

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES EVITADAS DE DIÓXIDO DE CARBONO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

ESTIMATION OF AVOIDED CARBON DIOXIDE EMISSIONS IN THE GENERATION OF ELECTRICITY FROM SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Leomir dos Santos Teixeira¹
Alexandre do Nascimento Silva²
José Roberto de Araújo Fontoura³

RESUMO

Atender às demandas de energia elétrica da população mundial de forma sustentável apresenta-se como um grande desafio, principalmente, pelos impactos ambientais resultantes da geração de eletricidade pelo uso de fontes a partir de recursos fósseis com maior potencial de emissão de gases de efeito estufa, dentre eles o dióxido de carbono (CO₂). Este desafio reforça a necessidade de buscar fontes energéticas alternativas e sustentáveis, a exemplo da geração de eletricidade a partir de painéis solares fotovoltaicos com menor potencial de emissão de CO₂, o que também pode contribuir para o Brasil superar a dificuldade de suprir a demanda de energia elétrica, pois a construção de novas usinas hidrelétricas impõe elevados investimentos, além de maiores impactos ambientais. Neste cenário, o objetivo deste trabalho é estimar as emissões evitadas de CO₂ a partir de um sistema solar fotovoltaico instalado em uma residência no município de Catu-BA, no período de janeiro a dezembro de 2021 e compará-las com os fatores de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil (SIN), com a aplicação da metodologia de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Palavras-chave: energia elétrica. Gases de efeito estufa. Energia solar fotovoltaica.

¹ Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental (UNEB).

² Doutor em Modelagem computacional, Mestre em Modelagem Computacional, Graduado em Engenharia de Produção e Administração, Professor do Mestrado em Modelagem e Simulação em Biosistemas (UNEB), Professor da Graduação de Engenharia Sanitária e Ambiental (UNEB), Professor da Graduação de Engenharia de Produção (UESC).

³ Doutor em Difusão do Conhecimento, Mestre em Contabilidade, pós graduado em Análise de Sistemas, pós Graduado em Contabilidade, ex-coordenador da pós graduação em Análise de Sistemas, ex-coordenado do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física – MNPEF (Sociedade Brasileira de Física), Coordenado do Núcleo de Pesquisa e Extensão (NUPE) da UNEB, Professor do Mestrado em ensino de Física e do Mestrado em Modelagem e Simulação de Biosistemas, Professor da Graduação em Filosofia (Faciba), Professor da Graduação em Sistemas de Informação (UNEB).

ABSTRACT

Meeting the electrical energy demands of the world population in a sustainable way is presented as a great challenge, mainly, due to the environmental impacts resulting from the generation of electricity through the use of sources from fossil resources with the greatest potential for emission of greenhouse gases, including carbon dioxide (CO₂). This challenge reinforces the need to seek alternative and sustainable energy sources, such as electricity from photovoltaic solar panels with lower CO₂ emission potential, which also can help Brazil overcome the difficulty of supplying the demand for electricity, since the construction of new hydroelectric plants impose high investments, in addition to greater environmental impacts. In this scenario, the objective of this work is to estimate the avoided CO₂ emissions from a photovoltaic solar system installed in a residence in the city of Catu-BA, between May 2020 and April 2022 and compare them with the CO₂ emission factors of the National Interconnected System of Brazil (SIN), with the application of the methodology of Clean Development Mechanism (CDM).

Keywords: electricity. Greenhouse Gases. Photovoltaic solar energy.

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial é composta por todas as fontes capazes de gerar energia para suprir as necessidades humanas e, como ponderado por Cetesb (2020), o uso de combustíveis fósseis como fontes de energia tem como um dos resultados do processo de queima, a emissão de CO₂ e outros Gases do Efeito Estufa (GEE) para a atmosfera. O potencial de emissão de CO₂ varia de em função da fonte, a exemplo da matriz elétrica que é composta por fontes não renováveis como os combustíveis fósseis e por fontes renováveis como: hídrica, biomassa, nuclear, eólica e solar fotovoltaica (EPE, 2022).

