

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE ENGENHARIA URBANA

ENERGIA SOLAR NO MEIO URBANO: ANÁLISE PARA DIFERENTES FORMAS
URBANAS

CLERISMAR FERNANDES DA SILVA

Orientadora: Patrícia Regina Chaves Drach
Co-orientadora: Gisele Silva Barbosa

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Engenharia Urbana, Escola
Politécnica, da Universidade Federal do
Rio de Janeiro – PEU/POLI/ UFRJ

BANCA:

Profa. Dra. Patricia Regina Chaves Drach, D.Sc., Programa de Engenharia Urbana/POLI/UFRJ

Profa. Dra. Gisele Silva Barbosa. D.Sc., Programa de Engenharia Urbana/POLI/UFRJ

Profa. Dra. Angela Maria Gabriella Rossi, D.Sc., Programa de Engenharia Urbana/POLI/UFRJ

Prof. Dr. Paulo Eduardo Darski Rocha, FEN/UERJ

RESUMO:

O processo de urbanização é global e crescente, representando uma intensificação dos riscos das alterações climáticas em relação às cidades, que normalmente já vêm comprometendo as condições ambientais. É importante associar as questões ambientais com ações no meio urbano, planejando com uma energia limpa. Para estudar a aplicação da energia solar fotovoltaica no meio urbano, este trabalho traz uma análise comparativa da capacidade de geração de energia e de consumo para duas configurações da morfologia urbana (Marques, 2018). A primeira proposta, Cenário I, atendeu à Lei Complementar, LC 101/2009. A segunda proposta – Cenário II, foi desenvolvido tendo como base ações da certificação ambiental LEED-ND (*Environmental Design for Neighborhood Development*), para Desenvolvimento de Bairros. A metodologia adotada tem um caráter exploratório tendo como ponto de partida uma pesquisa bibliográfica seguida de um estudo prático - se trata de uma pesquisa aplicada. O aproveitamento do espaço urbano construído para a geração de energia permite explorar de forma sustentável o espaço. O Cenário II permite maior aglomeração de edifícios, por isso sua área de cobertura é maior, sendo que a diferença de área construída entre os dois cenários é equivalente a 1.548,19 m². Os resultados obtidos indicaram que com aproximadamente 60% das áreas disponíveis é possível gerar energia suficiente para atender a demanda do bairro. O resultados reforçam a necessidade de avaliar previamente os processos de densificação propondo diferentes configurações urbanas buscando adequação as necessidades do lugar. A utilização dos espaços no meio urbano para geração de energia, além de parecer viável, permite a inserção de projetos utilizando a geração distribuída, o que apresenta vantagens como a redução de perdas de energia no processo de transmissão.

Palavras-chave: Energia Solar, Morfologia Urbana, Certificações Ambientais.

ABSTRACT:

The process of urbanization is global and growing, representing an intensification of climate change risks impacting the cities, which usually have been compromising the environmental conditions. It is important to associate environmental issues with actions in the urban area, planning a sustainable energy. Aiming to studying the application of photovoltaic solar energy in the urban environment, this thesis presents a comparative analysis of the power generation and consumption capacity for two configurations of the urban morphology (Marques, 2018). The first proposal, Scenario I, complied with Complementary Law, LC 101/2009. The second proposal – Scenario II, was developed based on actions of the environmental certification LEED- ND (Leadership in Energy and Environmental Design - for Neighborhood Development). The methodology for the development of this dissertation was initially the bibliographic research followed by a practical study - it is an applied research. The use of space built urban environment for the energy generation allows the space to be explored in a sustainable way Scenario II allows greater agglomeration of buildings, so its area of coverage is greater, and the difference of constructed area between the two scenarios is equivalent to 1,548.19 m². The results indicated that, with approximately 60% of the available areas, it is possible to generate enough energy to supply the neighborhood's energy demand. These results reinforce the need to evaluate densification processes in advance by proposing different urban configurations, aiming to adapt to the needs of the place. The use of spaces in the urban environment for energy generation is possible, and also allows for the usage of projects using distributed generation, which presents advantages such as the reduction of energy losses in the transmission process.

Keywords: Solar Energy, Urban Morphology, Environmental Certifications.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo segundo dados da *International Energy Agency* (IEA). O país é o terceiro maior gerador de energias renováveis (IEA, 2018). No setor, predominam as hidrelétricas, seguidas de termelétricas. Contudo, a atual conjuntura é ainda mais favorável à expansão de fontes alternativas como a energia solar e também a energia eólica. Em particular a partir de 2017, com a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) em Paris, França, passa a vigorar o “Acordo de Paris”, aprovado pelos 195 países, que foi resultado desta conferência e visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), buscando, portanto, ações que impliquem no desenvolvimento sustentável. Uma ferramenta para ajudar a compreender a origem de emissões entre os ‘top’ emissores - que juntos, emitem 72,28% dos gases de efeito estufa em todo o Planeta - foi criada pelo *World Resources Institute* (WRI). Nesta, verifica-se que o setor energético é globalmente um dos maiores responsáveis por tal emissão (ZOTTIS, 2015). Após o Acordo de Paris ficou a cargo de cada país definir as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC), inicialmente indicadas como pretensões. O Brasil hoje conta com a NDC do Brasil no contexto do Acordo de Paris aprovada pelo congresso e entregue às Nações Unidas. Conforme o Ministério do Meio Ambiente (MMA s/d), com a NDC do Brasil foi adotado o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, tendo como base o ano de 2005, atingindo uma redução de 37%, em 2025, e de 43%, em 2030. Para tal existem compromissos acordados, dentre eles: ampliar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética do Brasil para aproximadamente 18% até 2030; promover reflorestamento e restauro de 12 milhões de hectares de florestas e atingir uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030.

O processo de urbanização é global e crescente, representando uma intensificação dos riscos das alterações climáticas em relação às cidades, que normalmente já vêm comprometendo as condições ambientais. O *World Urbanization Prospects* (UN, 2018) aponta, através de projeções da dinâmica populacional urbana e rural até o ano de 2050, as perspectivas de incremento da ocupação urbana. Para o Brasil observa-se a mesma dinâmica com aumento expressivo da população urbana.

Pode-se dizer que as cidades estão em um processo constante de adaptação à realidade apresentada, sejam estas alterações planejadas ou espontâneas. Desafortunadamente estas mudanças ou ações de intervenção urbana nem sempre

partem de um planejamento com foco na melhoria da vida nas cidades. Neste contexto, é importante associar as questões ambientais com ações no meio urbano, planejando com uma energia limpa para a cidade, de modo que toda a população desfrute desta através de serviços públicos como iluminação pública, além de sua aplicação no uso residencial. A morfologia urbana influencia diretamente o microclima, uma vez que através da forma urbana e dos materiais de cobertura do solo é possível amplificar ou reduzir os efeitos climáticos, sendo possível contribuir para o efeito estufa (BARBOSA, ROSSI e DRACH, 2014).

Neste artigo é abordada a utilização da energia solar fotovoltaica, uma energia renovável, aplicada ao meio urbano, sem a necessidade de utilizar redes de distribuição, através de um estudo prático realizado em uma área da região do Porto Maravilha na cidade do Rio de Janeiro. Foi realizada uma análise comparativa da capacidade de geração de energia e de consumo para duas configurações da morfologia urbana propostas por Marques (2018). Para tanto, foi elaborado um cenário de consumo energético para um domicílio referência e expandido para o bairro.

Marques (2018) propõe duas configurações urbanas de densidades construídas similares, mas que possuem formas urbanas e tipologias completamente diferentes. A primeira proposta, Cenário I, atendeu à Lei Complementar, LC 101/2009, que estabeleceu a Operação Urbana Consorciada do Porto Maravilha. No Cenário I pode ser observado um importante processo de verticalização com quadras grandes e uma maior área livre entre as edificações. A segunda proposta – Cenário II, foi desenvolvida tendo como base ações da certificação ambiental LEED – Neighborhood (*Leadership in Energy and Environmental Design - for Neighborhood Development*), o LEED-ND para Desenvolvimento de Bairros. O Cenário II atende não só às questões da escala urbana, tornando o espaço com uma melhor valorização da ‘caminhabilidade’, bem como apresentou os resultados de temperatura do ar e umidade mais adequados ao clima da cidade do Rio de Janeiro.

Foram desenvolvidas (Marques, 2018) simulações computacionais utilizando a ferramenta computacional ENVI-met (BRUSE, 2010). As imagens da Figura 1 indicam a variação da temperatura do ar ao nível do pedestre, nos dois cenários.

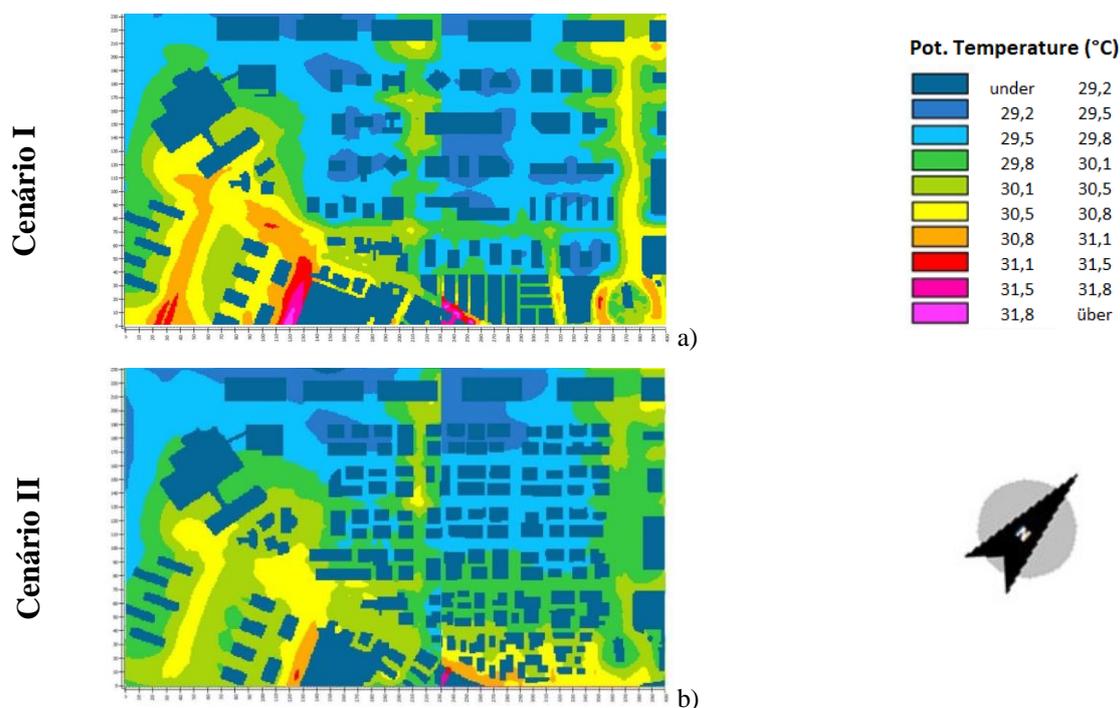


Figura 1: Temperatura do Ar (°C) para as duas tipologias do bairro; a) Cenário I e b) Cenário II. Marques, 2018.

A partir das imagens da Figura 1 observa-se que os resultados para o Cenário I (configuração com maior verticalização) apresentam valores de temperatura do ar, ao nível do pedestre, mais elevados, atingindo em alguns trechos uma diferença de 3°C. Fato que para uma cidade de clima quente como a cidade do Rio de Janeiro, não é desejável.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a aplicação da energia solar fotovoltaica no meio urbano e verificar sua aplicação em diferentes morfologias urbanas. Como objetivos secundários podem ser apontados: Estudar a aplicação de uma estratégia utilizando uma energia renovável; Avaliar a geração da energia no meio urbano, considerando menores perdas no sistema de distribuição da mesma; Estudar as variações entre geração e capacidade de atender à demanda para uma determinada densidade urbana, mas para diferentes configurações da morfologia urbana; Aplicar o estudo em uma proposta que tenha uma comprovação de certa eficiência, como a configuração baseada no LEED-NB que mostra a presença de temperaturas menos elevadas, além de atender a um selo internacional (LEED); Dar continuidade a projetos desenvolvidos anteriormente por profissionais do Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana - PEU legitimando sua importância.

3. METODOLOGIA

O procedimento metodológico para o desenvolvimento desta pesquisa pode ser descrito como composto por 6 fases interconectadas: levantamento de dados (bibliográfico e bibliométrico) para delimitação do referencial teórico, definição da metodologia, apresentação do problema, desenvolvimento da pesquisa, resultados e discussões, considerações finais e perspectivas.

