

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA EM RESIDÊNCIAS NA REGIÃO NORDESTE DE SÃO PAULO

Murilo Henrique Ribeiro¹, Camila de Brito Miranda², Mauro Antônio da Silva Sá Ravagnanni³

¹*Mestrando em Bioenergia – Universidade Estadual de Maringá (UEM), muriloplakil@gmail.com*

²*Professora adjunta no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Estadual de Maringá (UEM)*

³*Professor adjunto no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Estadual de Maringá (UEM)*

RESUMO

Com a grande preocupação com o meio ambiente para a diminuição de gases do efeito estufa e a busca por fontes renováveis, a geração de energia elétrica por meio da conversão fotovoltaica da irradiação solar vem se mostrando uma das alternativas com uma boa relação custo benefício e já se tornou uma fonte de energia significativa em países da União Europeia. O Brasil, na contramão do mundo, é um país onde a maior parte da energia elétrica é oriunda de fontes renováveis, basicamente de hidrelétricas. Porém, a energia elétrica advinda de hidrelétricas não é capaz de suprir o atual consumo do país, sendo necessária, em algumas épocas do ano, a utilização de fontes secundárias como por exemplo, a queima de algum combustível em usinas termelétricas. Portanto, no presente trabalho foi realizado um estudo visando a instalação de um sistema de geração de energia elétrica a partir da energia fotovoltaica em 4 residências para suprir os respectivos consumos. A geração de energia dos sistemas fotovoltaicos dimensionados e instalados foi analisada por um período de um ano, com o objetivo de que o sistema implantado suprisse o consumo médio. Com os resultados obtidos, os dados de geração de energia demonstram que a implantação é viável tanto no contexto econômico-financeiro a longo prazo, quanto em relação a emissão de CO₂.

Palavras-chave: Células Fotovoltaicas, Viabilidade Técnico-Econômica, Energia Renovável.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o mundo tem vivenciado um aumento da demanda energética provocado principalmente pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento tecnológico e industrial. Segundo a Organização das Nações Unidas, a população mundial era de 7,9 bilhões no ano de 2020, devendo atingir cerca de 9,5 bilhões até 2050 (ONU, 2021).

Diante do aumento no consumo de energia elétrica e as elevações do seu custo, discute-se muito os impactos ambientais causados pela geração de energia elétrica. Nota-se cada vez mais que a preservação do planeta e seu estado futuro são tratados com cautela, sobretudo na busca pelo desenvolvimento sustentável. Na geração de energia destacam-se diversas alternativas de fontes renováveis consideradas "limpas", como a energia solar (CARDOSO; CAMPOS, 2017).

Nesse cenário, a preocupação ambiental é crescente, e em grandes partes dos países as fontes de energias renováveis estão ganhando mais espaço no mercado mundial (JARDIM, 2007).

De acordo com os dados da ANEEL (2022), o Brasil ultrapassou a marca de 300 mil sistemas fotovoltaicos (FV) na geração distribuída conectada à rede. A quantidade de sistemas instalados conectados à rede em 2020 supera a quantidade instalada em 2019. Em 2021 foram registradas 120.914 instalações, já no ano de 2022 ultrapassou 121 mil.

Para aceitar o risco do investimento, é necessário realizar um estudo prévio da viabilidade econômica do mesmo. Dessa maneira, fazendo uso das ferramentas financeiras, é possível reduzir a margem de erro e os riscos ao investidor. Outro ponto de significativa importância e que deve ser bastante analisado diz respeito ao fabricante que irá escolher para o fornecimento dos equipamentos, a área disponível e a configuração do tipo de sistema fotovoltaico.

O trabalho tem como objetivo geral realizar a avaliação técnico-econômica de quatro geradoras de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas de pequeno porte localizadas em residências do nordeste do estado de São Paulo, enquadradas dentro do conceito de microgeração conectados à rede (On Grid). Além disso, buscou-se analisar, individualmente para cada sistema residencial, os resultados de geração e avaliar se os sistemas fotovoltaicos suprem o consumo energético; estimar a economia gerada no tempo de vida útil do sistema fotovoltaico; e analisar os benefícios ambientais, estimando a quantidade de gases do efeito estufa que deixaram de ser emitidos nas unidades geradoras desde o início da operação.

