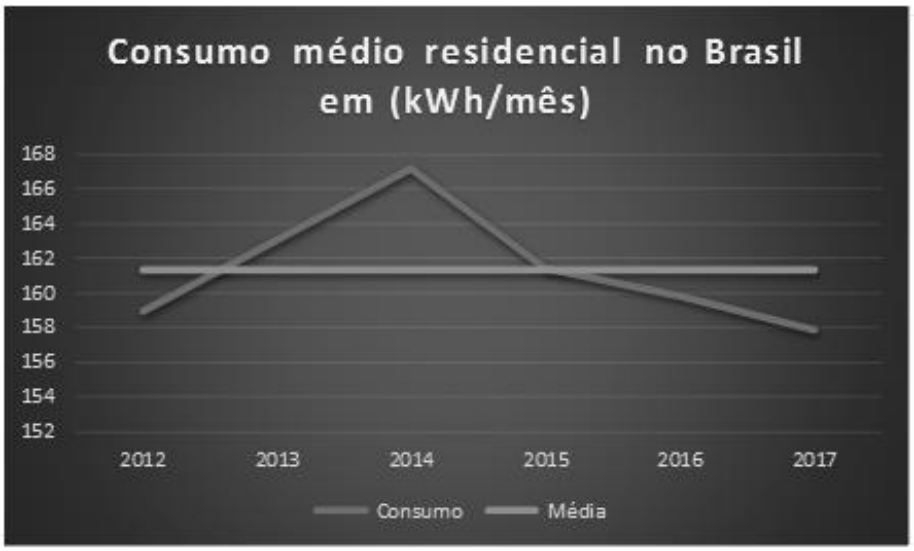

Figura 3. Consumo médio de energia elétrica no Brasil.

Considerando uma edificação de oito pavimentos com 28 apartamentos, e que o consumo das demais áreas úteis da edificação equivale ao de um apartamento, o consumo de energia mensal resulta nos valores expressos na Tabela 3.

Tabela 3 – Consumo médio de energia elétrica na edificação

Consumo de Energia	
Consumo de energia média total por apartamento (kWh/mês)	161,4
Consumo de energia elétrica total das 28 residências e do condomínio (kWh/mês)	4.680,6

Fonte: Autoria própria (2019)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

A demanda total de energia será atendida por meio de um sistema ligado à rede (*ongrid*), onde há a produção de energia solar por módulos fotovoltaicos atuando juntamente com a rede de energia da concessionária.

3.2 Incidência de radiação solar

Com coordenadas 23°27’ de Latitude Sul do Equador e 51°57’ de Longitude Oeste de Greenwich, a cidade de Maringá está localizada ao norte do Estado do Paraná, sobre a linha latitudinal do Trópico de Capricórnio, apresentando uma altitude de 450 a 600 metros acima do nível do mar (LUZ, 1997). A cidade apresenta um bom índice de radiação solar, como demonstrado na Figura 4. O sistema proposto busca usar meses com maior incidência para compensar meses com menor nível de incidência, havendo assim uma média da radiação anual.