O levantamento dos artigos científicos foi efetuado na plataforma Web of Science através do Portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES. Foi desenvolvido o processo de busca das palavras chave da pesquisa para a construção da base de análise. As buscas foram efetuadas em 24.07.2018, adotando-se os seguintes critérios de inclusão: (1) apenas artigos científicos; (2) recorte temporal de 2008 a 2017 - junho; (3) detalhamento do recorte temporal de 2014 a 2017 - junho; (4) busca realizada nos campos título, resumos e palavras-chaves (Title, Abstract e Keywords), (5) utilizando-se os termos “*photovoltaic energy and urban*”, “*photovoltaic energy and cities*”, “*solar energy and urban*” e “*solar energy and cities*”. Não está descartada a inserção de outros termos de busca.

A partir da Tabela 1 é possível observar que a partir de 2011 ocorreu um importante crescimento do uso destes termos em publicações listadas na base de dados *Web of Science*, indicando um maior interesse no tema. Em valores percentuais pode ser apontado o crescimento por cada grupamento de busca: “*photovoltaic energy and urban*” – 707,1%, “*photovoltaic energy and cities*” – 1.812,5%, “*solar energy and urban*” – 593,6% e “*solar energy and cities*” – 736,7.

Tabela 1: Desenvolvimento do uso em publicações, via *Web of Science*, dos termos relacionados ao tema da pesquisa.

Termo de Busca	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
“ <i>photovoltaic energy and urban</i> ”	14	19	25	28	42	40	53	68	80	113	553
“ <i>photovoltaic energy and cities</i> ”	8	26	24	21	51	60	80	109	147	153	766
“ <i>solar energy and urban</i> ”	47	60	78	83	111	123	171	207	274	326	1.637
“ <i>solar energy and cities</i> ”	49	95	83	105	151	171	225	286	382	410	2.184

Na Figura 2 é apresentado um exemplo gerado com os arquivos obtidos, utilizando o software VOSviewer® v.1.6.5.. Trata-se de um mapa indicando as conexões entre palavras frequentes nos arquivos inseridos no programa. São formados “clusters”, conjuntos por semelhança interligados.

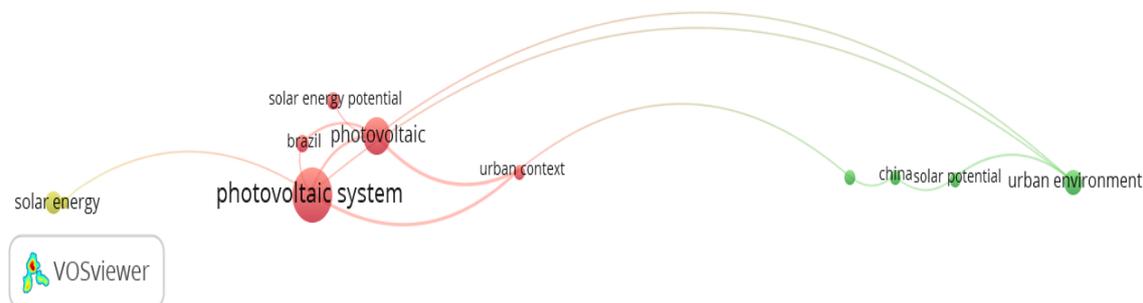


Figura 2: Mapa de visualização dos agrupamentos: China (verde), Brasil (vermelho) e Índia (amarelo).

A partir da imagem gerada com a introdução dos arquivos de 2008 a 2018 podem ser identificados três países, China (verde), Brasil (vermelho) e Índia (amarelo), aparecem, nesta ordem com maior frequência (Figura 2) nas publicações desta base de dados, neste período. Nestas publicações a Índia aparece conectada apenas ao uso da energia solar, mas não ao meio urbano ou ao uso de sistemas fotovoltaicos. No “cluster” relacionado ao Brasil, o uso no meio urbano aparece com maior frequência e intensidade, indicando a possibilidade de uma maior aplicação em espaços urbanos, convergindo, portanto, com o interesse dessa pesquisa.

4. JUSTIFICATIVA

A geração de energia solar fotovoltaica no meio urbano é viável. A geração distribuída (GD) permite isto. Para o Ministério de Minas e Energia - MME (2017), esta modalidade pode ser definida como a geração de energia elétrica próxima ao local de consumo, ou no próprio estabelecimento consumidor. A energia excedente pode ser vendida para a distribuidora local. A Figura 3 apresenta um esboço de uma instalação típica, no qual pode ser visualizada a sequência produção, consumo e retorno do excedente para a rede.

A instalação dos painéis está localizada próxima à área de consumo (Figura 3), sendo este um fator positivo quando se fala de redução de perdas de energia elétrica na distribuição de energia. No modelo esquemático observa-se ainda que, a conexão com a rede através da geração distribuída (GD) está posicionada entre o contador de vendas e

contador de consumo, este posicionamento é importante para análise quantitativa da energia produzida/consumida, tanto para o consumidor-produtor quanto para a concessionária de energia.



Figura 3: Esquema da geração distribuída. MME (2017).

A instalação dos painéis está localizada próxima à área de consumo (Figura 3), sendo este um fator positivo quando se fala de redução de perdas de energia elétrica na distribuição de energia. No modelo esquemático observa-se ainda que, a conexão com a rede através da geração distribuída (GD) está posicionada entre o contador de vendas e contador de consumo, este posicionamento é importante para análise quantitativa da energia produzida/consumida, tanto para o consumidor-produtor quanto para a concessionária de energia.

A escolha do aproveitamento do espaço construído para a aplicação da energia solar fotovoltaica, foi realizada com o intuito de explorar de forma sustentável o espaço. Desta forma, torna-se interessante aplicar esta fonte energética nas construções presentes no bairro, ao invés de propor a construção de uma usina ou uma fazenda solar para atender energeticamente este mesmo bairro.

5. REFERENCIAL TEÓRICO

5.1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A energia se apresenta de diversas formas na natureza, podendo ser convertidas entre si. Essa possibilidade de conversão é uma característica essencial das formas energéticas. Todos os processos de conversão energética, independentemente dos sistemas considerados e das formas de energia envolvidas, são regidos por duas leis físicas fundamentais: a Lei da Conservação da Energia e a Lei da Dissipação da Energia (em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto).

A Lei da Conservação de Energia, segundo a qual energia não se cria e não se destrói, e também é conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica e permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas e quantificar os fluxos energéticos. Segundo Viana *et al.* (2012), o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema energético, η_{energ} , baseia-se também nesta lei, relacionando o efeito energético útil com o consumo energético no sistema. Esta relação pode ser observada nas Equações 1 e 2, válida para um sistema em regime permanente, isto é, quando não há variação da energia no sistema.

$$\begin{array}{ccc} \xrightarrow{E_{consumida}} & \text{Sistema Energético} & \begin{array}{l} \xrightarrow{E_{útil}} \\ \xrightarrow{Perdas} \end{array} \\ & \frac{\partial}{\partial t} = 0 & \end{array} \quad (1)$$

$$\eta_{energ} = \frac{E_{útil}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}} \quad (2)$$

Desta forma, o balanço energético pode ser entendido a partir da Equação 2 onde a chamada $E_{útil}$ está diretamente associada a $E_{consumida}$ sendo subtraídas as perdas do sistema.

Pode-se dizer que a eficiência energética ocorre quando o sistema energético opera de forma otimizada atendendo às demandas com um consumo reduzido e perdas mínimas. Do ponto de vista da engenharia civil e da arquitetura, a eficiência energética deve ser um fator inerente ao potencial da edificação em possibilitar conforto ambiental aos seus usuários, com baixo consumo de energia. O conforto ambiental pode ser definido como sendo um conjunto de condições ambientais que permitem ao ser humano sentir bem estar térmico, visual, acústico e antropométrico, além de garantir a qualidade do ar e o conforto olfativo (LAMBERTS et al., 2014).

A eficiência energética tem sido aplicada em instalações e equipamentos elétricos a fim de reduzir o consumo energético, como na iluminação, por exemplo. Conforme explana Santos (2007), a iluminação é responsável por, aproximadamente, 23% do consumo de energia elétrica no setor residencial, 44% no setor comercial e serviços públicos e 1% no setor industrial.

A Lei 10.295/2001 (BRASIL, 2001) dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. Este foi um marco muito importante para a eficiência energética no Brasil. Em 2001 foi instituído o Comitê Gestor de Indicadores e de Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, através do Decreto 4.059/2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. O CGIEE iniciou seus trabalhos em 2002 (Viana, 2012) e obteve resultados concretos que se traduziram

em economia de energia significativa para o país ao longo do tempo. A consolidação da implementação da Lei Nacional de Eficiência Energética produz, como consequência: retirada do mercado, a médio e longo prazo, dos equipamentos que apresentam menor eficiência energética; economia de energia ao longo do tempo, ou seja, a médio e longo prazo; desenvolvimento tecnológico, através da fabricação de equipamentos energeticamente mais eficientes; aumento da competitividade industrial do país; redução dos gastos dos consumidores e redução dos impactos socioambientais através do uso de equipamentos que consomem menos energia.

Em paralelo a aplicação da Lei de Eficiência Energética, tem-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) estabelecendo padrões e/ou etiquetas de eficiência energética dos equipamentos, de forma voluntária. Viana (2012), informa que o Brasil começou a implementar o PBE com o apoio da Eletrobrás/Procel e do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, a partir de 1985.

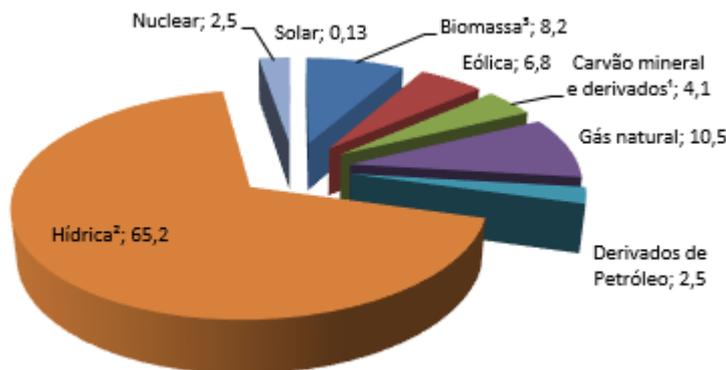
5.2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

As energias renováveis são fontes de energia presentes na natureza, consideradas inesgotáveis. Pode-se citar a solar, eólica, biomassa, geotérmica, ondas e marés, além das pequenas centrais hidrelétricas, entre outras. Estas começam a disputar entre si maiores esforços no sentido de aumentar a eficiência tecnológica dos equipamentos de conversão e assim gerar eletricidade em maior escala. A energia solar é a fonte primária de todas as outras energias, trata-se de um recurso abundante e inesgotável.

O Brasil tem sido um importante ator nas discussões internacionais sobre os efeitos e mecanismos de compensação e redução das emissões de gases de efeito-estufa, comprometendo-se a oferecer maior diversificação de sua matriz energética. No país, a energia eólica encontra-se em estado avançado em relação às demais fontes supracitadas, sendo considerada uma fonte alternativa de energia. Do mesmo modo, a energia solar vem se tornando cada vez mais utilizada.

Para a expansão das energias renováveis a indústria passou por um processo de transferência tecnológica, e a inovação, já é uma realidade para o setor energético dentro das cidades. Salienta-se que a apropriação tecnológica não é um processo estritamente técnico, considera-se também a estrutura socioeconômica do lugar, portanto, pode haver a necessidade de apoio ou de incentivos financeiros para esta ação. As energias renováveis têm contribuindo em larga escala para a obtenção de energia limpa. A energia solar ganha destaque na atualidade, expandindo-se por diversos países.

As fontes renováveis representam 80,4% (biomassa, eólica, hídrica e solar) da oferta interna de eletricidade no Brasil (Figura 4).



Notas: 1. Inclui gás de coqueria 2. Inclui importação de eletricidade 3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

Figura 4: Percentual da oferta Interna de Energia por fonte. (BEN, 2018). Adaptado pela autora.

Pode-se notar que a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável. 68,1% de toda energia elétrica produzida no país é derivado da geração hidráulica através das hidrelétricas tradicionais e as PCH (pequenas centrais hidrelétricas), observa-se também que a contribuição da energia solar é muito pequena, logo investimentos e incentivos para a energia solar fazem-se necessários para difundir esta fonte e assim tornar a matriz energética menos dependente de fatores climáticos (chuvas) para abastecer as bacias onde se encontram as hidrelétricas tornando, assim, a matriz elétrica brasileira mais robusta e diversificada.

A energia solar fotovoltaica é a conversão direta da energia solar radiante em energia elétrica (em corrente contínua), é basicamente a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (chamado efeito fotovoltaico) através de um dispositivo fabricado com material semicondutor chamado de célula fotovoltaica.