No Brasil existem alguns incentivos fiscais do governo para o aproveitamento de fontes renováveis para a geração de energia elétrica, listados por SILVA (2015). Entre os principais incentivos existentes, pode-se citar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica para à Micro e Minigeração Distribuídas: instituído pela Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, e permite que consumidores com geração de até 5 MW a partir de fonte solar ou demais fontes renováveis compensem a energia.

2. REFERENCIAL TEORICO

Os sistemas fotovoltaicos podem ser divididos em duas categorias básicas: os sistemas isolados (Off-Grid) e os sistemas conectados à rede (On-Grid) onde o excedente de energia gerado vai para a concessionária local.

Um sistema isolado pode ser simplesmente um painel fotovoltaico alimentando diretamente uma carga. Um sistema isolado mais sofisticado possui um dispositivo de armazenamento de energia (bateria), um controlador de carga (para regular a carga da bateria) e um conversor (normalmente um inversor CC-CA), que fornece a alimentação adequada para as cargas. O que caracteriza um sistema isolado é a presença do dispositivo fotovoltaico como única fonte de energia e o uso de elementos acumuladores (baterias). Um sistema híbrido é um sistema que combina um sistema SFCR com um sistema de armazenamento de energia, geralmente baterias, que permite o consumo de energia mesmo em caso de falta de energia na rede. O sistema híbrido utiliza um inversor especial, chamado de inversor híbrido, que pode operar tanto como on-grid (conectado à rede) quanto como off-grid (isolado da rede) (ZAHEDI, 2006).

Em sistemas conectados à rede elétrica convencional, é necessário mensurar a quantidade de energia que está sendo efetivamente enviada à rede, visto que deve haver um controle e monitoramento por parte da concessionária, e também para o pagamento dos serviços que a concessionária presta para o consumidor-produtor, por meio de um medidor bidirecional.

3. METODOLOGIA.

3.1. Dimensionamento módulos fotovoltaicos

Para dimensionar a unidade geradora fotovoltaica (módulos), primeiramente, deve-se apurar o consumo de energia anual do local desejado (kWh/ano), para assim compor a potência total dos painéis que serão conectados à rede de energia elétrica. Esse valor pode ser obtido por meio de uma análise da fatura mensal da unidade consumidora, ou a partir do levantamento das cargas instaladas (PINHO; GALDINO, 2014).

A partir da Equação (01), é possível calcular a potência de pico dos painéis fotovoltaicos (PFV) em kWp, em que E é a média do consumo diário em kWh e pode ser obtida na fatura emitida pela concessionária, e para o correto dimensionamento, deve-se levar em consideração o consumo de pelo menos um ano. Além disso, TD é a taxa desempenho do sistema e HSP_{MA} é a média diária das horas de sol pleno (HSP) incidentes no painel fotovoltaico.

$$PFV = \frac{E}{\frac{TD}{HSP_{MA}}} \quad (01)$$

Os sistemas FV foram analisados no período de um ano, entre os meses de setembro/2021 a agosto/2022. Os sistemas FV foram instalados no município de Barretos-SP. A Tabela 1 apresenta os índices de Horas de Sol Pleno nas regiões de instalação. CRESESB (adaptado), 2022.

Tabela 1 - HSPMA no município e na zona rural de Barretos - SP
Horas de Sol Pleno (kWh.m²)

Mês	HSPMA no município	HSPMA na zona rural
Janeiro	5,82	5,87
Fevereiro	6,04	6,11
Março	5,24	5,23
Abril	4,87	4,99
Maio	4,23	4,31
Junho	3,97	4,03
Julho	4,20	4,27
Agosto	5,10	5,12
Setembro	5,08	5,10
Outubro	5,59	5,59
Novembro	5,80	5,73
Dezembro	6,16	6,20
Media	5,18	5,21

Para o dimensionamento dos sistemas FV, considerou-se o consumo médio de um ano anterior (analisando a fatura da concessionária), que pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Consumo do ano base para o dimensionamento dos sistemas

Consumo em (Kwh) de todos os sistemas				
Mês	Sistema FV 1	Sistema FV 2	Sistema FV 3	Sistema FV 4
set/20	322	533	721	172
out/20	354	545	715	188
nov/20	366	569	744	221
dez/20	371	558	758	230
jan/21	369	553	731	229
fev/21	315	521	712	217
mar/21	323	512	727	223
abr/21	292	498	696	191
mai/21	288	488	671	183
jun/21	285	481	662	177
jul/21	277	484	674	162
ago/21	291	512	702	165
Total	3853	6254	8513	2358
Média	321,08	521,17	709,42	196,50