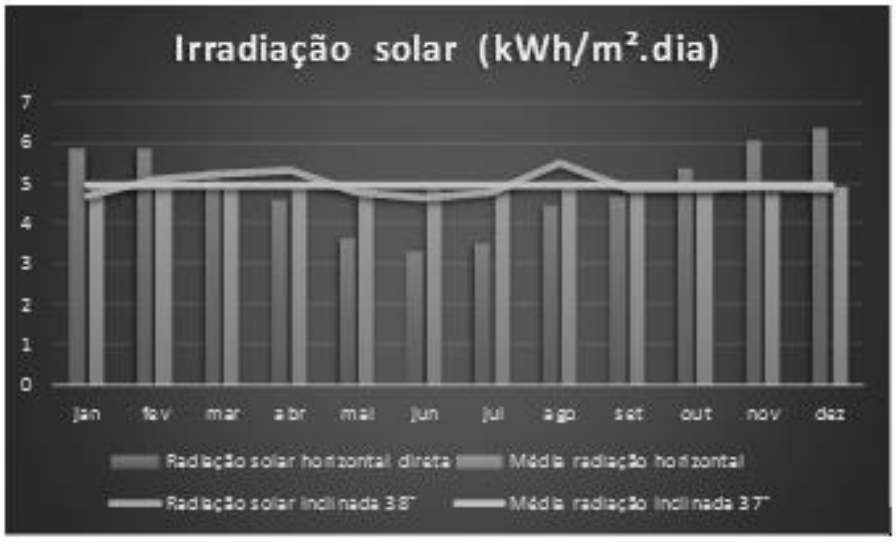

Figura 4. Incidência solar no município de Maringá/PR

Os fabricantes recomendam que os painéis sejam instalados com inclinação correspondente à latitude do local acrescida de 10º. Neste caso, para a cidade de Maringá, a inclinação adequada corresponde a 33°. Contudo, neste dimensionamento foi utilizado o ângulo de 37°, pelo fato deste ser o ângulo mais próximo ao ideal disponibilizado pela Cresesb-Cepel. Assim, a radiação média disponível horizontalmente ao plano dos módulos fotovoltaicos equivale a 4,91 kWh/m²/dia e a radiação média a 37° de inclinação corresponde a 4,96 kWh/m²/dia, ilustradas na Figura 4.

Vale lembrar que ângulos inferiores a 12° não são recomendáveis, uma vez que esta inclinação não será suficiente para que a água proveniente da chuva limpe o módulo e então este terá sua capacidade de geração fotovoltaica prejudicada pelo acúmulo de pó ou qualquer outro tipo de detrito que possa a vir parar sobre o mesmo. Quanto à instalação do módulo, deve ser feita em local seguro, se possível isento de sombreamento, longe da circulação de pedestres e animais.

3.3 Dimensionamento dos módulos

Uma importante característica a ser levada em consideração no dimensionamento dos módulos fotovoltaicos é a oscilação da temperatura no local onde o sistema será implantado. Essa temperatura terá grande influência na tensão dos módulos após serem associados.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

A Figura 5 ilustra as temperaturas máximas e mínimas na cidade de Maringá, obtidas por meio dos dados fornecidos pela Estação Climatológica Principal de Maringá (ECPM), no intervalo de julho de 2018 até junho de 2019. Esses dados representam a variação de temperatura da cidade onde os módulos estarão expostos.

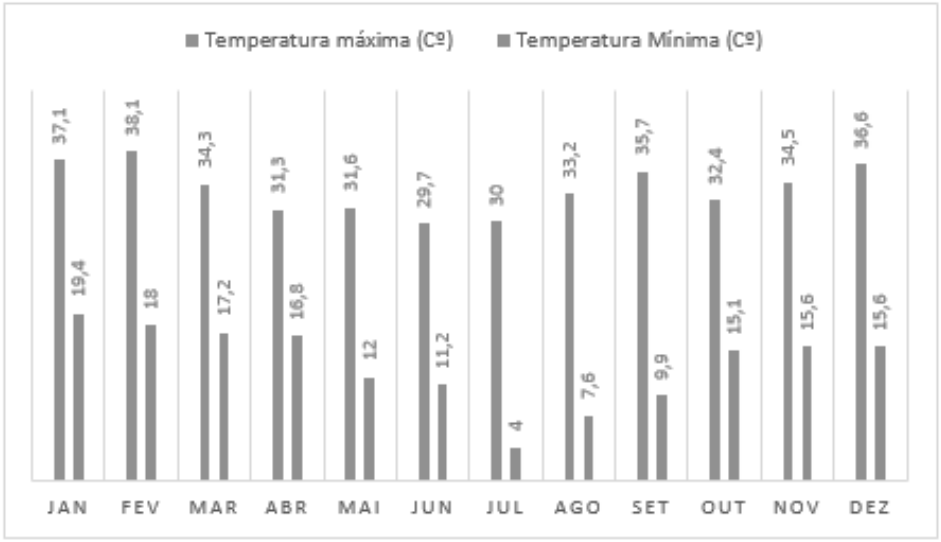

Figura 5. Temperaturas mínimas e máximas em Maringá/PR no período de julho de 2018 a junho de 2019

Na Tabela 4 estão relacionados os dados de dimensionamento dos módulos. A energia diária recebida pelo sol na cidade de Maringá foi encontrada através do site da Cressesb/Cepel, como ilustrado na Figura 4. A eficiência do painel é dada pelo fabricante, conforme Tabela 1. Então, a energia diária produzida pelo painel foi encontrada através da Equação 1 (Tabela 2), correspondendo a E_s= 4,96kWh/m².dia. Os demais parâmetros relacionados na Tabela 4 foram calculados com apoio das equações relacionadas na Tabela 2.