As tecnologias aplicadas na produção das células fotovoltaicas são classificadas em três gerações. A primeira é dividida em duas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representa mais de 85% do mercado, por ser considerada tecnologia consolidada e confiável e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível (PINHO e GALDINO, 2014). A segunda geração, comercialmente chamada de filmes finos, é dividida em três: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe). A terceira geração ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento (P&D), e também é dividida em três: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante

(DSSC – *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas e poliméricas (OPV – *Organic Photovoltaics*).

A Figura 5 mostra a evolução da eficiência das células fotovoltaicas verificada nos períodos de 1990 a 2010. A segunda célula mais eficiente dentre as que estão disponíveis comercialmente é a silício monocristalino (m-Si), conforme já mencionado anteriormente. Analisando a mesma pode-se concluir que as células multijunção para concentração (III-V MJ Conc), ainda em fase de P&D, apresentou uma eficiência bem superior às demais.

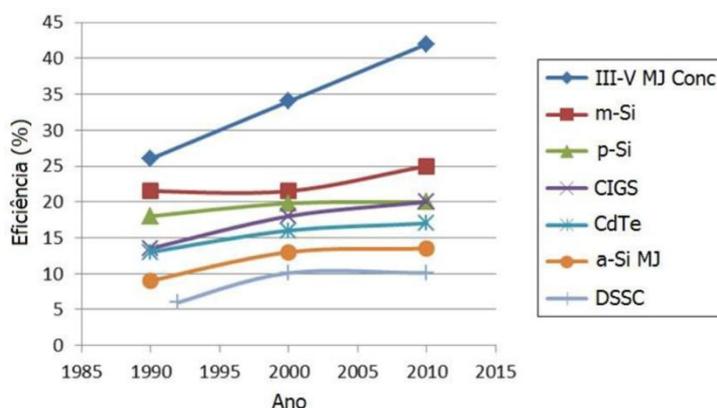


Figura 5: Desenvolvimento das Células Fotovoltaicas. GREEN, 2011: Adaptado pela autora.

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em sistemas ligados à rede e sistemas autônomos. No último caso, o aproveitamento da energia solar precisa ser ajustado à procura energética. Uma vez que a energia produzida não corresponde (na maior parte das vezes) à procura pontual de energia de um consumidor, torna-se obrigatório considerar um sistema de armazenamento (baterias) e meios de apoio complementares de produção de energia (sistemas híbridos).

Para o aproveitamento solar fotovoltaico, faz-se uso da Irradiação Global Horizontal (GHI) - que quantifica a radiação recebida por uma superfície plana horizontal. A GHI é composta pela Irradiação Difusa Horizontal (DIF) e pela Irradiação Normal Direta (DNI). A DIF é a parcela dispersa e atenuada por reflexões em nuvens, poeira, vapor d'água e outros elementos em suspensão na atmosfera. A DIN é a parcela que atinge o solo diretamente, sem reflexões. Em dias nublados, a principal fração é a DIF, enquanto que em dias claros prevalece a DNI (EPE, 2012).

A capacidade de um módulo fotovoltaico é medida por uma unidade chamada *watt pico* (Wp) e está associada a um conjunto de condições instantâneas de intensidade e espectro da radiação solar incidente e temperatura da célula fotovoltaica. A condição padrão para plotagem das curvas e testes dos módulos e definição da sua potência

nominal (em W_p) é definida para radiação de 1000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio-dia), e temperatura de 25°C na célula - a eficiência da célula fotovoltaica é reduzida com o aumento de temperatura (TOLMASQUIM, 2004).

Dois fatores principais afetam a eficiência da conversão: são a temperatura ambiente de operação (uma vez que esta pode contribuir para o conseqüente aumento da temperatura da célula) e a intensidade da irradiação solar incidente sobre a célula. Este último fator é afetado tanto pela nebulosidade local quanto pelo ângulo de inclinação da célula em relação ao sol. A eficiência da conversão se reduz ao longo da vida útil das células a taxa próxima de 1% ao ano (EPE, 2012). A partir dos gráficos com as curvas características de tensão e corrente de um painel fotovoltaico em diferentes temperaturas das células e níveis de irradiação (Figura 6), verifica-se que: mudanças na intensidade de radiação tem resultado direto na corrente de saída do dispositivo, impactando na energia gerada; temperaturas muito elevadas ocasionam redução na tensão e elevação de corrente elétrica, dependendo da carga a redução de tensão pode não ser suficiente para acioná-la.

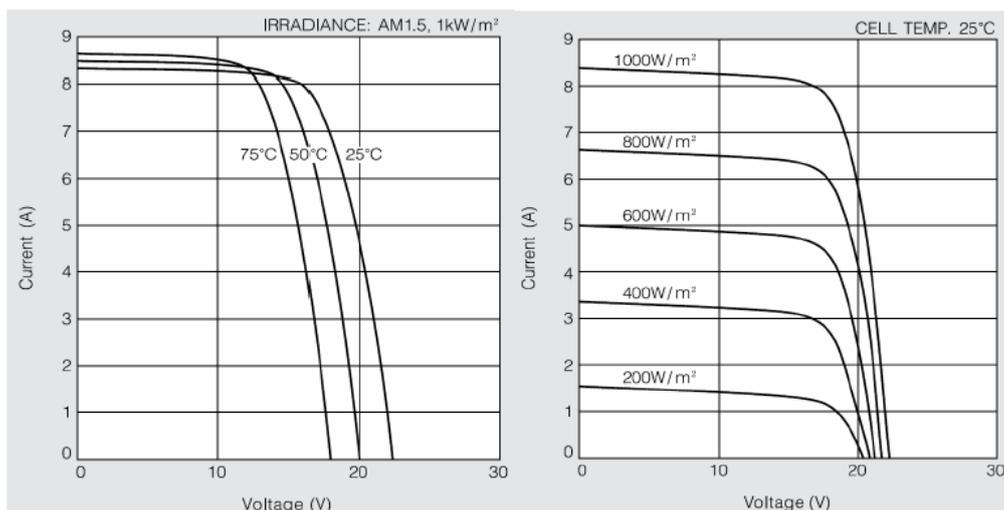


Figura 6: Curvas características das células fotovoltaicas. Kyocera apud EPE, 2012.

Do ponto de vista da engenharia elétrica, os principais desafios da geração fotovoltaica para um sistema conectado à rede elétrica são as distorções harmônicas e a elevação de tensão, existindo uma dificuldade em se buscar uma otimização para este problema.

5.2.1. Funcionamento do módulo fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos são compostos por células semicondutoras de eletricidade, geralmente produzidas a partir do silício. Cada célula solar compõe-se de

uma camada fina de material tipo N e outra com maior espessura de material tipo P (Figura 7).

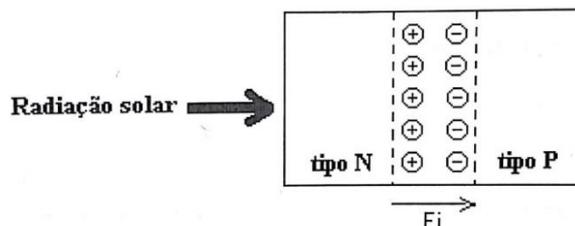


Figura 7: Diagrama esquemático de uma célula fotovoltaica. Fraidenraich, N. e Lyra (1995) *apud* Fraidenraich, N. *et al.* (2003).

Separadamente, ambas as camadas são eletricamente neutras, mas ao serem unidas, na interface entre ambos os materiais, os elétrons do silício tipo N difundem para o lado P. Processo análogo ocorre do lado P. O deslocamento dos elétrons do lado N para o lado P deixa em N uma deficiência de cargas negativas (carga líquida positiva). Da mesma forma, a difusão de lacunas para o lado N deixa o lado P com uma carga negativa. Fica estabelecido, portanto, um dipolo, com cargas positivas na região N e negativas na região P, associado a um campo elétrico interno, E_i , no sentido N-P. o campo elétrico reestabelece, desta forma, as condições de equilíbrio na junção P-N (FRAIDENRAICH, *et al.*, 2003).

Conforme explanam Fraidenraich *et al.* (2003), ao incidir luz sob a célula fotovoltaica, a absorção de fótons produz a passagem de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Estabelece-se um campo elétrico interno na interface da junção P-N (os portadores gerados pelos fótons absorvidos estão sujeitos à ação deste campo) dando origem a uma corrente que atravessa a carga externa. A presença desta carga estabelece uma diferença de potencial nos extremos da junção, que varia de acordo com a intensidade da corrente que a atravessa. A junção fica polarizada positivamente reproduzindo o comportamento no escuro ao qual deve se adicionar a foto-corrente gerada pela iluminação. A intensidade da corrente gerada variará proporcionalmente à intensidade de luz incidente. A curva característica da célula solar será o resultado da superposição de ambos os efeitos (foto-corrente mais junção no escuro). Finalmente, na carga externa observa-se uma corrente que atravessa uma diferença de potencial, transferindo energia para a mesma. Enquanto a luz incidir na célula, a geração de energia haverá de continuar. Um módulo fotovoltaico é uma associação de células conectadas em série que formam uma unidade com tensão

suficiente para carregar a carga. Conectando-se estes módulos em série ou paralelo, obtém-se um painel fotovoltaico.

Os sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica são basicamente de pequeno porte residenciais, geração distribuída – de médio porte – e centrais de potência. Em sistemas residenciais o consumidor-produtor gera energia elétrica à partir de módulos fotovoltaicos, complementando suas necessidades energéticas com a rede. Em caso de excesso de geração, há possibilidade de negociação deste junto à distribuidora de energia elétrica.

A geração distribuída caracteriza-se pelo uso de sistemas fotovoltaicos em determinados pontos da rede de transmissão e distribuição, com o intuito de: reduzir perdas elétricas, aumentar a confiabilidade do sistema de transmissão e distribuição, melhorar a potência fornecida em pontos de linha, evitar ou adiar o redimensionamento de equipamentos de transmissão e distribuição. Segundo o MME (2017), a Resolução Normativa ANEEL nº 687/15, complementar à 482/12, estabelece que uma geração abaixo de 75 kW é definida como microgeração, e acima de 75 kW e até 5 MW é minigeração, e esta definição vale para qualquer fonte renovável de geração. Enquadram-se nas modalidades tratadas por esta normativa os imóveis individuais, condomínios, cooperativas e consórcios. A eficiência máxima teórica da célula de silício monocristalino exposta a uma radiação do sol encontra-se em torno de 25%. Células com concentração podem atingir eficiências de 29%. Note-se que estes valores de eficiência são obtidos em testes de laboratório e, que ocorre uma redução desta eficiência no uso das células manufaturadas.

Em termos sócio-econômicos, Fraidenraich *et. al.* (2003) apresentam algumas características relevantes à tecnologia fotovoltaica para geração de eletricidade em escala comercial, e sua comparação com fontes convencionais de energia elétrica. A área necessária para instalação de centrais de geração a carvão e nuclear, tem certa equivalência com a fotovoltaica, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Comparação entre áreas de instalação de centrais de geração a carvão e nuclear x área de um sistema fotovoltaico.

Fonte	Área (hectares/GWh)
Fotovoltaica	0,0320
Carvão	0,0360
Nuclear	0,0332

Fraidenraich *et. al.* (2003). Adaptado pela autora.

Quanto a geração de empregos especializados, a eletricidade fotovoltaica utiliza 12 a 14 homens-hora/GWano contra 3 a 4 homens-hora/GWano para a geração elétrica utilizando carvão ou nuclear.

O fato da área, medida em hectares por geração de energia (hectares/GWh), necessária para instalação de uma planta fotovoltaica ser inferior ao necessário para plantas utilizando carvão e energia nuclear representa mais uma indicação da eficiência do uso de recursos renováveis. Em termos de ocupação do espaço, a fonte renovável apresenta-se vantajosa em relação às demais comparadas na Tabela 3.

5.2.2. Panorama Internacional da energia solar

No final de 2009 havia no globo 23 GW de potência instalada em sistemas de energia solar fotovoltaica, o equivalente a 15 termoeletricas a carvão de médio porte (*SOLAR GENERATION 6 – Full Report*, EPIA, 2011). Ainda segundo o *SOLAR GENERATION 6 – Full Report* (EPIA, 2011), alguns indicadores mostram que o custo de produção de energia solar cai cerca de 22% cada vez que a capacidade instalada mundial dobra e que a eficiência dos módulos solares tem melhorado em alguns pontos percentuais a cada ano. Em um cenário seguindo o padrão de expansão industrial atual incluindo políticas de suporte adequadas, a energia fotovoltaica pode chegar a prover 345 GW em 2020, algo em torno de 4% do consumo mundial.

No contexto internacional pode-se destacar a Alemanha como líder em pesquisa e desenvolvimento em energia solar fotovoltaica, sendo o primeiro país a introduzir um sistema de tarifas *feed-in*, onde o consumidor é premiado por gerar energia limpa e por exportá-la à rede, através de tarifas pré-estabelecidas por contrato. Na Alemanha, a maioria dos sistemas fotovoltaicos encontra-se conectada à rede de distribuição de energia elétrica. Há previsões no sentido de que, no ano 2050, os sistemas fotovoltaicos possam ser responsáveis por uma fatia significativa da energia elétrica fornecida, atingindo este valor cerca de um terço do total. (COOPER e JUNIOR, 2013).