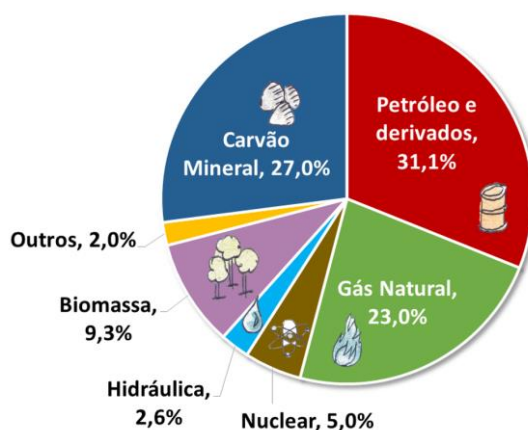
Dentre os combustíveis fósseis utilizados para a geração de energia, destacam-se o carvão, o gás natural e os derivados de petróleo como: gasolina, óleo diesel, óleos combustíveis, entre outros (CETESB, 2020).

Para Frota & Vasconcelos (2019), dentre as substâncias que emitem gases de efeito estufa, destacam-se: óxido de nitrogênio N_2O , hidrofluorcarbono (HFC), perfluorcarbono (PFC), metano CH_4 e clorofluorcarbono (CFC), mas o principal contribuinte para o efeito estufa é, sem dúvida, o dióxido de carbono CO_2 .

Sobre a matriz energética, EPE (2022) relata que o mundo possui uma matriz composta, principalmente, por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e gás natural. As fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, correspondem a apenas 2% da matriz energética mundial. Representado na

Figura 1 evidencia a participação de cada fonte na matriz mundial.

Figura 1: Matriz energética mundial 2021.



Fonte: EPE (2022).

No Balanço Energético Nacional do ano de 2021, constata-se que a matriz energética do Brasil é muito diferente da mundial. Por aqui, apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, usa-se mais fontes renováveis que no resto do mundo (EPE, 2022).

Os dados referentes a energia elétrica, divulgados por EPE (2022), evidenciam que o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 53,4% da oferta interna e a 56,8% se incluir as importações oriundas da usina de Itaipu. A geração de energia elétrica em centrais de serviço público e

autoprodutores atingiu 656,1 TWh em 2021, 4% acima de 2020, as centrais elétricas de serviço público, participaram com 82,6% da geração total e a geração hídrica reduziu -8,6% na comparação com o ano anterior. A autoprodução, em 2021, participou com 17,4% do total produzido, correspondente ao montante de 114 TWh.

Com relação à energia solar fotovoltaica, Pinho, Galdino et al. (2014), relata que o aproveitamento da energia gerada pelo sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, como fonte de calor e luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano e que quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra.

Nos resultados publicados pelo Ministério das Minas e Energia, em 2021, a geração solar fotovoltaica atingiu a marca de 9.019 GWh e também teve seu crescimento incentivado por ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida (EPE, 2022).

Em concordância com Pileggi & Filho (2013), no Protocolo de Quioto, assinado no Japão em 1997, encontram-se as bases formais para o surgimento de um mercado internacional de créditos de carbono, o que favorece aos países desenvolvidos no atendimento das metas estabelecidas, por meio de mecanismos que permitiram a criação de projetos de redução de emissões em outros países para atender as metas locais dos países desenvolvidos.

Um dos mecanismos criados foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um instrumento econômico que tem como objetivo facilitar o atendimento das metas estabelecidas com projetos de redução de GEE em países em desenvolvimento, ou seja, países que não têm metas obrigatórias de redução. Nesses casos, podem negociar as reduções de emissões por meio da comercialização de Reduções Certificadas de Emissões (RCE), o que auxilia, até certo ponto, os países desenvolvidos a cumprirem seus compromissos quantificados (PILEGGI; FILHO, 2013).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é conhecer o quantitativo de CO₂ que não foi emitido para a atmosfera como resultado da utilização de eletricidade gerada por intermédio do gerador fotovoltaico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foi aplicado o método científico dedutivo, de natureza quantitativa e exploratória, mediante procedimento de coleta do tipo estudo de caso.

Na percepção de Jung & Eng (2003), o método dedutivo, elaborado por René Descartes (1596–1650), propõe resolver problemas ao justificar o contexto da descoberta através da própria razão e inicia a dedução sobre o problema maior para chegar a conclusões particulares.

A pesquisa quantitativa, para Appolinário (2007), lida com fatos, cujas variáveis devem ser rigorosamente determinadas e sua mensuração já deve estar pressuposta pelo próprio método, partindo de uma análise quase sempre mediada por algum critério matemático.

A pesquisa com objetivo exploratório ajuda o pesquisador a compreender ou aprimorar o conhecimento sobre um determinado assunto, de modo que, após o seu término, seus resultados possam levar a outras pesquisas com novas abordagens (APPOLINÁRIO, 2007).