Tabela 4 – Resultados do dimensionamento dos módulos

Modelo do módulo	**CS6K-300MS**	**CS3K-305PB-FG**
Energia diária recebida pelo Sol (kWh/m².dia)	4,96	
Eficiência do painel (%)	18,33	18,19~23,68
Energia diária produzida pelo painel (kWh)	1,2	1,59
Energia mensal produzida pelo painel (kWh)	36,12	47,82
Número total de módulo necessários	108	80
Área total ocupada (m²)	176,88	134,08
Taxa de desempenho (%)	80,46	80,97
Peso total (kg)	1965,60	1944
Variação de tensão (%)	10	9,8
Variação de tensão por efeito da temperatura (V)	72,17	78,12

Fonte: Autoria própria (2019)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

O peso total dos módulos foi encontrado pela Equação 4 (Tabela 2) em que $P_{p(CS6k)}$= 18,2 kg e $P_{p(CS3k)}$= 24,3 kg.

3.4 Associação dos módulos

Para a correta associação dos módulos, deve-se buscar uma determinada homogeneidade ao formar o circuito, pois cada módulo produz uma determinada tensão, corrente e potência. Logo, ao associar unidades fotovoltaicas com ligações em série a tensão é somada, enquanto ao associá-las em paralelo a corrente é que se soma. O circuito de associação mista se faz necessário uma vez que ligando apenas em série ou apenas em paralelo, os valores de tensão e corrente seriam demasiadamente elevados, superando a capacidade dos inversores disponíveis no mercado. Portanto, o esquema de associação dos 108 módulos CS6k-300MS e 80 módulos CS3k-305PB-FG compreende a utilização de dois inversores para cada sistema, conforme segue.

No caso do módulo CS3K, optou-se por grupos de 18 módulos ligados em série, posteriormente sendo divididos três grupos ligados em paralelo para cada inversor. Já para o módulo CS6K, optou-se por grupos de 20 módulos ligados em série, posteriormente sendo divididos dois grupos ligados em paralelo para cada inversor. Vale lembrar que em ambos os casos não há comprometimento estético da fachada, uma vez que os módulos, assim como o telhado, encontram-se escondidos pela platibanda da edificação como ilustrado na Figura 6. Vale esclarecer que o sombreamento proveniente da platibanda e da caixa d'água foi levado em consideração no ato do dimensionamento dos sistemas.