A China foi por muito tempo marcada pela produção de energia suja, com a queima do carvão mineral. Vieira (2018) explica que a China superou a pioneira Alemanha na capacidade instalada de geração de energia solar: 130 GW, o equivalente a 80% de toda a matriz elétrica brasileira, e se tornou a maior fabricante de painéis solares do mundo. Nos Estados Unidos, a fabricante de carros elétricos Tesla, ultrapassou a fronteira dos sistemas fotovoltaicos comuns para criar uma telha solar, que gera energia

e substitui a telha tradicional. Em vários estados americanos, a exemplo da Califórnia, é possível vender o excedente produzido pelos painéis aos vizinhos — o que é impossível no mercado brasileiro, onde o livre comércio de energia só é autorizado para grandes consumidores. Dentre os 15 maiores em geração solar, a Grécia apresentou o maior percentual de geração solar em relação à sua geração total, de 8,2%, seguida da Itália (8,1%) (MME, 2017).

Segundo o MME (2017), os cinco primeiros países em potência instalada respondem por 74% do total mundial. Em 2018, o Brasil deverá estar entre os 15 países maiores geradores de energia solar, ao se considerar a operação da potência já contratada, de 2,6 GW. Em termos de área geográfica, os 301 GW de potência instalada em 2016, correspondem a um quadrado de 57 km de lado.

5.2.3. Panorama Brasileiro da energia solar

Ao contrário de países europeus e asiáticos juntamente com os Estados Unidos, que apresentam forte crescimento do parque solar instalado, o uso desta tecnologia no Brasil está muito aquém do seu potencial de geração.

Em 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL lançou o que pode ser considerado um marco regulatório para a inserção da geração fotovoltaica no Brasil: a Resolução Normativa No 482/2012, que “Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica”.

O Brasil apresenta um constante crescimento na utilização da fonte solar fotovoltaica. Isto se deve ao grande potencial de geração, ao ganho de eficiência em tecnologias que aumentam a eficiência do sistema fotovoltaico, e a uma ligeira queda nos custos dos equipamentos.

A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) anunciou no início de 2018 que o Brasil ultrapassou 1GW de capacidade instalada de energia solar, sendo isto suficiente para abastecer cerca de 500 mil residências. Por muito tempo essa fonte energética foi vista como algo secundário e extravagante no setor energético, é ainda a menos consumida entre as renováveis, contudo, começa a prosperar, tornando-se cada vez mais acessível. Ressalta-se que o primeiro leilão de energia solar fotovoltaica no Brasil aconteceu em 2014.

O 6º Leilão de Energia de Reserva (LER), realizado em 31 de outubro de 2014, pode ser considerado um marco histórico para o setor fotovoltaico brasileiro,

representando a primeira contratação da fonte em um leilão federal de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). A partir de agora, a energia solar fotovoltaica torna-se realidade como uma alternativa energética renovável, limpa e sustentável para o desenvolvimento da matriz elétrica do país. Este foi, portanto, um passo decisivo para o setor fotovoltaico brasileiro (ABSOLAR, 2014). Em 2015, mais dois leilões foram realizados, totalizando 2.653 MW contratados, com início de suprimento em 2017 e 2018 (MME, 2017).

Roxa (2018), afirma que o Parque Solar Nova Olinda (Ribeira do Piauí-PI) em Ribeira do Piauí, a 380 quilômetros de Teresina, foi inaugurado em novembro de 2017 o maior parque solar em operação da América Latina. Com 930 mil placas de captação de energia fotovoltaica, o empreendimento é capaz de suprir 300 mil domicílios. Do mesmo modo, quando estiver em operação plena, a Usina Solar de Pirapora (Pirapora-MG), será a maior da América Latina. O projeto começou a funcionar em setembro, a segunda fase foi iniciada em outubro e a terceira e última etapa se concluirá ao final do primeiro semestre de 2018. A capacidade total de geração do projeto será suficiente para abastecer 420 mil casas por ano.

Outro exemplo a citar das fazendas solares instaladas em Minas Gerais, é a de capacidade equivalente a 1 megawatt. Essa energia gerada consegue atender ao consumo de 70 clientes, entre restaurantes, bares e açougues. Vieira (2018) afirma que o estado lidera a corrida solar no Brasil, com 5 000 sistemas instalados. O estado foi o primeiro a isentar a cobrança de 30% de imposto sobre circulação de mercadorias e serviços que incidia sobre a troca de energia entre consumidores e concessionária. O tempo de retorno do investimento do consumidor num sistema fotovoltaico no estado de Minas Gerais é um dos menores do país. Em apenas 5 anos, a geração de energia solar por meio de painel fotovoltaico cresceu 81000% no Brasil (Vieira, 2018) conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Crescimento de sistemas fotovoltaicos no Brasil

Ano	Número de sistemas FV
2013	29
2015	1.768
2018 (março)	23.584

Vieira, 2018. Adaptado pela autora.

Para Vieira (2018), este crescimento foi motivado pela queda de 80% nos preços dos equipamentos nos últimos 10 anos. Também pelo aumento de 44% da energia elétrica nos últimos 6 anos. Em 2018, a instalação de quatro painéis solares com

capacidade total de 1,25 megawatt custa aproximadamente 15.000 reais. Em 2015, era de 30.000 reais.

Além disso, todos os estados brasileiros e o Distrito Federal oferecem isenção de impostos (ICMS) sobre a energia produzida por autogeradores no Brasil. Segundo a ABSOLAR o Amazonas, Paraná e Santa Catarina formalizaram adesões ao Convênio ICMS nº 16/2015, que autoriza os governos estaduais a isentarem o ICMS sobre a energia elétrica produzida a partir de fontes renováveis em residências, comércios, indústrias, edifícios públicos e na zona rural, por meio da microgeração e minigeração distribuída solar fotovoltaica. A adesão foi oficializada por meio do Convênio ICMS nº 42/2018, publicado no Diário Oficial da União do dia 17 de maio de 2018. Os demais estados já haviam realizado esta adesão. Agora, a medida passará a beneficiar todos os Estados da Federação, abrangendo 100% da população, empresas e produtores rurais do País.

O gráfico da Figura 8 mostra a potência instalada de energia solar em cada estado no Brasil. Considerando todas as fontes de micro e mini GD, o setor comercial detém a maior participação em potência (37%), o residencial a maior participação em nº de usuários (75%), e o industrial a maior potência média por usuário (81 kW) (MME, 2017). Em 2017, o Brasil ingressou no ranking mundial do setor solar fotovoltaico. Neste ano o país investiu 0,9 GW no setor, tornando-se o 10º maior investidor dessa modalidade energética.



Figura 8: Potência instalada solar centralizada, por UF (MW) – 09/10/2017. MME, 2017.

Segundo a ABSOLAR, a geração distribuída solar fotovoltaica no país, atualmente, equivale a 401,6 MW. Enquanto isso, a geração centralizada acumula 1.349,0 MW. No total são 1750,6 MW. O estado de Minas Gerais é líder em potência instalada com 95,8 MW, com valores muito superiores aos observados em outros estados, seguido do Rio Grande do Sul (56,2 MW), São Paulo (49,4), Santa Catarina (25,7) e do Paraná (20,4 MW).

Com relação aos fabricantes de painéis fotovoltaicos, há isenção de imposto na compra de um painel completo, porém, isto não acontece na compra de peças para sua montagem. Desta forma a importação do painel torna-se tributariamente vantajosa sobre a fabricação nacional. A China é líder de mercado na fabricação de painéis fotovoltaicos. Vieira (2018) explana que a BYD (Construa seus Sonhos - Build Your Dreams), chinesa com 40 fábricas no mundo, entre painéis solares, veículos elétricos e baterias, inaugurou em fevereiro de 2017, uma de suas maiores fábricas de painéis em Campinas. A Companhia Paulista de Força e Luz – CPFL Energia, agora parte da estatal chinesa de energia State Grid, criou em 2017 uma empresa do Grupo CPFL Energia, focada na alta da demanda por geração solar distribuída: a ENVO, voltada para o mercado de pequenos estabelecimentos comerciais. Antes disso, em 2016, a CPFL já havia dado início à instalação de painéis solares para 200 consumidores de Campinas, no interior de São Paulo, a fim de avaliar o impacto da microgeração em redes elétricas de baixa tensão, aproveitando um fundo de incentivo da Aneel à pesquisa em eficiência.

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2026 estima que a capacidade instalada de geração solar chegue a 13 GW em 2026, sendo 9,6 GW de geração centralizada e 3,4 GW de geração distribuída. A proporção da potência solar chegará a 5,7% do total (MME, 2017).

5.2.4. Potencial de Geração fotovoltaico do Brasil

Para o cálculo do potencial de geração solar fotovoltaica, dois dados básicos são necessários: eficiência ou rendimento das placas e radiação solar, geralmente representada em kWh/m². Os dados de eficiência são dados de placa dos módulos, obtidos em laboratório. O ponto mais importante torna-se, portanto, uma análise da radiação solar do local onde se pretende instalar um sistema de geração fotovoltaico (COOPER e JUNIOR, 2013). Na Figura 9 pode-se notar o grande potencial ainda pouco explorado de geração fotovoltaica no Brasil.

A escala de cores indica os maiores valores de radiação solar global (acima de 6,65 kWh/m²) através das cores mais claras. Nota-se que praticamente todo o litoral leste do Brasil apresenta um grande potencial, porém ainda nada comparado com o interior do Nordeste onde, de acordo com o mapa de radiação solar, apresenta o maior potencial de geração do território brasileiro.

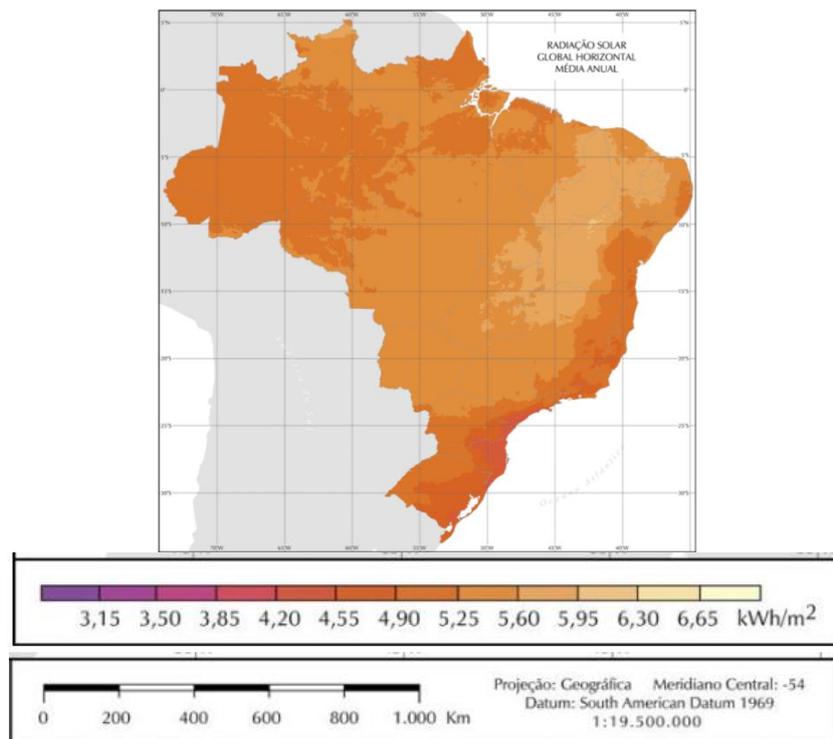


Figura 9: Radiação Solar Global Horizontal (GHI) Média Anual. PEREIRA *et al*, 2006. Atlas brasileiro de energia solar.

Viana (2010) destaca o potencial de geração fotovoltaica, em kWh, de acordo com a potência instalada de sistema fotovoltaico concentrado (SFVC), em kW_p, conforme mapa da Figura 10.

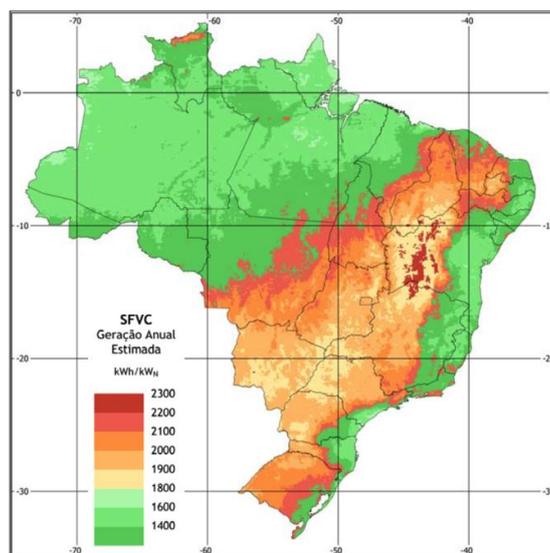


Figura 10: Mapa de geração fotovoltaica anual estimada, para SFVC, em kWh/kW_p/ano. VIANA *et al*, 2010.