Considerando, de maneira geral, o número no subíndice a indicação de qual sistema fotovoltaica está sendo tratado, de acordo com a Equação (02), a potência de Pico dos sistemas (PFV_1 , PFV_2 , PFV_3 e PFV_4), levando em conta uma média de 30 dias ao mês e $TD = 0,85$, é dada a seguir:

$$PFV_1 = \frac{10,70}{0,85} = 2,43 \text{ kWp}; PFV_2 = \frac{17,37}{0,85} = 3,94 \text{ kWp}; PFV_3 = \frac{23,64}{0,85} = 5,37 \text{ kWp} \text{ e } PFV_4 = \frac{6,55}{0,85} = 1,47 \text{ kWp}$$

A potência dos módulos disponíveis para instalação era de 245 W, 345 W e 450 W, portanto o número de módulos para cada sistema é dado por:

$$n_1 = \frac{2,41}{0,345} = 6,98; n_2 = \frac{3,94}{0,345} = 11,43; n_3 = \frac{5,37}{0,450} = 11,93; n_4 = \frac{1,47}{0,245} = 6$$

Portanto, são necessários 7 módulos de 345 W cada para o sistema FV 1. Em condição de pico (máxima potência), a potência teórica do sistema seria de 2,42 kWp. Para o sistema FV 2, são necessários 12 módulos de 345 W cada. Em condição de pico (máxima potência), a potência teórica do sistema seria de 4,14 kWp. No sistema FV 3, 12 módulos de 450 W cada. Em condição de pico (máxima potência), a potência teórica do sistema seria de 5,4 kWp. Por fim, no sistema FV 4, 6 módulos de 245 W cada. Em condição de pico (máxima potência) a potência teórica do sistema seria de 1,47 kWp. Todos os módulos dos quatro sistemas FV's foram ligados em série em que, consiste em conectar o polo positivo de um painel ao polo negativo de outro, formando uma cadeia de painéis. A inclinação dos módulos FV dos sistemas em estudo ficaram entre 25° e 30°, tendo melhor aproveitamento da incidência solar nos locais que foram instalados.

3.2. Dimensionamento do Inversor

A definição do *FDI* (fator de dimensionamento de inversor) é dada pela relação entre a potência nominal CA do inversor (*PNI*) e a potência de pico do gerador (painéis) *PFV*, conforme indica a Equação (02). O ajuste deste fator é importante para se utilizar o máximo da energia gerada com uma maior eficiência (KALOGIROU, 2014). A potência do gerador FV e do inversor devem ser ajustadas de modo que o *FDI* do inversor tenha a melhor relação custo/benefício. O *FDI* depende do inversor selecionado, da tecnologia do módulo FV, da orientação e inclinação do painel, além das condições ambientais, como temperatura e radiação local.

$$FDI = \frac{P_{NI}}{PFV} \quad (02)$$

A otimização do *FDI* exige simulação numérica, que deve ser realizada utilizando-se dados horários de radiação e temperatura ambiente. A literatura indica que os valores inferiores de *FDI* recomendados situam-se na faixa de 0,7 a 0,85, enquanto que o limite superior é de 1,05 (KALOGIROU, 2014).

A escolha do inversor para os sistemas foi feita com base na posição dos módulos com relação ao índice de incidência solar (posição favorável). Como foi possível instalar os módulos posicionados para o norte, o *FDI* poderia ser na faixa de 0,7. Esta estimativa foi realizada por um software SAM que simula o posicionamento dos módulos. Módulos com melhor direcionamento pode se considerar *FDI* de 0,95. De acordo com a Equação (04), a P_{NI} para cada sistema FV

$$\begin{aligned} P_{NI1} &= 0,7 \cdot 2,41 = 1,68 \text{ kW}; \\ P_{NI2} &= 0,95 \cdot 3,94 = 3,74 \text{ kW}; \\ P_{NI3} &= 0,7 \cdot 5,37 = 3,76 \text{ kW}; \\ P_{NI4} &= 0,7 \cdot 1,47 = 1,03 \text{ kW}. \end{aligned}$$

