

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Vinícius Hirassaki

**Emissões evitadas devido à hibridização da geração de energia elétrica em minirredes da
Amazônia através da agregação da energia solar fotovoltaica e de sistemas de
armazenamento de energia em baterias**

Florianópolis

2022

Vinícius Hirassaki

**Emissões evitadas devido à hibridização da geração de energia elétrica em minirredes da
Amazônia através da agregação da energia solar fotovoltaica e de sistemas de
armazenamento de energia em baterias**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof.^a Helena Flavia Napolini, Dr.^a Eng.^a.

Coorientador: Daniel Odilio dos Santos, Eng.^o Eletricista

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hirassaki, Vinícius

Emissões evitadas devido à hibridização da geração de energia elétrica em minirredes da Amazônia através da agregação da energia solar fotovoltaica e de sistemas de armazenamento de energia em baterias / Vinícius Hirassaki ; orientador, Helena Flavia Napolini, coorientador, Daniel Odilio dos Santos, 2022.

49 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, , Programa de Pós-Graduação em , Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. . 2. geração solar fotovoltaica. 3. armazenamento de energia. 4. sistemas isolados híbridos. 5. emissões evitadas. I. Napolini, Helena Flavia. II. Santos, Daniel Odilio dos. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em . IV. Título.

Vinicius Hirassaki

Emissões evitadas devido à hibridização da geração de energia elétrica em minirredes da Amazônia através da agregação da energia solar fotovoltaica e de sistemas de armazenamento de energia em baterias

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 02 de agosto de 2022.



Documento assinado digitalmente
Miguel Moreto
Data: 03/08/2022 11:31:41-0300
CPF: 948.850.100-63
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Miguel Moreto, Dr. Eng^o
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica



Documento assinado digitalmente
HELENA FLAVIA NASPOLINI
Data: 04/08/2022 10:08:34-0300
CPF: 289.588.109-04
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Helena Flavia Naspolini, Dr. Eng^a
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
DANIEL ODILIO DOS SANTOS
Data: 03/08/2022 10:57:24-0300
CPF: 085.374.339-85
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Daniel Odilio dos Santos, Eng.^o Eletricista
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof. Hans Helmut Zürn, Dr. Eng^o
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente
Gustavo Xavier de Andrade Pinto
Data: 02/08/2022 20:02:06-0300
CPF: 074.532.959-47
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Gustavo Xavier de Andrade Pinto, Eng.^o Eletricista, Me. Eng. Civil
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Priscila e Winston, aos meus avós, tios, primos e toda a minha família, cujo amor sempre me motivou a seguir em frente.

Em especial, dedico este trabalho à minha avó Yosiko Hirassaki, que infelizmente se foi pouco antes da apresentação deste trabalho, mas que sempre estará em meu coração como a fonte inacabável de amor e carinho que sempre foi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente à Prof^a Helena Flavia Napolini, não só pela orientação tanto neste trabalho quanto no ambiente de pesquisa em geral, mas também pela atenção, pela amizade, pela confiança e pelas oportunidades que sempre me proporcionou.

Ao meu coorientador, Daniel Odílio dos Santos, pelo apoio e pelo aconselhamento, não apenas durante este trabalho, mas também durante grande parte do meu curso de graduação.

Aos meus queridos amigos, que sempre foram meu alicerce, me apoiando nos momentos em que eu mais precisava e praticamente sendo uma segunda família para mim.

Agradeço também, aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, bem como aqueles de outros Departamentos da UFSC envolvidos na minha formação acadêmica, pelo compartilhamento do conhecimento tão essencial para a realização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões evitadas, expressas em toneladas de CO₂ equivalentes, proporcionadas pela hibridização de um sistema de geração composto por geradores à diesel através da inserção de um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias. Tal sistema, parte integrante dos Sistemas Isolados (SISOL), está localizado no distrito de Izidolândia – RO. Para avaliar o desempenho energético e a operação da rede híbrida, foram realizadas simulações via softwares PVSyst e HOMER Pro. Ainda através do software HOMER Pro, foi determinada a configuração do sistema híbrido que apresentou o menor custo nivelado de energia (LCOE). As emissões evitadas, proporcionadas pela geração fotovoltaica (FV), foram calculadas conforme prescrições da metodologia de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) AM0103. Foram realizadas simulações para períodos de projeto de 7, 10, 14 e 21 anos, períodos possíveis para creditação de projetos de MDL. Os resultados mostraram contribuição significativa da geração fotovoltaica com sistemas de armazenamento na redução das emissões de toneladas CO₂ equivalente.