Para alcançar o objetivo proposto, será aplicada a metodologia do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O sistema foi instalado em uma residência na cidade de Catuba, cujo consumo médio mensal de energia elétrica é de 311 kWh. Serão utilizados, como referência, os fatores de emissões de CO₂ do SIN que também aplica a mesma metodologia.

O sistema fotovoltaico foi concebido e instalado na modalidade SFCR, também denominado on-grid, o que permite injetar na rede a energia gerada e não consumida e utilizá-la quando não houver geração ou esta for menor que o consumo instantâneo. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** descrevem-se a composição e especificação do sistema, que possui capacidade de geração média mensal de até 348 kWh/mês.

Tabela 1: Componentes do gerador fotovoltaico.

Quant.	Descrição	Registro INMETRO	Potência	Fabricante
1	Gerador Fotovoltaico	-	2,68 kW	WEG
8	Módulo Fotovoltaico p-Si - 16m ² - 184 kg	3757/2017	335 Wp	GCL
1	Inversor ONGRID	4380/2018	2kW	WEG
-	Estrutura metálica e acessórios de fixação em alumínio	-	-	WEG
-	Cabos, conectores, dispositivos e quadro de proteção	-	-	WEG

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Realizaram-se consultas de conteúdos publicados em livros, artigos científicos, sites governamentais e de empresas especializadas, além de periódicos que abordam a temática do estudo, relatórios e informações da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) e resoluções normativas.

Como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a potência do sistema fotovoltaico é de 2,68 kW. Desta forma, foi classificado como de pequena escala do escopo setorial do Tipo I (energia renovável), que para Lopes (2013), aplica-se aos projetos de MDL que apresentam capacidade instalada máxima de 15 MW.

Os dados avaliados compreenderam os 12 meses e as 4 estações do ano de 2021, pelo fato da geração de energia solar depender da incidência da luz solar, o que pode variar em diferentes épocas do ano.

As coletas dos dados foram realizadas diariamente, registrando-se em uma planilha os valores referentes à geração, injeção e consumo de energia elétrica. Estas informações foram obtidas do aplicativo FusionSolar, disponibilizado pelo fabricante do inversor que informa em tempo real a quantidade de energia gerada pelo sistema e do medidor de energia bidirecional instalado pela concessionária, o qual registra tanto a passagem de eletricidade excedente que é injetada na rede quanto a eletricidade que entra na residência quando não há geração ou esta for insuficiente para atender a demanda instantânea da residência. (BRASIL, 1998).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra os principais componentes do sistema (módulos, inversor e medidor da concessionária).

Figura 2: Principais componentes instalados.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Dentre as metodologias elaboradas pela convenção da UNFCCC (2014a) para certificação de projetos de MDL, observou-se que a metodologia AMS-I.D (“Geração de energia renovável conectada à rede”), versão 18.0 de 2014, apresenta-se como a opção mais indicada, pois, compreende unidades de geração de energia renovável, como fotovoltaica, hídrica, maremotriz/onda, eólica, geotérmica e biomassa renovável com fornecimento de eletricidade a uma rede nacional ou regional (UNFCCC, 2014a).

Na metodologia AMS-I.D (versão 18.0), a energia elétrica gerada e injetada na rede substituirá a eletricidade produzida por outras fontes que emitem carbono e estão ligadas ao sistema elétrico ao qual o gerador está conectado (UNFCCC, 2014a).

No entendimento de França et al. (2021), nesta metodologia, na construção de novos projetos pode ocorrer emissões de carbono, conhecidas como emissões de projeto, mas que no caso de energia solar fotovoltaica deve-se considerar que não há emissões de projeto. Além disso, Lopes (2013), França et al. (2021) destacam que as emissões de fugas, decorrentes da atividade de geração, que geralmente estão ligadas a projetos de grande escala, são consideradas nulas para projetos de pequena escala de energia solar fotovoltaica.

Desta forma, as reduções de emissões de CO₂e do sistema fotovoltaico podem ser calculadas pela Equação 1 (UNFCCC, 2014a):

$$ER_y = BE_y - PE_y - LE_y \quad (1)$$

Onde:

ER_y: Reduções das emissões no ano y (tCO₂e/ano);

BE_y: Emissões da linha de base no ano y (tCO₂e/ano);

PE_y: Emissões do projeto no ano y (tCO₂e/ano), no caso em questão é zero;

LE_y: Emissões decorrentes das fugas no ano y (tCO₂e/ano), no caso em questão é zero.