A partir do mapa do Atlas de geração estimada com SFVC, preparado para o Brasil nota-se que, mesmo nas regiões com os menores níveis de irradiação direta normal, se pode esperar uma produtividade anual de 1.400 kWh/kW_p/ano (VIANA *et*

al., 2010). As faixas de valores do total anual de geração estimada, em kWh/kWp/ano, são baseadas em uma metodologia que leva em conta os níveis de desempenho de SFVC operando em países como a Espanha (VIANA 2010, *apud* LERCHENMÜLLER *et al.*, 2005, LERCHENMÜLLER *et al.*, 2007, PERPIÑAN *et al.*, 2008).

O preço do módulo fotovoltaico foi por muito tempo um entrave à expansão deste tipo de energia, contudo, este tem sofrido quedas consideráveis nos últimos anos. Em 1981, o preço do módulo fotovoltaico era superior a US\$ 20.000 por quilowatt; no ano 2000 módulos fotovoltaicos custavam cerca de US\$ 3.500 por quilowatt (Goldemberg *et al.*, 2002). Atualmente, no Brasil, o mercado de placas fotovoltaicas oferece dos mais variados e acessíveis projetos de energia solar.

Um sistema fotovoltaico pode ser utilizado para atender qualquer carga, contudo, seu dimensionamento pode apresentar requisitos específicos. Os fatores imprescindíveis para a aplicação deste sistema são: área para instalação dos coletores solares, radiação solar incidente e investimento. Assim sendo, sua viabilidade está intimamente ligada à qualidade do recurso solar no local desejado para aplicação.

Até o início de 1950 as células fotovoltaicas eram basicamente utilizadas como sensores de radiação luminosa. A partir dos anos 70, as células para aplicação terrestre superaram as células para uso espacial. Entre os anos 50 e 70, estas eram utilizadas especialmente para ser fonte de energia das naves espaciais. Atualmente notam-se grandes avanços na aplicação de tais células, tais como: melhoria na eficiência do processo de conversão de energia solar em energia elétrica, crescimento da produção e vendas, comercialização em níveis internacionais e expansão das oportunidades de aplicação. No Brasil, a Lei 10.438/2002 que estabelece a universalização dos serviços de energia elétrica, pode ser citada como um incentivo legal ao uso de células fotovoltaicas, tais como de outras fontes de energia. Contudo, não é objeto deste trabalho detalhar tal legislação.

A irradiação média anual brasileira varia entre 1.200 e 2.400 kWh/m²/ano, bem acima da média da Europa, mas há no mundo regiões com valores acima de 3.000 kWh/m²/ano, como Austrália, norte e sul da África, Oriente Médio, parte da Ásia Central, parte da Índia, sudoeste dos USA, além de México, Chile e Perú. (MME, 2017)

O MME (2017) explana que a região Nordeste apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com a maior média e a menor variabilidade anual entre todas as regiões geográficas. Os valores máximos de irradiação solar no país são observados na região central da Bahia (6,5kWh/m²/dia), incluindo, parcialmente, o noroeste de Minas

Gerais. Há, durante todo o ano, condições climáticas que conferem um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para essa região semiárida.

Segundo a EPE (2012) a Alemanha tem um índice de radiação solar entre 2,5 e 3,47 kWh/m²/dia índice muito inferior a países com baixas latitudes, incluindo a região sul do Brasil, como por exemplo, a costa norte do estado de Santa Catarina que apresenta média de 1551 kWh/m²/ano.

5.3. LEED NEIGHBORHOOD

A estruturação urbana é extremamente importante para o estudo de geração de energia solar fotovoltaica no meio urbano. O setor residencial possui grande área disponível para instalação de painéis fotovoltaicos, sendo capaz de gerar energia além do seu consumo. A arquitetura empregada neste setor apresenta grande área de telhado, situam-se próximas umas às outras, possuem, geralmente o mesmo porte, permitindo menor sombreamento em sua cobertura. Portanto, possui estruturalmente as melhores aplicações para sistemas fotovoltaicos integrados às edificações.

No caso de uma compactação urbana excessivamente verticalizada, é possível pressupor edificações com menor área em sua cobertura e maior sombreamento. A teoria de cidade compacta surge primariamente como uma tentativa de responder aos problemas internos da mesma, assim como aos problemas de sustentabilidade inerentes ao desenvolvimento das áreas urbanas. Compreender os vários modelos de formas urbanas é fundamental para entender o conceito de cidade compacta. Segundo Gomes (2009), na procura da forma ideal muitas vezes a teoria da cidade compacta induz a forma monocêntrica, apenas com um centro. No entanto, esta forma já não corresponde às necessidades atuais da população, assim como não é sustentável e viável a partir de um determinado tamanho. Neste sentido, introduz-se o conceito de cidade compacta e polinucleada.

Para Rogers (2001, *apud* MESTRINER 2008), uma cidade mais densa e pouco espraiada evitaria a invasão das áreas rurais, ou, como no caso de São Paulo, a não invasão das reservas ambientais. Isto traz benefícios ecológicos maiores. Através de um planejamento integrado, as cidades podem ser pensadas tendo em vista um aumento de sua eficiência energética, menor consumo de recursos, menor nível de poluição. Uma cidade densa e socialmente diversificada onde as atividades econômicas e sociais se sobreponham e onde as comunidades sejam concentradas em torno das unidades de vizinhança

A concepção de cidade compacta, segundo Mestriner (2008), prediz que o encontro das funções sociais dos cidadãos (moradia, trabalho e lazer) deve ser expresso na condição urbana que o centro propicia. Desta forma, os usos mistos e as densidades tradicionais dos centros urbanos devem trazer de volta a vivência que foi perdida após a implementação do uso do carro como transporte individual. Neste conceito as cidades garantem estrutura física para oportunidades de emprego e riqueza, além de habitação de qualidade para a formação de uma comunidade urbana. A cidade procura resolver os seus problemas dentro dos seus próprios limites, evitando o *urban sprawl* (expansão) e o consumo de mais terrenos.

Os setores centrais da cidade, com edificações em altura e uso de comércio e serviços, apresentam um pico de demanda energética diurno. Isto representa uma sobrecarga diurna à rede elétrica. Uma característica da configuração urbana dessas zonas é a inexistência de grandes áreas livres entre as edificações, isto resulta em considerável área de cobertura disponível para aplicação dos sistemas fotovoltaicos, apesar de apresentar sombreamento devido à grande altura das edificações.

O estudo da forma urbana é fundamental para a conquista da sustentabilidade urbana. São muitos os conceitos de sustentabilidade urbana sendo inclusive aprovada recentemente (2017) no Brasil pela ABNT a NBR ISO 37120 (NBR ISO 37120 – Desenvolvimento sustentável de comunidades – Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida). Algumas referências internacionais também são de grande valia como a certificação LEED que tem mudado o modo como os edifícios e as comunidades são planejados, construídos e operados. No caso específico de bairro, destaca-se o LEED -ND.

O sistema de certificação LEED foi criado pelo *United States Green Building Concil* (USGBC), em 1998. É um método de classificação baseado na harmonização, ponderação de créditos (em função do impacto ambiental e da saúde humana) e regionalização. O selo certifica edifícios a partir de uma lista de pré-requisitos e créditos, e possui quatro níveis: Certificado, Prata, Ouro e Platina (USGBC, 2012 *apud* GRUMBERG, 2014). Através desta classificação é possível saber o quanto um empreendimento é sustentável. A certificação funciona como um guia para desenvolver os aspectos sustentáveis do empreendimento. Adequando-se aos critérios do sistema, o empreendimento garante aos usuários e investidores que sua construção atende a critérios sustentáveis e que haverá economia no consumo de recursos durante a sua operação. Além do bom retorno financeiro que um edifício certificado pode ter, também

há ganhos sociais e ecológicos para o entorno da construção e para os agentes envolvidos no processo da construção (GBC BRASIL, 2015 *apud* MARQUES, 2018).

O nível de certificação é definido conforme a quantidade de pontos adquiridos, podendo variar de 40 pontos a 110 pontos (MARQUES, 2018). Conforme explana a *Green Building Concil* – Brasil (GBC Brasil), a certificação LEED funciona para todos os edifícios e pode ser aplicado a qualquer momento no empreendimento. Quatro diferentes tipologias podem ser estudadas através do LEED. Para o desenvolvimento de bairros, utiliza-se a tipologia ND, LEED *Neighborhood*, uma das mais utilizadas no Brasil e se propõe a mudar a maneira como os edifícios e comunidades são planejados, construídos e operados.

O sistema LEED-ND enfatiza a localização do bairro e o desempenho da infraestrutura e dos edifícios dentro dele. Desta forma, tem foco na criação de bairros compactos, tranquilos, vibrantes e de uso misto com boas conexões com as comunidades vizinhas. Podem ser aplicados em bairros inteiros, partes de bairros ou vários bairros, portanto não possuem tamanho mínimo ou máximo para seu desenvolvimento, mas, no entanto, sugere-se que o tamanho mínimo seja de pelo menos dois edifícios habitáveis e o máximo um total de 320 acres, que equivale a aproximadamente 1,30 quilômetros quadrados (USGBC, CNU e NRDC, 2011 *apud* MARQUES, 2018).

6. ESTUDO PRÁTICO

6.1. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO PRÁTICO

A cidade do Rio de Janeiro (22° 54' 10" latitude sul, 43° 12' 27" longitude oeste) pode ser caracterizada por um clima tropical com chuvas de verão (Aw) segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, sendo uma região quente e úmida. Ela está localizada na Z8 de acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro e fazem parte das estratégias para esta região o controle da radiação solar direta, com a adoção de elementos de sombreamento e a promoção da perda de calor através da ventilação (Olgay, 2010; Lamberts et al., 2014). Desta forma a permeabilidade da malha urbana faz parte das recomendações para região.

A cidade do Rio de Janeiro possui potencial para a instalação do sistema fotovoltaico e mesmo para os meses de inverno, as condições se apresentam

categorizadas como excelentes (Figura 11) de acordo com o levantamento da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, o Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro (SEDEIS; EPE; IPP; GIZ, 2015).



Figura 11: Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro (SEDEIS; EPE; IPP; GIZ, 2015).

O estudo prático se concentra na área definida como Setor C do Projeto Porto Maravilha, portanto, uma região com potencial de utilização do sistema. Localizado entre a baía de Guanabara e o Morro da Providência, possui um potencial construtivo elevado, com quarteirões de usos diversificados.

Situado na parte plana da Área Portuária, sua delimitação (Figura 12) é definida pelas Av. Francisco Bicalho, Praça Marechal Hermes, Rua Santo Cristo, Avenida Professor Pereira Reis e Baía da Guanabara (Marques, 2018).

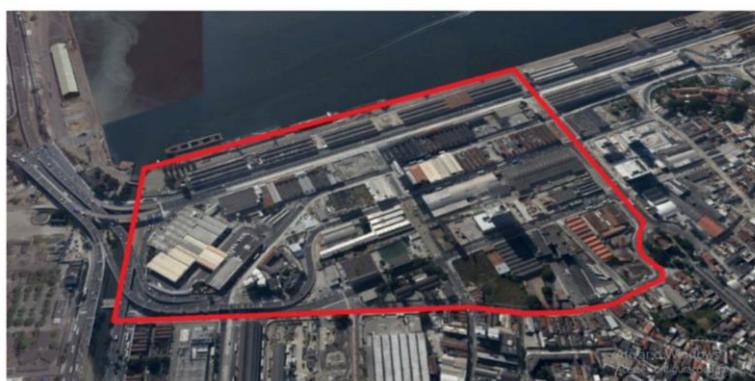


Figura 12: Delimitação do Setor C – LC 101/09. Marques, 2018.

Conforme descrito, trata-se uma análise comparativa da capacidade de geração de energia e de consumo para duas configurações da morfologia urbana propostas por Marques (2018). Os cenários propostos para a mesma região com densidade semelhante diferem em suas diretrizes e apresentam resultados muito diferentes. O Cenário I atendeu à Lei Complementar, LC 101/2009, que permite um importante processo de verticalização com quadras grandes. Já o Cenário II teve como base ações da certificação ambiental LEED – NB, o LEED para Desenvolvimento de Bairros. A partir

das imagens da Figura 14, observa-se os dois cenários (Cenário I e Cenário II) numa configuração 3D onde é possível entender as diferentes configurações apesar da densidade semelhante. Através das imagens da Figura 13 e da escala de cores nota-se que as temperaturas observadas na configuração com maior verticalização são mais elevadas, este fato se repete inclusive nas regiões circunvizinhas. Ressalta-se que para o Cenário I, os valores de temperatura do ar, ao nível do pedestre, são mais elevados, atingindo em alguns trechos uma diferença de 3°C.