Palavras-chave: geração solar fotovoltaica; armazenamento de energia; sistemas isolados híbridos; emissões evitadas.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the emission reduction, expressed in tons of CO₂ equivalent, provided by the hybridization of a generation system composed by diesel generators through the insertion of a photovoltaic system with battery energy storage. This hybrid system, part of the Isolated Systems (SISOL), is located in the district of Izidolândia - RO. To evaluate the energy performance and operation of the hybrid network, simulations were performed using PVSyst and HOMER Pro softwares. Still using the HOMER Pro software, the configuration of the hybrid system that presented the lowest levelized cost of energy (LCOE) was determined. The emission reduction provided by the photovoltaic (PV) generation was calculated according to the directives of the Clean Development Mechanism (CDM) methodology AM0103. Simulations were performed for project periods of 7, 10, 14 and 21 years, possible crediting periods for CDM projects. Results have shown that photovoltaic generation with energy storage systems contribute significantly in reducing the emissions of tons of CO₂ equivalent.

Keywords: solar photovoltaic generation; energy storage; hybrid isolated grids; emission reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Irradiação global horizontal média diária no Brasil.....	17
Figura 2 – Emissões de CO ₂ por setor e cenário	19
Figura 3 – Evolução da capacidade instalada de geração solar no mundo.....	19
Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de geração solar no Brasil	20
Figura 5 – Evolução da geração solar em microgeração e minigeração distribuídas no Brasil.....	21
Figura 6 – Instalação de sistemas de armazenamento de energia em baterias por ano e país.....	23
Figura 7 – Exemplo de <i>clipping</i> considerando um fator de carregamento do inversor de 1,4	24
Figura 8 – Mapa das localidades de sistemas isolados no Brasil	25
Figura 9 – Contribuição percentual no consumo por classe em 2020.....	26
Figura 10 – Usina termelétrica BK Energia Itacoatiara	27
Figura 11 – Localização de Izidolândia	29
Figura 12 – Demanda e consumo do SISOL.....	30
Figura 13 – Diagrama unifilar de Izidolândia	30
Figura 14 – Mapa de calor da demanda de Izidolândia em base horária.	31
Figura 15 –Emissão evitada total e médias anuais de emissões evitadas para cada período de projeto.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema de armazenamento	32
Tabela 2 – Dados de irradiação da localidade de Izidolândia	33
Tabela 3 – Parâmetros relacionados às perdas do sistema de geração fotovoltaica...	39
Tabela 4 –Potência fotovoltaica instalada, capacidade do SAEB, geração média anual diesel, geração média anual fotovoltaica, investimento inicial e LCOE	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	–	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
APS	–	<i>Announced Pledges Scenario</i>
C.A	–	Corrente Alternada
C.C	–	Corrente Contínua
EPE	–	Empresa de Pesquisa Energética
FCI	–	Fator de Carregamento do Inversor
FV	–	Solar Fotovoltaica
GEE	–	Gases de Efeito Estufa
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	–	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEA	–	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	–	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MDL	–	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NREL	–	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
NZE	–	<i>Net Zero Emissions</i>
ONS	–	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PIB	–	Produto Interno Bruto
SAEB	–	Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias
SEEG	–	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIN	–	Sistema Interligado Nacional
SISOL	–	Sistemas Isolados
STEPS	–	<i>Stated Policies Scenario</i>
tCO ₂	–	Toneladas de CO ₂
UNFCCC	–	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	RECURSO SOLAR.....	17
2.2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	21
2.3	SISTEMAS HÍBRIDOS	23
2.4	SISTEMAS ISOLADOS	25
3	METODOLOGIA.....	29
3.1	ESCOLHA DA LOCALIDADE PARA ESTUDO DE CASO	29
3.2	GERADORES A DIESEL.....	31
3.3	SISTEMA DE ARMAZENAMENTO	32
3.4	SISTEMA FOTOVOLTAICO	32
3.5	POLÍTICA DE DESPACHO.....	33
3.6	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	33
3.7	AVALIAÇÃO FINANCEIRA	34
3.8	EMISSÕES EVITADAS	35
4	RESULTADOS	39
4.1	GERAÇÃO À DIESEL, GERAÇÃO FV, PRODUTIVIDADE E LCOE	39
4.2	FATOR DE EMISSÃO DA REDE	41
4.3	EMISSÕES EVITADAS	41
5	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há um grande interesse em fontes renováveis de energia elétrica devido ao seu baixo impacto ambiental em comparação com o das fontes convencionais. Neste sentido, as pesquisas na área de geração renovável de energia são de suma importância, trazendo mais informações e estimulando o desenvolvimento destas tecnologias. De acordo com o relatório de 2021 do Painel Intergovernamental para a Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) sobre mudanças climáticas, um aquecimento global de 1,5°C a 2°C em relação aos anos de 1850-1900 será alcançado durante o século 21, a menos que ocorra uma redução significativa nas emissões de gases de efeito (GEE) estufa nas próximas décadas (IPCC, 2021). O relatório também enfatiza que diversas mudanças climáticas se agravam proporcionalmente ao aquecimento global, como aumentos na frequência e intensidade de calores extremos, ondas de calor marítimas, chuvas fortes, secas e ciclones, dependendo da localidade (IPCC, 2021).