Como as emissões de projeto e as emissões das fugas são nulas, as reduções de emissões

serão iguais às emissões de linha de base e para o cálculo de emissões de linha de base (BE_y), utiliza-se a Equação 2 (UNFCCC, 2014a):

$$BE_y = EG_{pj,y} * EF_{grid,y} \quad (2)$$

Onde:

BE_y : Emissões da linha de base no ano y (tCO₂e/ano);

$EG_{pj,y}$: Quantidade líquida de eletricidade fornecida à rede elétrica como resultado da atividade de projeto de MDL no ano y (MWh);

$EF_{grid,y}$: Fator de emissão de CO₂ de rede elétrica no ano y (tCO₂e/MWh).

Em consonância com UNFCCC (2014a), para encontrar o fator de emissão de CO₂ da rede elétrica no ano y ($EF_{grid,y}$) considera-se uma margem combinada (CM), ou seja, a combinação dos fatores da margem de operação (OM) e da margem de construção (BM) (Equação 3):

$$EF_{grid,CM,y} = EF_{grid,OM,y} * w_{OM} + EF_{grid,BM,y} * w_{BM} \quad (3)$$

Onde:

$EF_{grid,BM,y}$: Fator de emissão de CO₂ da margem de construção no ano y (tCO₂e/MWh); $EF_{grid,OM,y}$: Fator de emissão de CO₂ da margem de operação no ano y (tCO₂e/MWh); w_{OM} : Ponderação do fator de emissão da margem de operação (%);

w_{BM} : Ponderação do fator de emissão da margem de construção (%).

Em conformidade com UNFCCC (2014b), para projetos de energia solar, pela “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico” – Versão 07.0, devem ser considerados os valores de 0,75 para w_{OM} e 0,25 para w_{BM} .

Os fatores de emissão de CO₂ da margem de construção ($EF_{grid,BM,y}$) e da margem de operação ($EF_{grid,OM,y}$) para o cálculo da Equação 3 foram extraídos do site do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC). Utilizaram-se dados sobre Fatores de Emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no SIN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Protocolo de Quioto estabeleceu metas de redução de emissões dos GEE que baseavam-se na hipótese de que, historicamente, o aumento observado nas emissões de GEE geravam um crescimento na concentração desses gases na atmosfera terrestre e, conseqüentemente, um incremento ao efeito estufa natural. Como resultado, verificar-se-ia a elevação da temperatura média da biosfera, a qual ocasiona diversos danos climáticos e socioambientais que afetam as condições de vida no planeta (MOTTA et al., 2011).

3.1 GASES DE EFEITO ESTUFA

A luz solar incide sobre a superfície terrestre como radiação eletromagnética visível que é convertida em outras formas de energia radiante, inclusive radiação infravermelha (IV – i... v...). Se a Terra absorvesse completamente a radiação incidente, sua temperatura seria incompatível com as formas de vida. Entretanto, há um ciclo que envolve esse processo permitindo um equilíbrio entre a energia recebida, a absorvida e a refletida de volta ao espaço (FROTA; VASCONCELOS, 2019).

Na avaliação de Baird & Cann (2011), o fenômeno de interceptação dos raios infravermelho emitidos pelos constituintes atmosféricos e sua distribuição como calor para aumentar a temperatura da atmosfera é chamado de efeito estufa. Ele é responsável pela temperatura média da superfície do ar perto da Terra ser próxima de +15°C em vez de aproximadamente -18°C, temperatura que seria caso não houvesse a absorção de IV pelos gases na atmosfera. A superfície é aquecida tanto por esse mecanismo indireto quanto pela energia solar absorvida diretamente.

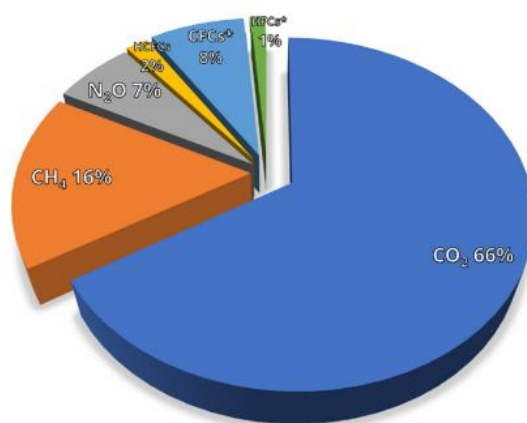
Então, a poluição atmosférica representada pelo aumento das concentrações dos compostos capazes de absorver uma grande parcela da radiação IV, impossibilita o retorno das radiações emitidas pela superfície terrestre e pelos corpos d'água para o espaço.