Tabela 3 - Dados dos Sistemas FV's

Características	FV1	FV2	FV3	FV4
Consumo anual médio	3853 kWh	6254 kWh	8513 kWh	2358 kWh
Quantidade de Módulos	7 unidades	12 unidades	12 unidades	6 unidades
Potência dos Módulos	345 W	345 W	450 W	245 W
Orientação dos Módulos	Noroeste	Sudeste	Norte	Norte
Potência de pico	2,43 kWh	3,94 kWh	5,37 kWh	1,47 kWh
Potência nominal do inversor	2 kW	4,2 kW	4 kW	1,5 kW

O software Solarview, da linha Pró, foi utilizado para acompanhar a geração e garantir que o sistema cumpra as especificações de projeto. O inversor por meio de uma conexão via internet se conecta disponibilizando os dados. É possível acompanhar a potência total instalada, a potência instantânea de geração, a energia total gerada, a economia total em reais, o carbono evitado e o número de árvores cultivadas. O software SAM (System Advisor Model) auxilia no dimensionamento e na análise de desempenho técnico como: *FDI*, estimular produção energia, custos de instalação e operação, indicadores financeiros e etc.

3.3. Tributação Estado de São Paulo

Para determinar a relação R\$/kWh do subgrupo B1, o valor a ser cobrado do consumidor por kWh, a CPFL utiliza a equação indicada na Equação (3). Considerando alíquota do ICMS aplicado: 25 %; alíquota média do PIS aplicado: 0,88 % (referência outubro/22); alíquota média do COFINS aplicado: 4,06 % (referência outubro/2022) e valor do kWh estabelecido pela Resolução ANEEL, nº 2.402, de 19 de junho de 2018, para um consumidor classificado como residencial, a TUSD é de R\$ 0,3659 e a TE é de R\$ 0,2959, o que resulta em R\$ 0,6618 por kWh.

$$\frac{TUSD + TE}{1 - (ICMS + PIS + COFINS)} = \frac{0,6618}{1 - (25,00 + 0,88 + 4,06)/100} \quad ((03))$$
$$= 0,9612 \text{ R\$/kWh}$$

3.4. Valor Presente Líquido

O valor presente do fluxo de caixa operacional do projeto é definido como o valor presente líquido. Se o VPL de um investimento for positivo ($VPL > 0$), a proposta é viável, o que significa que o dinheiro investido será reembolsado e, quanto maior for o valor do VPL, melhor será o projeto. O projeto é rejeitado se o resultado do VPL for negativo ($VPL < 0$), indicando que o investimento não é economicamente factível (COELHO, 2022). A equação é definida como FC é o fluxo de caixa livre de determinado período, FC_0 é o fluxo de caixa inicial (investimento), e i é a taxa de desconto conforme indica a equação 4.

$$VPL = FC_0 + \frac{FC_1}{(1 + i)^1} + \frac{FC_2}{(1 + i)^2} + \frac{FC_3}{(1 + i)^3} + \dots + \frac{FC_N}{(1 + i)^n} \quad (04)$$

3.5. Taxa Interna de Retorno

Ao calcular a TIR do respectivo projeto, é possível averiguar a rentabilidade sem contar com fatores de mercado (externos). Quanto maior for a taxa encontrada, melhor será o projeto. Outro objetivo fundamental da TIR é encontrar uma taxa de juros que torne o VPL nulo ou positivo quando aplicado a fluxos de caixa futuros. Quando se espera um determinado retorno, a TIR deve ser igual ou superior a essa exigência para que o investimento seja viável (DE MELO, 2022).