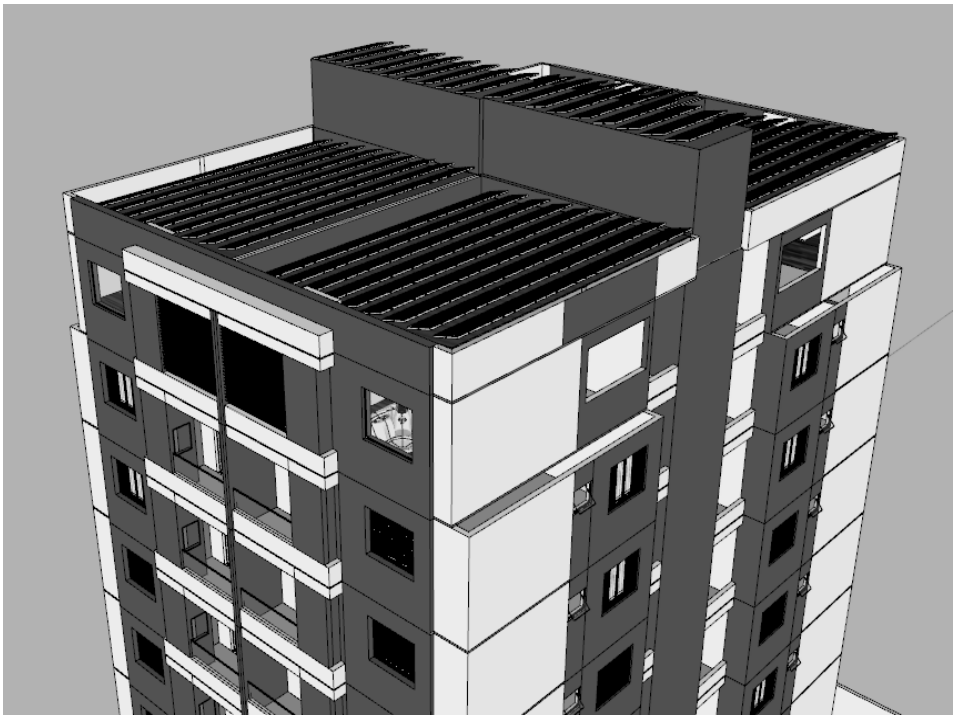

Figura 6. Ilustração do posicionamento dos módulos

3.5 Escolha do inversor

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (CC), porém a utilização de energia nas residências se dá por corrente alternada (CA). Diante disso, o inversor tem como

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

principal função converter essa energia para a utilização residencial. Vale ressaltar que dentre suas funções, o inversor também monitora, garante a segurança e otimiza a energia produzida pelo sistema. As características necessárias para os inversores, correspondentes a cada sistema projetado, estão relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados dos cálculos para o inversor

Modelo do módulo	CS6K-300MS	CS3K-305PB-FG
Quantidade de inversores utilizados (und)	2	2
Potência total por inversor (kW)	16,2	15,88
Potência total do conjunto fotovoltaico (kW)	32,4	31,76
Tensão total da série de painéis (V)	714,6	790
Tensão corrigida pelo efeito da temperatura (V)	786,8	868,1

Fonte: Autoria própria (2019)

A potência total do conjunto fotovoltaico, indicada na Tabela 5, foi calculada por meio da Equação 9 (Tabela 2), sendo $N_{p(CS6k)}$= 108; $N_{p(CS3k)}$= 80 painéis e P_{Max} fornecida pelo fabricante, conforme Tabela 1. A tensão total da série de painéis foi calculada pela Equação 5 (tabela 2), em que $V_{op(CS6k)}$= 39,7V e $V_{op(CS3k)}$= 39,5V. Já a tensão corrigida pelo efeito da temperatura se deu pela Equação 8 (Tabela 2), com a variação de $\Delta V_{(CS6k)}$= 72,17V e $\Delta V_{(CS3k)}$ = 72,12V, respectivamente.

Analisado os resultados do dimensionamento, optou-se pelo inversor Fronius Eco. As características deste aparelho estão relacionadas na Tabela 6.

Tabela 6 –Inversor adotado

Fabricante	Fronius
Modelo	Eco 25.3-3-S
Potência de entrada (kW)	25
Corrente máxima de entrada (A)	44,2
Faixa de tensão nominal de entrada (V)	580/1000
Grau de eficiência (%)	98

Fonte: Autoria própria (2019)

3.5 Área de geração de energia

Depois de instalados, apesar de ambos os módulos serem de alta eficiência energética, a produção de energia (em kWh/m².mês) do módulo bifacial CS6k é 29,6% superior ao módulo de apenas uma face CS3K, como ilustrado na Figura 7. Isso se dá pela capacidade do modulo bifacial gerar energia por meio do efeito Albedo, gerando uma quantidade maior de energia.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

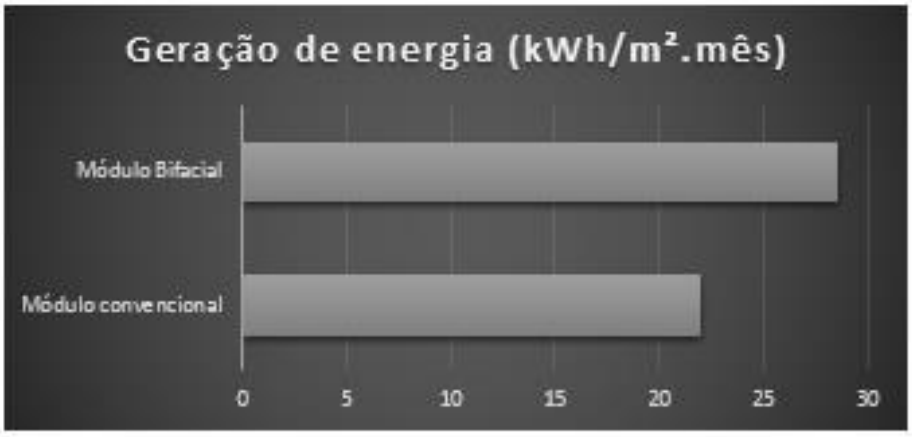

Figura 7. Geração de energia dos módulos

Uma vez que o módulo bifacial tem capacidade de produzir mais energia por metro quadrado, a quantidade de módulos necessários para suprir a demanda energética da edificação é menor. Logo, há uma redução na área de geração de energia de 176,9m² para 134,1m²como ilustrado na Figura 8.