Para Frota & Vasconcelos (2019), dentre as espécies que absorvem a radiação eletromagnética IV, ou seja, que contribuem para o efeito estufa, destacam-se: NO_x, H₂O, O₃,

CH₄ e CFC, mas o principal contribuinte é, sem dúvida, o CO₂.

O CO₂ é o gás de efeito estufa mais importante na atmosfera, responsável por aproximadamente 66% do efeito de aquecimento do clima, principalmente pela queima de combustíveis fósseis. As concentrações médias globais de CO₂ atingiram 413,2 ppm em 2020 (WMO, 2021).

Figura 2: Gases de efeito estufa.



Fonte: WMO (2021).

Na

Figura 2 pode-se verificar a contribuição de cada gás no efeito estufa desde a era pré-industrial até o ano de 2020.

3.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). A célula fotovoltaica é um dispositivo fabricado com material semicondutor e constitui-se a unidade fundamental desse processo de conversão. Dentre as principais tecnologias aplicadas na produção de células e módulos fotovoltaicos, destaca-se a de primeira geração, a qual é dividida em duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma

tecnologia consolidada e confiável, e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível

(PINHO; GALDINO et al., 2014).

Na análise de Pinho, Galdino et al. (2014), o efeito fotovoltaico, primeiramente descoberto por Edmond Becquerel, em 1839, representa o aparecimento de uma diferença de potencial nos terminais de uma célula eletroquímica causada pela absorção de luz. Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico resultante dos estudos da física do estado sólido e, apenas em 1956, iniciou-se a produção industrial, juntamente com o crescimento da área de eletrônica.

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca, por empresas do setor de telecomunicações, de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a chamada "corrida espacial". A célula fotovoltaica era e continua a ser o meio mais adequado (menor custo, peso e segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço. A crise do petróleo de 1973 renovou e ampliou o interesse em aplicações terrestres para a energia solar fotovoltaica (PINHO; GALDINO et al., 2014).

Na década de 1990, a produção da indústria fotovoltaica no mundo já ultrapassava a marca de 1 MWp/ano e no final desta década, políticas dos governos da Alemanha e do Japão contribuíram para o aumento substancial no desenvolvimento desse mercado. Essas políticas foram impulsionadas, em parte, por um forte compromisso com a redução de CO₂ e em parte para desenvolver o mercado dessa tecnologia para exportação (SOARES, 2022).

Na visão de Soares (2022), ao longo dos anos 2000 é possível registrar diversos marcos para a energia solar fotovoltaica, como: utilização de SFCR (elevando consideravelmente o volume de produção das células), recorde de eficiência de uma célula fotovoltaica (40%) e alta redução dos custos de fabricação, desencadeando em 2011, na China, um valor de US\$ 1,25 por watt a cada módulo fotovoltaico de silício.

Mesmo com algumas normativas da ANEEL em 2009, Soares (2022), entende que a história da energia solar fotovoltaica no Brasil inicia a sua consolidação em 2012, com a regulamentação da resolução normativa 482 da ANEEL (RN-482/2012), que discorria sobre os sistemas conectados à rede, sobre os sistemas de compensação de energia e sobre os sistemas de

microgeração e minigeração. Por meio dessa resolução foi permitido a qualquer consumidor

gerar a sua própria energia renovável (não somente solar fotovoltaica) e realizar a conexão à rede de distribuição.

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), conforme Pinho, Galdino et al. (2014), dispensam o uso de acumuladores, pois a energia por eles produzida pode ser consumida diretamente pela carga ou injetada diretamente na rede elétrica convencional, para ser consumida pelas unidades conectadas ao sistema de distribuição. Estes sistemas são basicamente de um único tipo e são aqueles em que o gerador fotovoltaico representa uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado. A Figura 3 ilustra um sistema SFCR.

Figura 3: Sistema fotovoltaico conectado à rede.



Fonte: CSR (2017) 2.3 O Sistema Interligado Nacional (SIN).

O SIN é um sistema hidrotérmico de grande porte para produção e transmissão de energia elétrica, cuja operação envolve modelos complexos de simulações que estão sob coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que, por sua vez, é fiscalizado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANA, 2022).