Assis (2000) coloca que o adensamento e a intensa verticalização em grandes centros urbanos comprometem o acesso ao sol e à luz interferindo nas questões de saúde e de habitabilidade dos espaços internos. Para Knowles (1981) cada fração de propriedade deve ter a garantia do mesmo acesso ao sol, sob a lei. Segundo ele, o resultado seria um envelope de volume desenvolvível que expandiria seu tamanho e forma a partir do tamanho, forma, inclinação e orientação da propriedade.

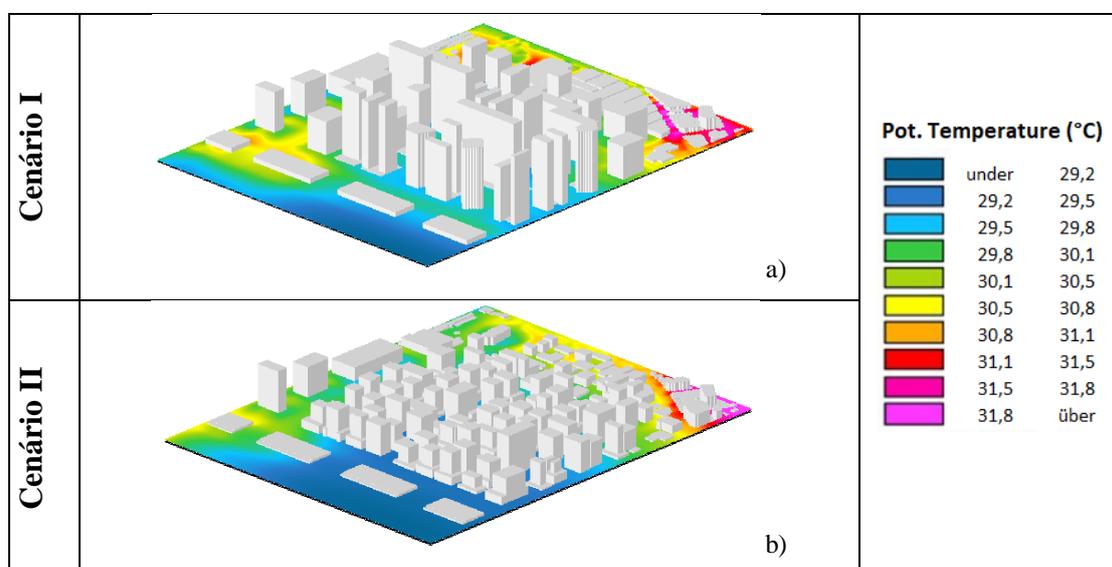


Figura 13: As duas configurações estudadas para o Setor C - LC 101/09: a) Cenário I e b) Cenário II.

6.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para cálculo da geração da energia solar capaz de atender ao Setor C, se faz necessário levantar a demanda energética e conhecer o índice de irradiação solar no local a ser estudado. Previamente, é desenvolvido o levantamento da carga residencial, utilizando esta como base para os cálculos. Será considerado o consumo padrão de uma residência média (de 3 a 4 pessoas). A demanda de energia elétrica calculada será expandida para o bairro. O levantamento de cargas de uso específico se dá pelo cálculo das potências dos equipamentos e do seu tempo de utilização. Quando se trata de

consumo, utiliza-se a unidade Wh (Watt-hora), indicando consumo por unidade de tempo (Equação 3).

$$\text{Potência [W]} \times \text{tempo de utilização [h]} = \text{Consumo [Wh]} \quad (3)$$

A Equação 3 considera o consumo diário. Este consumo calculado é portanto, a energia necessária [E], que deve ser gerada pelo sistema fotovoltaico. O índice solarmérico a ser usado foi medido em um ponto central da região de estudo (Figura 14). As coordenadas geográficas correspondentes são: latitude ($22,898351^\circ$ S) e Longitude ($43,205752^\circ$ O).

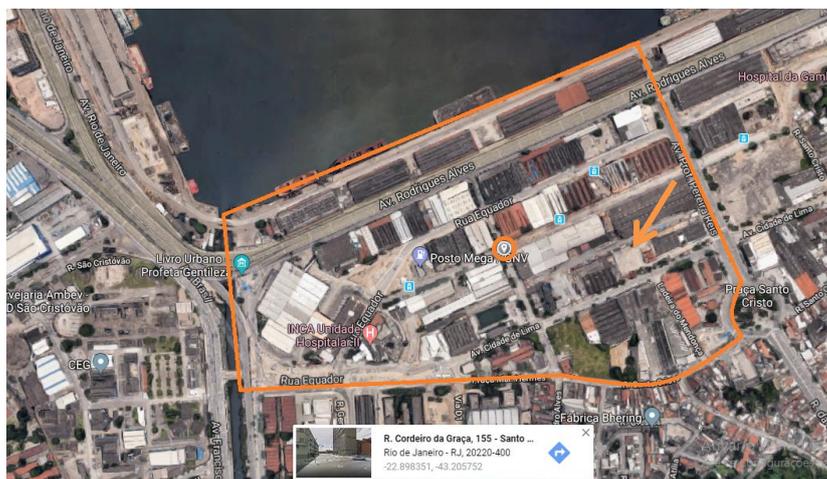


Figura 14: Delimitação do ponto de apuração do índice solarmérico do Setor C.

Os dados de irradiação solar foram apurados através do SunData - um programa destinado ao cálculo da irradiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. Ao inserir os dados geográficos, o programa apresenta o índice de irradiação em três pontos próximos ao local escolhido (Tabela 4).

Tabela 4: Índice solarmérico do Setor C – Projeto Porto Maravilha.

Estação	Município	UF	País	Irradiação Solar diária média [kWh/m ² .dia]										
				Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]								
Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	RJ	Brasil	22,901° S	43,249° O	4,4								
Oceano Atlântico	Oceano Atlântico			22,901° S	43,149° O	5,8								
Oceano Atlântico	Oceano Atlântico			22,801° S	43,249° O	11,7								
Irradiação Solar diária média [kWh/m².dia]														
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Mé dia	Delt a
Rio de Janeiro	6,04	6,22	5,06	4,36	3,59	3,35	3,34	4,20	4,43	5,11	5,14	5,93	4,73	2,88
Oceano Atlântico	6,18	6,35	5,16	4,46	3,60	3,34	3,34	4,22	4,41	5,10	5,21	6,05	4,79	3,01
Oceano Atlântico	6,03	6,16	5,06	4,41	3,60	3,37	3,35	4,19	4,39	5,02	5,07	5,84	4,71	2,81

O SunData é uma tentativa do CRESESB - Centro de Referência para as energias solar e eólica Sérgio Brito (parte integrante do CEPTEL -Centro de Pesquisa em Energia Elétrica) de oferecer uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Ressalta-se que o SunData é alimentado com base na 2ª edição (lançada em 2017) do Atlas Brasileiro de Energia solar.

Conhecido o índice solarmérico, o passo seguinte constitui-se do cálculo da geração de energia solar. Faz-se necessário conhecer a potência nominal do sistema fotovoltaico necessário para gerar energia capaz de suprir esta demanda em relação ao índice de irradiação presente no local de estudo. Ou seja, a potência das placas fotovoltaicas deve atender a demanda.

A eficiência das placas é de 83% (valor padrão considerando perdas elétricas na geração e transmissão/distribuição). A partir disto, é levantado o número de placas necessárias para gerar energia para atender essa demanda parcial ou integral. O cálculo do número de placas necessárias é realizado conforme Equação 4.

$$N = \frac{E}{A_m \cdot \eta \cdot I \cdot PR} \quad (4)$$

Onde,

N: número de placas necessárias; *E*: energia necessária; *A_m*: área do módulo; *η*: rendimento do módulo; *I*: índice de irradiação solar local; *PR*: eficiência adotada 83%.

A Potência instalada em *W_p* é:

$$W_p = N \cdot W_p(\text{módulo}) \quad (5)$$

A área necessária para a instalação dos painéis fotovoltaicos capaz de gerar essa energia é:

$$\text{Área} = N \cdot A_m \quad (6)$$

As superfícies (áreas de cobertura) dos edifícios foram somadas de modo a equivaler a uma única área para cada um dos cenários, consideradas para instalação dos painéis. Dentre diversos simuladores de sistemas de geração de energia solar, foi utilizado o Portal Solar (2018).

A primeira configuração de bairro aqui estudada, Cenário I, aquela utilizando as diretrizes LC 101 tem mais uma limitação à sua aplicação, que é o consumo de elevadores para torres altas. Estas torres apresentam um consumo de energia bem mais elevado do que aquele observado para os edifícios mais baixos.

Os elevadores têm capacidade de transportar de 6 a 12 pessoas. Dependendo da altura do edifício e da velocidade do elevador, a potência dos motores pode variar entre 6 e 20 cv. A Tabela 5 apresenta o consumo médio de um elevador para ir da garagem até o último andar e voltar ao ponto de partida (ANEEL, s/d). O cálculo do consumo de energia elétrica por elevadores é realizado com base nesta tabela.

Para o cálculo do consumo mensal é estimado o número de viagens/dia e multiplicado por 30. Este consumo pode ser replicado para os edifícios do bairro. A partir dos resultados apresentados na Tabela 5 é possível entender o que representam as grandes torres ‘energívoras’ em termos de consumo de energia.

Tabela 5: Consumo de energia elétrica em elevadores

Número de andares	Capacidade do elevador (em nº de pessoas)	Consumo médio por viagem (kWh)
3	6	0,15
6	6	0,25
10	8	0,45

ANEEL, s/d.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sombreamento atua como um obstáculo que dificulta a captação da energia solar. Isto resulta da inclinação e orientação inadequada dos painéis, da não observância da distância mínima entre as fileiras de módulos FV (em que os próprios painéis podem sombrear uns aos outros) ou da localização do sistema. Tomando este último, a radiação solar que consegue atingir os painéis fotovoltaicos é afetada pelas áreas de sombra que um edifício é capaz de fazer no outro, ou até mesmo que um conjunto de painéis é capaz de fazer no outro.

Os resultados para o sombreamento a partir da trajetória solar apontam que a configuração com verticalização intensa (Cenário I) acaba produzindo também uma maior área sombreada no topo dos edifícios nos horários de 10 horas e 15 horas, se comparada com a configuração do Cenário II. Paralelamente a isto, uma vez que a maior verticalização também produz um sombreamento nas faces das outras edificações pode ser aqui colocada a questão do direito ao sol. O Sol, uma fonte renovável de energia é fundamental para a vida no planeta.

Conforme dito anteriormente, para o aproveitamento solar fotovoltaico, faz-se uso da Irradiação Global Horizontal (GHI) que define a radiação recebida por uma superfície plana horizontal. A GHI é composta pela Irradiação Difusa Horizontal (DIF) e pela Irradiação Normal Direta (DNI). Em dias nublados, a principal fração recebida é

a DIF, enquanto que em dias claros prevalece a DNI (EPE, 2012). Nas Figuras 15 e 16 podem ser observados os valores para DNI e DIF, respectivamente, retirados para o horário de 12 horas no mês de janeiro.

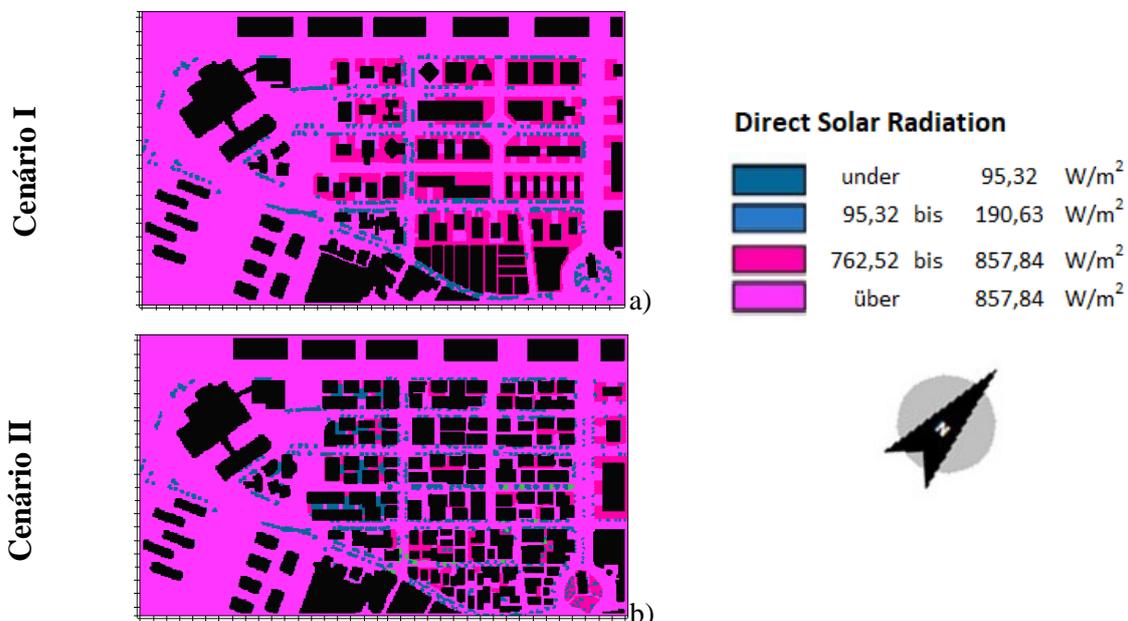


Figura 15: Fração recebida de DNI para os dois cenários: a) Cenário I e b) Cenário II.