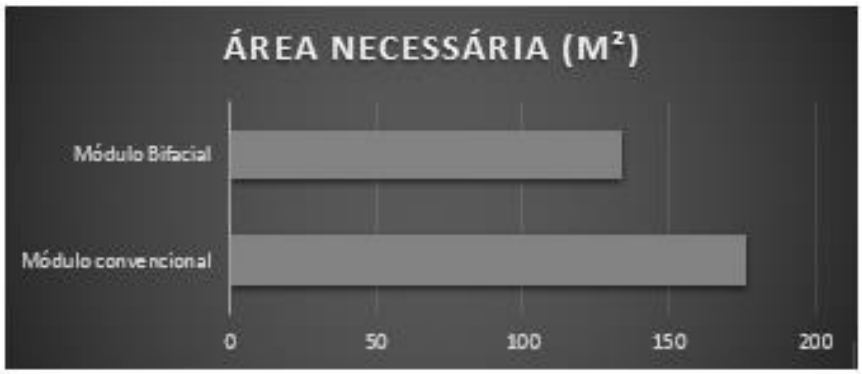

Figura 8. Área ocupada pelos módulos

Apesar de o custo ser maior, os módulos bifaciais podem ser adotados como uma solução para edificações onde a área de geração é inicialmente considerada como insuficiente.

3.6 Viabilidade econômica

A Tabela 7 relaciona os valores do investimento inicial do sistema fotovoltaico, discriminando gastos com mão de obra e materiais aplicados a execução do sistema.

Tabela 7 – Investimento da implantação do sistema discriminado

Materiais	Quantidade	Custo und (R$)	Custo total (R$)
Módulo fotovoltaico CS6K-300MS	108	840,00	90.720,00
Módulo fotovoltaico CS3K-305PB-FG	80	1.530,00	122.400,00
Inversor	2	18.248,77	36.497,54
Material para instalação elétrica	1	12.256,00	12.256,00
Kit suporte para módulo	108	106,60	11.512,80
Medidor digital micro geração	1	290,00	290,00
Mão de obra e equipamentos	1	6.900,00	6.900,00
Projeto e ART	--	9.000,00	9.000,00
Total (utilizando módulo CS6K-300MS)			**167.176,34**
Total (utilizando módulo CS3K-305PB-FG)			**198.856,34**

Fonte: Autoria própria (2019)

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

Vale lembrar que, segundo a resolução nº 482 da ANEEL (2012), todo e qualquer custo de implantação do sistema fotovoltaico deve ser custeado pelo cliente, o que inclui os valores de materiais, mão de obra, projeto e taxas referentes aos trâmites do cadastro da edificação como minigerador de energia elétrica. A Tabela 8 especifica características importantes que posteriormente serão levadas em consideração na análise de viabilidade econômica de implantação do sistema.

Tabela 8 – Dados para análise da viabilidade econômica do investimento

Valores utilizados para análise de investimento	
Vida útil do sistema (anos)	25
Tarifa de energia da concessionária + impostos + encargos (R$/kWh)	0,844
Custo anual médio do sistema convencional para edificação (R$)	44.135,79
Custo anual médio dos sistema propostos + taxa mínima (R$)	8.203,68
Economia anual (R$)	35.932,11
Inflação (%)	4,23
Taxa mínima de atratividade anual (%)	6,5

Fonte: Autoria própria (2019)

Ainda que o consumo total de energia da edificação seja igual a zero, a concessionária local responsável pela distribuição pública de energia mantém a cobrança de uma taxa mínima de consumo. Este valor é referente aos custos de manutenção da rede e transporte da energia até o ponto de distribuição ativo. No caso em questão, o valor efetivado pela concessionária é o equivalente ao consumo de 30 kWh ao mês, por se tratar de um sistema monofásico. Os resultados dos cálculos de viabilidade do sistema estão expressos na Tabela 9, os quais serão utilizados para a tomada de decisão referente ao investimento.