De acordo com ONS (2022), o SIN é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro- Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas, permite a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes

hidrológicos das bacias. A integração dos recursos de geração e transmissão permite o

atendimento ao mercado com segurança e economicidade.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país (ONS, 2022).

3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No período analisado, verificou-se que os valores correspondentes à geração e ao consumo de energia elétrica na residência apresentaram-se equilibrados, 3711 kWh para energia gerada e 3729 kWh para energia consumida, o que possibilita considerar que a residência consumiu a própria energia produzida e deixou de emitir o CO₂ o que ocorreria caso consumisse a energia do SIN.

Na Tabela 1 pode-se constatar as variações dos valores de geração e de consumo mensais, além do consumo médio mensal da residência, que foi de 311 kWh, expressivamente superior ao consumo médio residencial brasileiro, que no boletim emitido por EPE (2021), em 2020, foi de 165 kWh/mês. Em parte, esta disparidade pode ser justificada pela maior permanência das pessoas em casa e realização de atividades laborais e acadêmicas no modelo home office em virtude da pandemia da COVID-19 e também pela utilização diária de chuveiro elétrico e ar condicionado.

Tabela 1: Geração e consumo mensal – 2021.

Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Consumida (kWh)
Jan	366	338
Fev	335	297
Mar	391	237
Abr	280	320
Mai	266	286
Jun	232	288
Jul	238	311
Ago	295	296
Set	310	297
Out	358	323
Nov	315	347
Dez	326	390
Média	309	311
Total	3711	3729

Fonte: elaborada pelo autor (2022)

No entanto, apesar do consumo médio da residência se mostrar superior ao consumo médio residencial nacional, com a utilização do sistema fotovoltaico, a residência não contribuiu para a ocorrência do efeito estufa com emissão do CO₂, visto que a quantidade aproximada de energia consumida no período foi igual à energia gerada pelo sistema fotovoltaico.

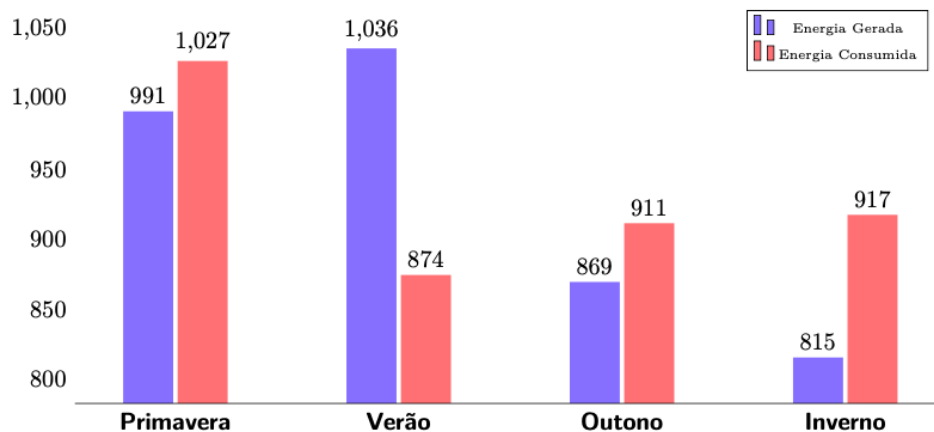
Quanto a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico, a geração média mensal foi de 309 kWh, dentro da capacidade máxima do gerador, que conforme dados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é de 348 kWh/mês. Por se tratar de um sistema fotovoltaico, explicado na seção 2, a incidência de luz influencia diretamente na geração diária.

Na

Figura 4 tem-se os resultados sazonais da energia gerada e consumida, na qual permite-se perceber que a geração de energia foi ligeiramente maior no verão e na primavera, o que

pode ser relacionado ao fato de que, como explica HCC (2022), no inverno o sol está mais distante da Terra, principalmente em locais mais distantes da Linha do Equador, nesse caso a incidência de irradiação solar direta e a geração efetiva diminuem consideravelmente.

Figura 4: Geração e Consumo Sazonal em kWh – 2021



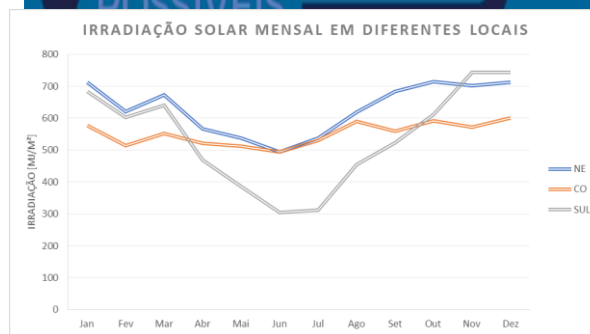
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Por outro lado, HCC (2022) destaca que o inverno possui temperaturas menores, o que diminui, conseqüentemente, a temperatura de trabalho dos painéis do sistema e contribui para a diminuição de perdas nos módulos fotovoltaicos. As perdas por temperatura refletem na maior perda efetiva de rendimento durante a operação de um sistema fotovoltaico, nesse caso, essa parcela faz com que os módulos fotovoltaicos performem melhor em baixas temperaturas.