A incidência de radiação direta permanece entre $762,52$ e 857 W/m² em todos os pontos (Figura 16), com exceção das áreas arborizadas, onde os valores mais baixos de DNI podem ser observados. A linha da arborização aparece marcada com o azul. Para o mês de janeiro, às 12 horas, a altura solar está próxima de 90° , não oferecendo, portanto, o sombreamento das edificações.

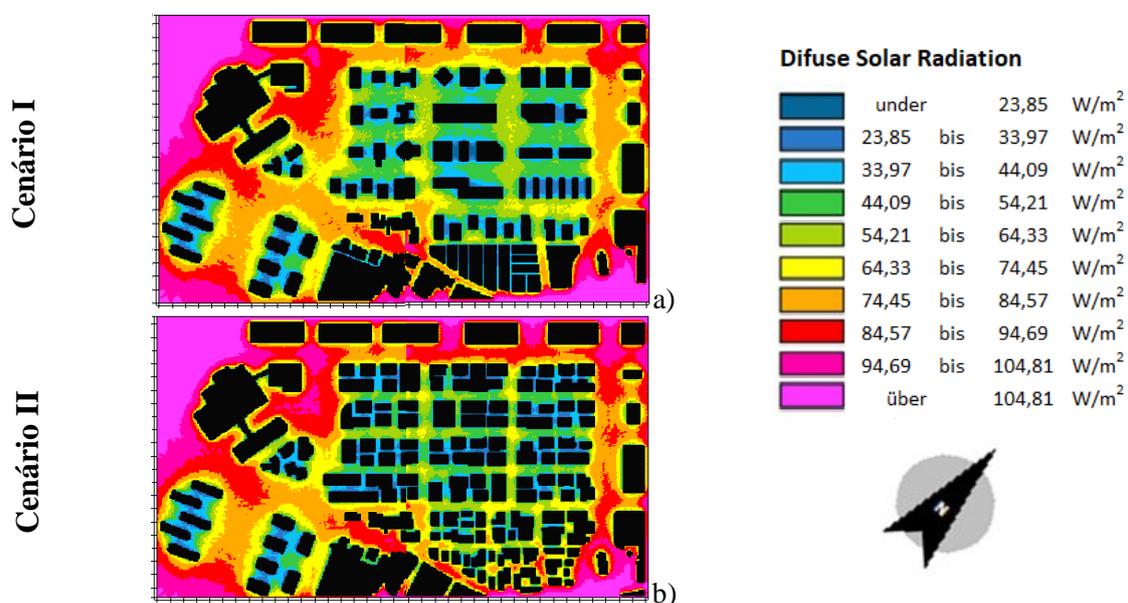


Figura 16: Fração recebida de DIF para os dois cenários: a) Cenário I e b) Cenário II.

A partir das imagens da Figura 16 pode-se observar que radiação difusa - DIF apresenta os menores valores em locais confinados, uma vez que os edifícios mais altos representam um obstáculo à penetração da radiação difusa. Mesmo as ruas do entorno do conjunto apresentam valores mais elevados no Cenário I onde há maior verticalização. Desta forma, esta incidência de irradiação solar é propícia para o uso de painéis fotovoltaicos, em particular pelo grande aproveitamento da parcela DNI. Este fato se dá para as duas configurações estudadas, Cenário I e Cenário II, informação obtida inicialmente através do Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro (SEDEIS; EPE; IPP; GIZ, 2015).

7.1. DEMANDA ENERGÉTICA DO BAIRRO

O levantamento de carga elétrica de uma residência média (que abriga de 3 a 4 pessoas) foi realizado através do simulador de consumo fornecido pelo Grupo Light, neste são considerados valores padrão de potência para os diferentes equipamentos elétricos escolhidos. Ressalta que estes valores podem variar conforme potência específica de cada um, além do tempo de uso destes. No simulador é possível inserir o tipo de equipamento, a quantidade, sua potência elétrica, tempo diário de utilização, quantidade de dias em que é usado, e então obter o consumo em kWh/mês.

A escolha dos equipamentos elétricos para o levantamento da demanda elétrica de uma residência deve ser criteriosa, considerando desde os itens básicos aos itens mais sofisticados, que poderiam ser utilizados, a depender do maior poder aquisitivo dos residentes. Contudo, não é objeto deste trabalho discutir isto. A Tabela 6 apresenta os equipamentos considerados neste levantamento de carga, discriminando a quantidade, a potência elétrica e o tempo de utilização.

É possível observar (Tabela 6) o consumo individual dos equipamentos, o total de consumo por atividade/cômodo, além do montante total no mês. Essa separação é extremamente importante, deixando o projeto elétrico detalhado, fazendo-se relevante também para a possibilidade de se projetar um sistema de geração para atender determinada parte da residência.

Marques (2018) cita que a população do Porto Maravilha equivale a 32 mil habitantes. Tomando como base o consumo do domicílio modelo, o bairro apresenta demanda energética equivalente a 2.248.000 kWh/mês, isto equivale a 8 mil residências.

Tabela 6: Descrição de equipamentos utilizados no levantamento de carga da residência.

ENTRETENIMENTO						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
TV em cores - 29"	1	110	5	Horas	30	16.5
Subtotal: 17 kWh/mês						
LAVANDERIA/LIMPEZA						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Ferro elétrico automático	1	1000	1	Horas	12	12
Lavadora de roupas	1	500	2	Horas	12	12
Subtotal: 24 kWh/mês						
REFRIGERAÇÃO/AQUECIMENTO						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Ar condicionado 7.500 BTU	1	1000	8	Horas	10	80
Ventilador pequeno	2	65	8	Horas	20	20.8
Subtotal: 101 kWh/mês						
ESCRITÓRIO						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Microcomputador	1	80	2	Horas	15	2.4
Subtotal: 2 kWh/mês						
ILUMINAÇÃO						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Lâmpada fluoresc. compacta 11 W	6	11	5	Horas	30	9.9
Subtotal: 10 kWh/mês						
CHUVEIRO ELÉTRICO						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Chuveiro elétrico	4	3500	10	Min.	30	70
Subtotal: 70 kWh/mês						
COZINHA						
Aparelho	Quant.	Potência (W)	Tempo	Unid. Tempo	Dias no Mês	Total kWh
Fogão comum	1	60	120	Min.	30	3.6
Forno microondas	1	1200	20	Min.	20	8
Geladeira 1 porta	1	300	-	-	-	45
Liquidificador	1	300	10	Min.	15	0.75
Subtotal: 57 kWh/mês						
TOTAL:			281 kWh/mês			

7.2. SISTEMA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O BAIRRO

Para suprir energia ao domicílio modelo (com demanda de 281 kWh) é necessário um sistema solar fotovoltaico com potência de 2,64 kWp. É necessária a instalação de 8 painéis de 330 W e 21,12 m² de área para instalação. Este sistema geraria o equivalente a 3372 kWh/ano.

Partindo do domicílio modelo, busca-se expandir a geração para todo o Bairro. Para tanto, uma simplificação é adotada: considera-se as superfícies dos edifícios como único espaço, projetando-se um sistema solar capaz de atendê-lo energeticamente.

As superfícies de cobertura dos edifícios foram somadas. Desta forma, tem-se uma única área equivalente para instalação dos painéis fotovoltaicos: Cenário I - 71.062,76 m² e Cenário II 72.610,95 m². O Cenário II apresenta uma tipologia urbana mais compacta, permitindo maior aglomeração de edifícios, por isso sua área de cobertura é maior. A diferença de área entre os dois cenários equivale a 1.548,19 m², isto representa apenas 2,1% a mais de área. Contudo, ao utilizar este dado para fins de geração de energia, esta área é suficiente para gerar 27,36 GWp/ano, utilizando-se de placas de 330 W, considerando o índice de irradiação solar do Projeto Porto Maravilha. A Figura 17 traz o gráfico que evidencia a geração de energia ao longo do ano.

O número total de área disponível em cada cenário é bastante expressivo. Porém considerando instalações adversas nas coberturas dos edifícios (como a presença de uma caixa d'água, por exemplo), neste trabalho utilizou-se apenas de 90% destas superfícies. No Cenário I foram considerados apenas 63.956,484 m² para instalação de painéis fotovoltaicos. Do mesmo modo, no Cenário II, utilizou-se apenas 65.349,855 m²,

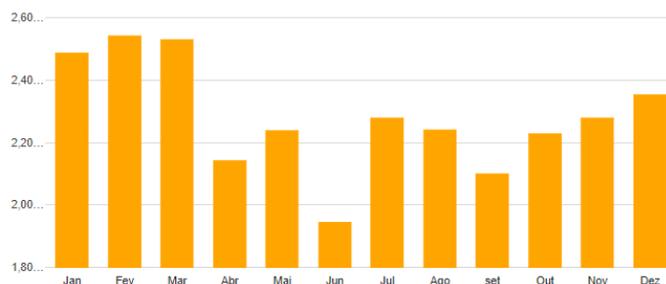


Figura 17: Excedente de geração de energia no Cenário II em relação ao Cenário I

O número total de área disponível em cada cenário é bastante expressivo. Porém considerando instalações adversas nas coberturas dos edifícios (como a presença de uma caixa d'água, por exemplo), neste trabalho utilizou-se apenas de 90% destas superfícies. No Cenário I foram considerados apenas 63.956,484 m² para instalação de painéis fotovoltaicos. Do mesmo modo, no Cenário II, utilizou-se apenas 65.349,855 m²,

Conforme citado, a demanda energética do bairro equivale à 2.248.000 kWh/mês. O sistema de energia solar fotovoltaica para atender essa demanda requer potência instalada de 5.062,20 kWp, ocupando uma área de 40.497,60m², e utilizando-se de 15.340 painéis de 330 W. No gráfico da Figura 18, observa-se que a menor geração

acontece no mês de junho e a maior no mês de fevereiro, o que é esperado, conforme valores mínimos e máximos dos índices de irradiação solar da região.

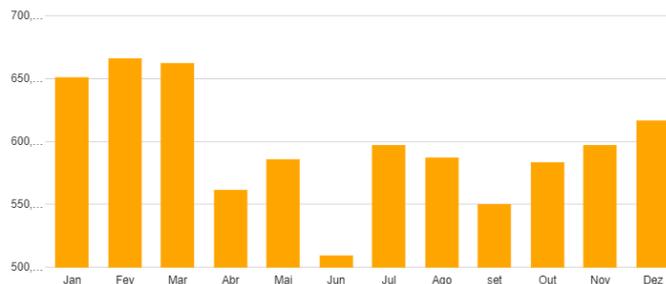


Figura 18: Geração de energia solar no Bairro.

Observando a potência instalada (5.062,20 kWp) verifica-se que esta ultrapassa 5 MW. Ressalta-se que a simplificação de junção de superfícies foi realizada apenas com o intuito de trabalhar com única área na realização das simulações, verificando o potencial de geração desse espaço. Para a aplicação do sistema, cada cobertura de cada edifício deve ser recortada e as placas realocadas conforme a disponibilidade da área.

A área necessária para gerar energia a ser fornecida para o bairro, equivale a apenas 63,3% da área disponível e à 57% da área total no Cenário I. Do mesmo modo, no Cenário II, corresponde a 62% da área disponível e a 55,8% da área total.

Assim, o Cenário I ainda dispõe de 23.458,884 m², e o Cenário II de 24.852,255 m². Se utilizar o restante da área disponível em cada cenário, para gerar energia para outros fins, tal como fornecer para o comércio local, ou até mesmo para uma escola, seria observada a geração apresentada no gráfico da Figura 19.

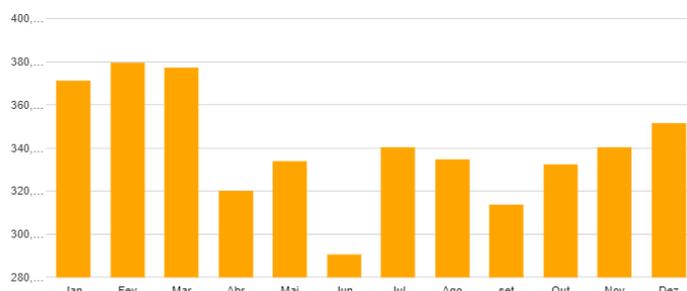


Figura 19: Geração de energia solar excedente no Bairro.