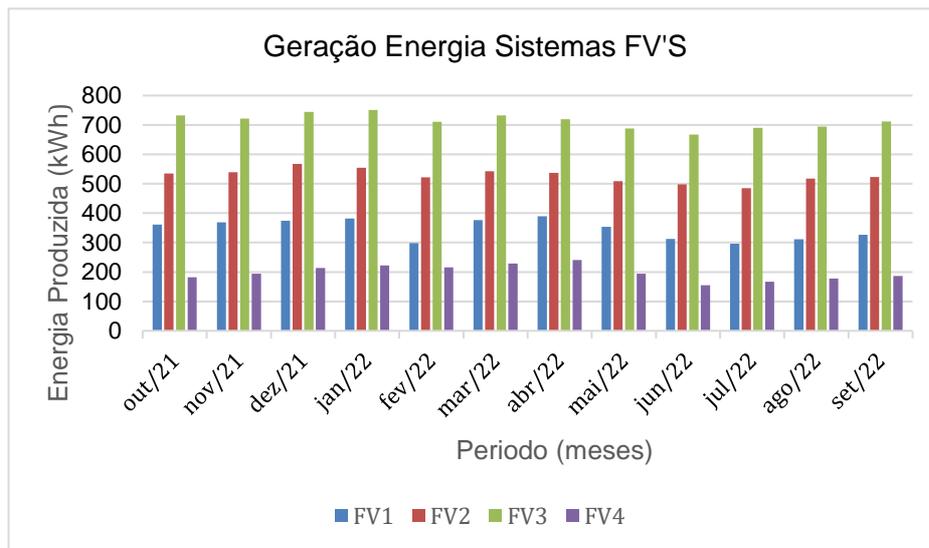
$$0 = -FC_0 + \frac{FC_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{FC_2}{(1 + TIR)^2} + \frac{FC_3}{(1 + TIR)^3} + \dots + \frac{FC_N}{(1 + TIR)^n} \quad (05)$$

4. ANÁLISE E DISCUSSÕES

4.1. Geração de energia

A seguir estão descritos os resultados de geração elétrica, economia e impactos ambientais para os sistemas fotovoltaicos 1, 2, 3 e 4.

Gráfico 1 - Geração de Energia Elétrica Sistemas FV's



4.2. Viabilidade Econômica

Conforme abordado anteriormente, toda avaliação de viabilidade econômica, deve ser analisada não só pelo valor presente líquido, mas também pela TIR e pelo Payback. Nem sempre o projeto que apresenta um maior VPL ou menor Payback pode ser considerado mais atrativo do que o outro. A Taxa interna de retorno é capaz de demonstrar qual sistema FV, é mais rentável e mais atrativo em termos financeiros. No cálculo o valor dos custos totais (manutenção e limpeza do sistema) como também a degradação total do sistema, foi definido a alíquota de 4 % sobre o valor do sistema total durante um ano por um período total de 21 anos, e uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 10 % e a taxa de desconto de 12 %. Para essa previsão, levou-se em consideração a evolução dos custos de energia, com o aumento tarifário de 9 % ao ano (ANEEL, 2022). Na Tabela 4 pode-se observar que o sistema FV 1 apresenta uma TIR maior e o Payback menor quando comparado com os outros sistemas FV's instalados, ou seja, este projeto será o mais rentável em termos financeiros do que os demais.

Tabela 4 - Comparativos econômicos sistemas FV's

	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Sistema 4
Capital Investido	R\$ 9.299,00	R\$ 16.999,00	R\$ 25.900,00	R\$ 6.799,00
Payback (anos)	3	6	4	4
VPL	R\$ 45.275,81	R\$ 34.919,12	R\$ 199.985,87	R\$ 56.844,67
TIR	49,46	29,37%	37,78%	39,99%

4.3. Avaliação do Impacto Ambiental das Unidades Geradoras

Como as 4 unidades geradoras foram instaladas nos mesmos períodos, os valores do carbono evitado e de árvores cultivadas obtidos são proporcionais ao período de outubro de 2021 a setembro de 2022 estabelecido na metodologia. A Tabela 5 mostra a quantidade de toneladas de CO₂ que deixaram de ser emitidos na atmosfera por cada sistema FV, os dados foram coletados em outubro de 2022, após a análise completa de todos os sistemas (SOLARVIEW, 2022).

Tabela 5 - Impacto ambiental dos sistemas FV

Avaliação do Impacto Ambiental		
FV	CO ₂ (Ton)	Nº Árvores cultivadas
Sistema FV 1	0,212	1,48
Sistema FV 2	0,323	2,26
Sistema FV 3	0,437	3,05
Sistema FV 4	0,121	0,84
Total	1,093	7,63

Ao longo do ano de estudo, os quatro sistemas analisados neste trabalho deixaram de emitir cerca de 1,09 toneladas de CO₂ por ano. Dessa forma, quanto maior o número de instalações de sistemas solares fotovoltaicos, menos energia elétrica terá que ser fornecida pelas concessionárias. Ainda, caso as 1,09 toneladas de CO₂ fossem emitidas para a atmosfera, seriam necessárias cerca de 7,63 árvores em estágio adulto para realizar a fixação desse gás.