Tabela 9 – Resultados da viabilidade do sistema

Modelo do módulo	**CS6K-300MS**	**CS3K-305PB-FG**
Payback simples (anos)	4,65	4,86
TIR (%)	21,32	17,77
VPL (R$)	271.119,11	239.439,11

Fonte: Autoria própria (2019)

A recuperação do investimento, acima representado pelo *payback* simples – que consiste no período de tempo necessário para total recuperação do capital aplicado, foi de 4 anos e 8 meses no sistema que utiliza o módulo CS6K e 4 anos e 10 meses no sistema que utiliza o módulo CS3K bifacial. Este pode ser considerado um excelente tempo de retorno, por se tratar de um prazo relativamente curto. É importante ressaltar que o sistema foi dimensionado para durar no mínimo 25 anos, podendo superar facilmente esta barreira.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) de 17,77% superou demasiadamente a expectativa de uma taxa de retorno convencional, resultado da economia na instalação do sistema conjugado de inversor, no qual todas as unidades que compõem o edifício necessitam apenas de dois inversores de frequência.

O Valor Presente Líquido (VPL) é positivo, sendo viável e satisfatório, comprovando a viabilidade econômica de ambos os sistemas propostos, porém, fica evidente que o sistema com

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

módulos monofaciais é economicamente superior, decorrente de um investimento inicial menor.

4 Conclusões

Por se tratar de um sistema que se alinha com as exigências para a sustentabilidade das edificações, a análise de viabilidade deverá ser apenas uma das vertentes a serem analisadas ao aderir pela produção de energia fotovoltaica no local de consumo. Vale lembrar que a energia solar é considerada limpa, confiável e inesgotável, características essas que são de grande relevância na tomada de decisão.

Por meio dos resultados obtidos, pode-se observar a viabilidade da implantação do sistema de geração de energia fotovoltaica. Para o empreendimento em estudo neste trabalho, o tempo de retorno, ainda que acrescido de dois meses pela utilização da tecnologia de módulos bifaciais, ainda é altamente atraente do ponto de visto financeiro, visto que a economia financeira com energia elétrica se prolongará durante os 25 anos subsequentes à instalação.

A característica de ter o sistema ligado à rede de forma *on-grid* não exige a necessidade de baterias, e a utilização de apenas dois inversores acaba por reduzir custos da implantação e colaborar com a viabilidade do investimento.

A redução da área de geração de energia, com a utilização do módulo bifacial, alcançou 31,9% quando comparada com a área necessária para os módulos convencionais, o que é bem expressivo. O aumento no valor da implantação, pela utilização do módulo bifacial, está longe de tornar inviável esta solução, devendo assim ser cabível a aplicações em edificações residenciais com mais de oito pavimentos, onde geralmente a área disponível para instalação dos painéis é pequena em relação ao consumo energético.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa No 482**, de 17 de abril de 2012. p.1-4.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2018. **Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2018.** Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 28 out. 2019.

ASSIS, E. S. D. Critérios de Acessibilidade ao Sol e à Luz natural Planejamento Urbano. *In*: **Ambiente Construído**, 9. 2002, Foz do Iguaçu. **Anais** [...] 2002. Foz do Iguaçu: ANTAC, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10899: Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2013.

BRAGA, R. **Fundamentos e técnicas de administração financeira**. 1ed. São Paulo: Atlas, 1989.

CANADIAN SOLAR. **BiKu MODULE, new generation bifacial module**. Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/solarPanels/detail/27>. Acesso em: 08 ago. 2019.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

COMPAROTTO, C. et al. Bifacial n-type solar modules: indoor andoutdoorevaluation, In: **Proc. 29th EU PVSEC**, Amsterdam, The Netherlands, 2014.

CRESESB – CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. **Potencial energético solar. SunData -. Base de dados sobre radiação solar no Brasil, 2016.** Disponível em:< http://www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 11 ago. 2019.

CRONEMBERGER, J.; CAAMAÑO-MARTÍN, E.; SÁNCHEZ, S. V. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes: making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, v.55, p.264-272, 2012.

DI VINCENZO, M. C.; KESTEN, D.; INFIELD, D. Assessment of performance of building shading device with integrated photovoltaic in different urban scenarios. *In*: **International Conference on Sustainable Energy Technologies**, Sri Lanka, 2010. **Anais** […] Sri Lanka, Kandy, 2010.