Em média, a área restante permite a instalação de mais 8.740 painéis de 330 W, isto equivale a potência instalada de 2.884,20 kWp. A área utilizada para esta simulação foi de apenas 23.073,60 m². Salienta-se que os resultados desta simulação podem variar de acordo com a complexidade da instalação, tal como altura do telhado do edifício por exemplo. O cálculo de produção de energia baseia-se na radiação solar da região estudada. Diversos fatores como inclinação dos painéis fotovoltaicos, sombras ou outro tipo de interferência podem influenciar na produção de energia do seu sistema.

8. DISCUSSÕES

Como principal resultado pode ser apontada a indicação da maior capacidade de geração de energia do Cenário II, construído atendendo a certificação LEED-ND, dada sua área total calculada para receber os painéis fotovoltaicos. Para a região do estudo não foi, aqui proposta, a introdução das normas de arquitetura passiva, o que seria um fator redutor da demanda de energia. A grande vantagem deste resultado é também reforçar a opção por uma configuração urbana compacta que atende à escala humana, permite o uso misto propiciando a apropriação do espaço pelos seus usuários.

A aplicação de sistemas fotovoltaicos no bairro, além de causar menor dano ambiental relacionado à geração de energia elétrica, permite a sua utilização em pequena escala (edifício a edifício) e ainda pode ser instalado próximo ao ponto de consumo. Por serem conectadas à rede elétrica pública, essas instalações dispensam uso de banco de baterias (sistemas acumuladores de energia), utilizados nos sistemas isolados, isto reduz o custo total da instalação e dispensa a manutenção envolvida por um banco de baterias. A questão do sombreamento merece um estudo posterior, inclusive relacionado à Lei de Direito ao Sol com o desenvolvimento de envelopes solares para a região, como forma de assegurar o Direito ao Sol para as futuras edificações. Um dos itens calculados no consumo de energia foi o consumo de energia com chuveiros elétricos, entretanto, o custo de instalação de aquecimento solar de água é relativamente baixo e os sistemas possuem eficiência comprovada.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em ambos os cenários, Cenário I e Cenário II, observou-se a importância em aproveitar o espaço construído para a geração de energia solar. O Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro (2015) indica o forte potencial da Cidade do Rio de Janeiro, particularmente da Região do Porto Maravilha para geração de energia. Os dados obtidos mostraram que, levando em consideração pequenas variações (para mais ou para menos), com aproximadamente 60% das áreas disponíveis é possível gerar energia suficiente para atender a demanda do bairro. O aproveitamento desses espaços (cobertura dos edifícios) no meio urbano além de parecer viável permite inserir projetos utilizando a geração distribuída, que apresenta vantagens como a redução de perdas de energia no processo de distribuição e transmissão. Outra questão importante é evitar a necessidade de trabalhar com a geração centralizada, como por exemplo, os médios e grandes parques solares nas proximidades das cidades. Os sistemas fotovoltaicos

integrados possuem a vantagem de atuarem como uma usina geradora descentralizada e que não ocupa área física extra, visto que pode estar integrada à edificação substituindo ou se sobrepondo a materiais de cobertura ou revestimento. Quando as estruturas fotovoltaicas são incorporadas ao desenho original do projeto, também é possível apontar vantagens em relação ao custo total da instalação, uma vez que estas substituem materiais de revestimentos ou recobrimentos. Contudo, os sistemas fotovoltaicos independentes envolvem um investimento ainda maior, pelo fato de necessitarem de um super dimensionamento, para garantir energia elétrica durante o ano todo, independentemente dos períodos com menores níveis de radiação.

As fazendas solares apesar de entrarem também no sistema de redes de geração distribuída, perdem em vantagem quando comparadas aos pequenos sistemas distribuídos nos edifícios. A geração de energia in loco permite inclusive o abastecimento de áreas residenciais, comerciais etc. pensando na cidade bairro a bairro. O modelo de geração que aproveita a cobertura dos edifícios para a geração de energia é visto como uma forma de preservar o meio ambiente, pois neste, não é necessária a ocupação de outro espaço para fins energéticos apenas.

Os processos de densificação devem ser avaliados com cautela, buscando adequar a tipologia do bairro às necessidades e demandas do lugar. Ao avaliar intervenções é importante entender as dinâmicas presentes na região para que os processos não tenham como resultados espaços que não promovem o bem estar de seus usuários. O Cenário II além de atender à questão da geração de energia, representa um espaço caminhável e de uso diversificado. Outro fator importante para pensar em configurações com um menor fator de verticalização se dá pelo direito ao sol. Estes edifícios extremamente altos promovem um sombreamento intenso, por vezes impedindo que o sol chegue aos edifícios vizinhos. O processo de verticalização também implicou em um maior consumo de energia, inicialmente como resultado do uso de elevadores (Tabela 5). As torres altas apresentam por si só uma demanda de energia bem mais elevada do que a observada para os edifícios mais baixos no caso de elevadores.

A finalização de um trabalho usualmente aponta novas questões e abre possibilidades de novas ações. Alguns pontos interessantes para futuras pesquisas estão diretamente relacionados às simplificações inicialmente adotadas. Dentre eles, pode ser apontado o estudo relacionado ao sombreamento para determinação das reais perdas

ocasionadas pelo caso de intensa verticalização. A partir deste levantamento seria interessante recalculer a relação entre demanda e geração de energia para a região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBIENTE URBANO. Energia solar. Disponível em: <http://wp.clicrbs.com.br/ambienteurbano/tag/energia-solar/?topo=98>. Acessado em: 02 de Mar. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Elevadores. Disponível em: www2.aneel.gov.br. Acessado em: 15 de Ago. 2018.
- ASSIS, E S. Impactos da forma urbana na mudança climática: método para previsão do comportamento térmico e melhoria de desempenho do ambiente urbano. São Paulo, 2000. Tese de doutorado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR - ABSOLAR. Marco histórico para o setor fotovoltaico brasileiro. Disponível em: <http://absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/marco-historico-para-o-setor-fotovoltaico-brasileiro.html>. Acessado em: 06 de Ago. 2018.
- BARBOSA, G. S.; ROSSI, A. M. G.; DRACH, P. R. C. Análise de projeto urbano a partir de parâmetros sustentáveis: alteração morfológica de Copacabana e algumas de suas consequências climáticas (1930 - 1950 - 2010). URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana, 2014. 275-287.
- BRASIL. Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências.** Diário Oficial, Brasília, DF, 18 out. 2001. Seção 1, p. 1.
- BRASIL. Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001. **Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências.** Diário Oficial, Brasília, DF, 20 dez. 2001. Seção 1, p. 5.
- BRASIL. ANEEL. Resolução ANEEL nº 583 de 22 de Outubro de 2013. Estabelece a sistemática de determinação da "Potência Instalada" e da "Potência Líquida" de empreendimento de geração, para fins de outorga, regulação e fiscalização dos serviços de geração de energia elétrica, e revoga a Resolução nº 407, de 19 de outubro de 2000. Diário Oficial, Brasília, DF, 05 nov. 2013. Seção 1, p. 57.
- BRUSE, M., LEONARDO 3.75 - 2009. On-line Manual. Disponível em: <http://www.envi-met.com>. Acessado em: 14 Dez. 2009-2010.
- COPEL. **Dicas de Eficiência Energética.** Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F2821DB171AAD77DB032573FB005D4B41>. Acessado em: 19 de Jul. 2018.
- COTIA, Frederico Coutinho Guimarães. **Uso de Tecnologias Fotovoltaicas e Aerogeradores para Geração de Energia no Meio Urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2015.
- COOPER, E.; JUNIOR, W. M. M. **Aplicação de Painéis Solares Fotovoltaicos Como Fonte Geradora Complementar de Energia Elétrica em Residências.** Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná, 2013.

Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito – CRESESB. Potencial Solar – SunData v 3.0. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acessado em: 14 de Ago. 2018.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2018.

EPE. NOTA TÉCNICA. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. 2012.

EPIA European Photovoltaic Industry Association, Solar Generation 6 – Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World, 2011.

FRAIDENRAICH, N. *et al.* Energia Solar Fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, M.T.(Org.). Fontes renováveis de energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003. p.281-334.

GBC BRASIL. Certificação LEED. Disponível em: <http://www.gbcbrazil.org.br/sobrecertificado.php>. Acessado em: 23 de Jul. 2018.

GOLDEMBERG, J.; PARENTE, V.; ZILLES, R. **Comments on Experience Curves for PV Modules**, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, volume 10, nº 8, páginas 571-574, Dezembro de 2002.

GREEN, M. A.; RAFFAELLE, R. P.; BRUTON, T. M.; CONIBEER, G. **Achievements and challenges of solar electricity from photovoltaics**. In *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. [LUQUE, A., HEGEDUS, S. (eds)]. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

GRÜNBERG, Paula Regina M.; MEDEIROS, Marcelo Henrique F. de; TAVARES, Sergio Fernando. **Certificação ambiental de habitações: comparação entre leed for homes, processo água e selo casa azul**. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. XVII, n. 2, p. 195-214, abr.-jun. 2014.

KNOWLES, Ralph L. Sun Rhythm Form, The Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1981, 198 p.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. [3.ed.] Rio de Janeiro, 2014.

MACINTYRE, A. J., **Instalações elétricas**, 5ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC, 2011.

ELEKTRO. **Seguimento Industrial – Sistemas de Iluminação**. Manuais Elektro de Eficiência Energética. ELEKTRO. s/d.

International Energy Agency – IEA. World Energy Balances: Overview. Disponível em: <https://www.iea.org/>. Acessado em: 31 de Ago. 2018

MARQUES, Amanda Martins da Silva. **Análise microclimática e avaliação LEED Neighborhood: Um estudo de caso da morfologia urbana do Porto Maravilha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Programa de Engenharia Urbana, Rio de Janeiro, 2018.

MESTRINER, Gustavo L. **A cidade compacta e os projetos urbanos contemporâneos: Inventário analítico de estudos de caso em vazios urbanos em áreas centrais**. Dissertação de mestrado. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Acordo de Paris. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acessado em: 29 de Jul. 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Energia solar no Brasil e no MUNDO. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907dd9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>. Acessado em: 07 de Ago. 2018.

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona. Editora Gustavo Gilli, 2010.

Painel solar fotovoltaico sinosola sa330-72p (330wp). Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-sinosola-sa330-72p-330wp.html>. Acessado em 10 de Dez. 2018

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São Jose dos Campos: INPE, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.; **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. CEPEL – DTE – CRESESB, 2014.

PORTAL SOLAR. Quanto custa a energia solar fotovoltaica. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-a-energia-solar-fotovoltaica.html>. Acessado em: 02 de Out. 2018

ROXA, Camilo. As dificuldades para a expansão da energia solar no Brasil. Jornal eletrônico NEXO. Disponível em: <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2018/01/10/As-dificuldades-para-a-expans%C3%A3o-da-energia-solar-no-Brasil>. Acessado em: 02 de Fev. 2018

SANTOS, A. H. M., *et. al.* **Eficiência Energética Teoria & Prática**, 1. Ed. Eletrobras / PROCEL Educação, Universidade Federal de Itajubá, Fupai, Itajubá, 2007.

Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços do Governo do Estado do Rio de Janeiro (SEDEIS), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Governo Federal, o Instituto Pereira Passos, da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (IPP) e a Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). **Mapa Solar da Cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro 2015. Disponível em: <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=ea015caccdde49f1a838599dd6d3edd3>. . Acessado em: 10 de Nov. 2018

TOLMASQUIM, M. T. **Alternativas Energéticas sustentáveis no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará: COPPE: CENERGIA, 2004.

UNITED NATIONS, UN (2018) World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. Department of Economic and Social Affairs - United Nations, Nova Iorque.

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E.da C.; NOGUEIRA, F. J. H. *et all.* **Eficiência energética: Fundamentos e Aplicações**. 1.ed. Campinas – SP: Elektro, 2012.

VIANA, T. S.; RÜTHER, R.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. **Potencial de Geração Fotovoltaica Com Concentração no Brasil**. III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, 2010.

VEIRA, Renata. Brasil começa a aproveitar seu potencial de energia solar: Revista EXAME. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/revista-exame/quando-o-sol-vira-dinheiro/>. Acessado em: 23-07-2018.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZOTTIS, Luisa. Quais são as nações mais poluentes do mundo. Disponível em: <http://wricidades.org/noticia/quais-s%3%a3o-na%3%a7%3%b5es-mais-poluente-do-mundo>. Acessado em: 07 de ago. 2018.