Ao comparar-se os dados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** com o da

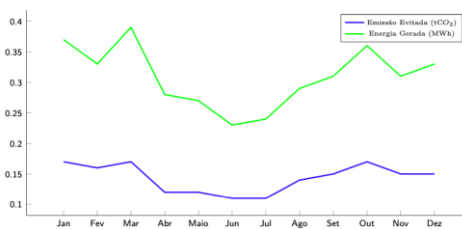
Figura 5, referente à região Nordeste, onde está localizado o município no qual o sistema fotovoltaico foi instalado, observa-se que a geração de energia acompanha a curva de irradiação solar da região.

Figura 6: Irradiação Solar 2019 a 2021.



Fonte: HCC (2022).

Figura 5: Emissões evitadas x energia gerada – mensal em 2021.



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

No detalhamento da

Tabela 2, pode-se comparar as emissões evitadas que foram aproximadamente 1,72 tCO₂e/ano com a geração de energia pelo sistema que foi de 3,71 MWh. A quantidade média mensal de emissões evitadas de CO₂e foi de 0,14 toneladas.

Tabela 2: Emissões evitadas x energia gerada

Mês	Energia Evitadas (tCO ₂ e/ano)	Energia Gerada (MWh)
Jan	0,17	0,37
Fev	0,16	0,33
Mar	0,17	0,39
Abr	0,12	0,28

Vol. 22, nº 1, (2023). Pág. 197,23 217

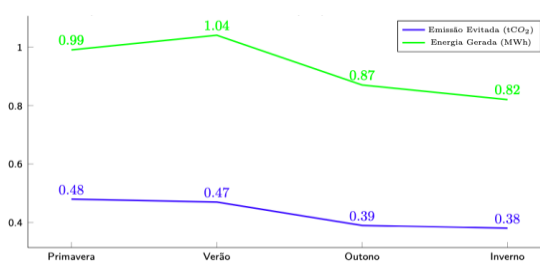
Maio	0,12	0,27
Jun		
Jul	0,11	0,24
Ago	0,14	0,29
Set	0,15	0,31
Out	0,17	0,36
Nov	0,15	0,31
Dez	0,15	0,33
Média	0,14	0,31
Total	1,72	3,71

Fonte: elaborada pelo autor (2022).

As representações da

Figura 5 e da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** permitem avaliar o comportamento das curvas de geração de eletricidade e de emissões evitadas de CO₂, mensalmente e sazonalmente. As variações apresentam-se coerentes com as variações de irradiação solar mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 6: Emissões evitadas x energia gerada – sazonal em 2021.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise dos resultados obtidos, foi possível conhecer o potencial de geração do

sistema fotovoltaico residencial, bem como mensurar a contribuição desse tipo de sistema na redução da emissão de CO₂ durante o período analisado: total de 4,72 tCO₂ que não foi lançado na atmosfera, apesar de ser pouco representativo para a redução global do efeito estufa, evidencia o potencial de ganho ambiental resultante da utilização, em larga escala, de fontes renováveis e de baixo carbono para a geração de energia elétrica no planeta.

Neste sentido, para promover a utilização em larga escala de sistemas fotovoltaicos, algumas iniciativas podem ser adotadas a fim de incentivar e facilitar o acesso da população a este tipo de tecnologia, dentre as quais pode-se citar:

- Criação de programas de incentivos fiscais para fabricação e importação de componentes do sistema, o que pode reduzir o preço para o consumidor;
- Ampliação da disponibilidade de linhas de créditos para financiamento de

projetos de energia solar com taxas de juros adequadas;

- Oferta de financiamentos com métodos de cálculo, cuja parcela mensal seja equivalente ao valor da conta que o consumidor paga à concessionária, o que torna o projeto auto sustentável do ponto de vista financeiro;
- Descontos nos valores do IPTU ou de outros impostos das residências que gerem energia de fontes sustentáveis.