ENERGYTEC. **Sistema GRID-TIE conectado à rede: Composição do Sistema solar fotovoltaico conectado à rede**. Disponível em: <http://www.energytecsolar.com.br/Sistema-GRID-TIE/.>. Acesso em 14 ago. 2019.

FRONIUS ECO. **Compacto inversor de projeto para maior rendimento**. 19]. Disponível em: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/energia-solar/produtos/todos-os-produtos/inversor/fronius-eco/fronius-eco-25-0-3-s> . Acesso 08 ago. 2019.

GITMAN, L. J. **Princípios da administração financeira – essencial**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

GUERRERO-LEMUS, R. et al. Bifacial solar photovoltaics - A technology review**.** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.60, p.1533-1549, 2016.

HOFIERKA, J.; KAŇUK, J. Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools. **Renewable Energy,** v.34, n.10, p.2206-2214, 2009.

HWANG, T.; KANG, S.; KIM, J. T. Optimization of the building integrated photovoltaic system in office buildings: focus on the orientation, inclined angle and install dearer. **Energy andBuildings**, v.46, p.92-104, 2012.

KASSAI, J.C. et. al. **Retorno de Investimento – Abordagem Matemática e Contábil do Lucro Empresarial.** 2 ed. São Paulo: Atlas, 2000.

LEDER, S. M.; PEREIRA, F. O. R. Padrões de ocupação urbana e disponibilidade da luz. *In:* **Ambiente Construído**, 10. 2009, Natal**, Anais** [...] Natal: ANTAC, 2009.

LI, D. H. W. et al. A study of the day lighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques. **Energy and Buildings**, v.38, n.11, p.1343-1348, 2006.

LITTLEFAIR, P. Passive solar urban design: ensuring the penetration of solar energy into the city. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.2, n.3, p.303-326, 1998.

Revista Tecnológica - Universidade Estadual de Maringá - ISSN 1517-8048
DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280

LOULAS, N. M. et al. Photovoltaics in urban environment: a case study for typical apartment buildings in Greece. **Renewable Energy**, v.48, p.453-463, 2012.

LUZ, France. **O fenômeno urbano numa zona pioneira: Maringá**. 1. ed. Maringá: A Prefeitura, 1997. 217p.

LUZ SOL ENERGIA SOLAR. **O que é modulo fotovoltaico bifacial**. Disponível em: <:http://www.luzdosolengenharia.com.br/?fbclid=IwAR3ycr8O_2im__5DzWwDDJPEwkP4CYeV9MSTlYZBnWgB27mpc-xQz-T21eQ> . Acesso em : 15 out. 2019.

MIOTTO, J. L. **Princípios para o projeto e produção das construções sustentáveis**. Ponta Grossa: UEPG/NUTEAD, 2013.

NG, E. Day lighting simulation of heavily obstructed residential buildings in Hong Kong. *In:* **International building performance simulation association conference**. Rio de Janeiro, 2001, **Anais** […] Rio de Janeiro, 2001.

NG, E.; WONG, N. H. Better day light and natural ventilation by design. *In:* Conference on passive and low energy architecture, 21, Eindhoven, 2004. **Anais** [...] Eindhoven, 2004.

ORDENES, M. et al. The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of Multi-Family dwellings in Brazil. **Energy and Buildings**, v.39, n.6, p.629-642, 2007.

SÁNCHEZ, F. J. et al. Solar radiation calculation methodology for building exterior surfaces. **Solar Energy**, v.79, n.5, p.513-522, 2005.

SINGH, J.P.; WALSH, T.M.; ABERLE, A.G. Performance investigation of bifacial PV modules in the tropics. *In:* **European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 21, 2006. **Anais** […] Dresden, Germany, 2006.

TREGENZA, P. **The design of lighting.** Londres: E&FN Spon., 1998.

VARTIAINEN, E. Electricity benefits of day lighting and photovoltaics for various solar facade layouts in office buildings. **Energy and Buildings**, v.33, n.2, p. 113-120, 2001.

WESTON, J. F.; BRIGHAM, E. F. **Fundamentos da Administração Financeira**. 10ed. São Paulo: Makron Books, 2000.

WÜRFEL, Peter. **Physics of Solar Cells**. New York : Wiley, 2009.