5. CONCLUSÃO

Os sistemas FV's foram instalados nas quatro residências baseados nos dimensionamentos realizados afins de suprir a demanda de energia de cada uma das

residências. A viabilidade técnica, econômica e ambiental de cada sistema pôde ser avaliada e comprovada de forma individual em cada um deles.

O sistema FV 1 produziu energia anual acima do estimado, gerando excesso de 2,96 %. Este sistema apresentou a maior taxa interna de retorno ao ano quando comparado com os outros sistemas, trazendo assim o retorno do investimento em menor tempo. O sistema FV 2 produziu energia dentro do esperado, mesmo com 2 dias com geração reduzida devido a sujeira de folha nas placas. Este fator pode estar relacionado ao FDI estabelecido para este sistema, que diferente dos outros sistemas FV's avaliados neste trabalho que estavam na faixa de 0,7, este estava na faixa de 0,9. Portanto é seguro concluir que o sistema FV 2 obteve melhor desempenho quando comparado com os outros, atingindo a eficiência prevista conforme literatura. O sistema FV 3 não obteve nenhum tipo de falha energética, porém as placas sofreram com sombreamento maior do que as demais devido a localização do sistema. Mesmo diante disso, este sistema apresentou geração de 100,6 % comparado com projetado, ou seja, durante o ano este usuário não precisou comprar energia da companhia. O sistema FV 4 mesmo ficando distante da cidade e ficando próximo as margens do rio grande, próximo à divisa de município entre Barretos e Guaira, não apresentou falhas na geração energética e correspondeu aos valores de geração de energia e economia simulados antes da instalação.

Valores consideráveis de economia financeira foram obtidos nos quatros sistemas FV's, os quais chegaram muito próximos aos valores simulados para o primeiro ano de uso. Isto indica que a economia prevista para 21 anos pode ser alcançada, gerando notável lucro. O sistema FV 1 apresentou a melhor relação custo x benefício dentre os outros sistemas avaliados, pois correspondeu com os valores previstos tanto em energia elétrica (kWh) quanto financeiramente, tendo um Payback de 3 anos e TIR de 49,46 % ao ano, excedendo apenas 2,96 % da geração esperada no dimensionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. – Unidade Geração Distribuída, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>. Acesso em: 03 de maio de 2022.

CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel, 2014.

COELHO, Gabriel de Souza. Investimento na geração de energia solar fotovoltaica: viabilidade econômica de um modelo de financiamento. 2022.

CARDOSO, R. B.; CAMPOS, O. C. Impacts of Climate Variables in Energy Generation in the Photovoltaic System of the UNIFEI, in Itabira City. Revista SODEBRAS, v. 12, p. 295-299, 2017.

DE MELO, Otávio Augusto Malheiros Honório. Energia Solar Fotovoltaica: viabilidade econômico-financeira e socioambiental. Editora Dialética, 2022.

KALOGIROU, Soteris A. Photovoltaic Systems. Solar Energy Engineering, [S.L.], p. 481- 540, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-397270-5.00009-1>.

ONU - United Nations Organization, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: 2021: The 2017 Revision. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20120111060647/http://www.census.gov/population/international/data/idb/region.php?N=%20Region%20Results%20&T=7&A=aggregate&RT=0&Y=2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019,2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026,2027,2028,2029,2030,2031,2032,2033,2034,2035,2036,2037,2038,2039,2040&R=1&C=>>>.

Acesso em 02 de junho de 2022.

PINHO, J.; GALDINO, M. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014

SILVA, R. M. Energia Solar: dos incentivos aos desafios. Texto para discussão nº 166. Brasília. Senado Federal, 2015.

SOLARVIEW. Equivalências de economia: sustentabilidade. Sustentabilidade. Disponível em: <https://my.solarview.com.br/base-conhecimento/equivalencias-de-economia-sustentabilidade/>. Acesso em: 14 set. 2022.

ZAHEDI, A. Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. Renewable Energy. Issue 5, v. 31, p.711-718, 2006.