Cabe ressaltar a necessidade de estudos mais aprofundados acerca do ciclo de vida dos componentes empregados no sistema fotovoltaico, principalmente quanto ao passivo de Emissão Evitada (tCO₂) Energia Gerada (MWh) resíduos ao final da sua vida útil, que de acordo com dados do fabricante são de 20 a 25 anos.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas. SIN - **Sistema interligado nacional**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/sar/sin>>. Acesso em: 20 out. 2022.

APPOLINÁRIO, Fábio. **Dicionário de metodologia científica**: um guia para a produção do conhecimento científico. In: Dicionário de metodologia científica: um guia para a produção do conhecimento científico. [S.l.: s.n.], 2007. p. 300–300.

BAIRD, Colin; CAMP, Michael. *Química ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2011.

BRASIL. Presidência da República – **Subchefia para Assuntos Jurídicos**. Decreto 2.556, de 20 de abr. de 1998. Regulamenta o registro previsto no art. 3 da Lei 9.609, de 19 de fev. de 1998, que dispõe sobre a proteção da propriedade intelectual de programa de computador, sua comercialização no País, e dá outras providências. Brasília, DF, 1998. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, n. 75, p. 177, 22 abr. 1998. Seção 1, pt1.

CETESB. **Gases do efeito estufa e fontes de emissão**. [S.l.], 2020. Disponível em:

<<https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>>. Acesso em: 21 ago. 2022.

CSR, Energia Solar. **Origem do sistema fotovoltaico conectado à rede**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.csrenergiasolar.com.br/blog/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede---sfcron-grid>>. Acesso em: 10 out. 2022.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário estatístico de energia elétrica**. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2022.

. BEN, balanço **energético nacional**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>. Acesso em: 20 ago. 2022.

FRANÇA, Evellyn Aryadne Costa et al. **Uso da geração fotovoltaica para viabilização de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Research, Society and Development, v. 10, n. 12, p. e583101220731–e583101220731, 2021.

FROTA, Evanise Batista; ASSUNÇÃO, Edja Maria Sales de. **Química ambiental**. 2. ed. Fortaleza: Editora da Universidade Estadual do Ceará – EdUECE, 2019.

HCC, Energia Solar. Inverno: afeta na geração de energia solar? [S.l.], 2022.

Disponível em: <<https://hccenergiasolar.com.br/inverno-afeta-na-geracao-de-energia-solar-entenda/#>>

~:text=%C3%89%20evidente%20que%20o%20comportamento,varia%20de%20regi%

C3%A3o%20por%20regi%C3%A3o.> Acesso em: 16 set. 2022.

JUNG, Carlos Fernando; ENG, M. Metodologia científica. Ênfase em pesquisa

tecnológica, v. 3, n. 41, p. 41, 2003.

LOPES, Davi Gabriel. **Análise de sistemas fotovoltaicos conectados à rede no âmbito do mecanismo de desenvolvimento limpo**: estudo de caso dos projetos da chamada no13 da aneel. Campinas, SP, 2013.

MOTTA, Ronaldo Seroa da et al. **Mudança do clima no brasil**: aspectos econômicos, sociais e regulatórios. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2011.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **SIN - O Sistema interligado nacional**. [S.l.], 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 20 out. 2022.

PILEGGI, Flávia Gonzaga; FILHO, Luiz Carlos Beduschi. **Análise crítica da contribuição dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo ao desenvolvimento sustentável**: estudo de caso do aterro do aurá, em belém-pa. 2013.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio et al. **Manual de engenharia**

para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, v. 1, p. 47–499, 2014.

Vol. 22, nº 1, (2023). Pág. 197 - 217

SOARES, Augusto Batista Alves. **Análise de geração de diferentes tecnologias de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** 2022.

UNFCCC, United Nations Framework Convention on Climate Change. **CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM** - Small-scale Methodology: AMSI. D -

Grid connected renewable electricity generation. Version no 18, nov. 2014. [S.l.], 2014a. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/W3TINZ7KKWCK7L8WTXFQQOFQQH4SBK>>. Acesso em: 17 out. 2022.

Methodological tool: **Tool to calculate the emission factor for an electricity system.**

Version 07.0, nov. 2014. [S.l.], 2014b. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/W3TINZ7KKWCK7L8WTXFQQOFQQH4SBK>>. Acesso em: 17 out. 2022.

WMO, World **Meteorological Organization**. WMO unified data policy. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10874>. Acesso em: 10 out. 2022.