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2020, o Brasil foi responsável por emitir cerca de 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, dos quais aproximadamente 46,2 milhões de toneladas foram provenientes da geração de energia elétrica (POTENZA et al, 2021). Este valor, relativamente pequeno, se deve ao fato de a matriz elétrica do Brasil ser composta majoritariamente de hidrelétricas, que constituíram cerca de 65,2% de toda a geração de eletricidade em 2020 (EPE, 2021b).

Entretanto, pelo fato de o Brasil ser um país de proporções continentais, suas características geográficas proporcionam desafios para a conexão ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Consequentemente, o Brasil possui uma série de sistemas isolados, denominados SISOL, instalados predominantemente na região norte (EPE, 2021e). Estes sistemas isolados, também denominados minirredes isoladas, utilizam termoelétricas a diesel como principal fonte de geração energia elétrica, pois esses sistemas têm baixo custo inicial de implantação e facilidade logística de transporte de combustível, além do domínio tecnológico do setor elétrico sobre essa fonte.

A combustão de óleo diesel para a geração de energia elétrica tem um grande impacto ambiental devido à emissão de gases de efeito estufa. Desta forma, a busca por fontes renováveis de energia para os sistemas isolados se torna importante não só para o setor elétrico. Tendo em vista o enorme potencial solar do território brasileiro, bem como a considerável queda dos custos de instalações fotovoltaicas nos últimos anos, supõe-se que a geração solar

fotovoltaica (FV) possa ser uma boa opção para esta problemática (PEREIRA et al., 2017; GREENER, 2022).

Contudo, a inserção de geração solar fotovoltaica em minirredes é complexa, pois esta fonte energética é intermitente e, conseqüentemente, não despachável, ou seja, não há controle sobre a disponibilidade imediata da energia gerada. Desta forma, em sistemas com geração a diesel e geração fotovoltaica é necessário algum tipo de controle para a coordenação da geração intermitente e do sistema termoeletrico. Para realizar esse controle, um sistema de armazenamento pode ser utilizado de modo a atenuar quaisquer oscilações de potência, sejam estas provenientes de variações de demanda ou da geração fotovoltaica.

O uso de fontes renováveis em sistemas isolados visando a redução das emissões de gases de efeito estufa é um tema já abordado em outros trabalhos. Em 2019, Piernagorda desenvolveu um estudo sobre os impactos que a inserção de geração fotovoltaica, eólica e armazenamento de energia poderiam ter sobre sistemas isolados e na alimentação de embarcações, calculando as emissões evitadas para cada cenário de penetração (PIERNAGORDA, 2019). Em 2016, Santos e Blanco realizaram uma análise das emissões evitadas a partir da instalação de geração hidrelétrica em uma pequena comunidade de Santarém, PA, também utilizando de metodologias de MDL para fazê-lo (SANTOS; BLANCO, 2016).

Em resumo, o fornecimento de energia elétrica em sistemas isolados de forma tradicional, além de ter altos custos de operação e manutenção, é extremamente dependente de fontes de energia não renováveis e não disponíveis no ponto de consumo. (PINHO et al., 2008; SOARES, 2008; ELETROBRAS, 2014; HIGUERA, 2017).

Visando reduzir o consumo de diesel para gerar energia elétrica em sistemas isolados, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) começou a adotar políticas de incentivo à implementação de soluções alternativas para a oferta de energia nestes sistemas, nos últimos anos. Paralelamente, os custos de equipamentos fotovoltaicos sofreram uma redução expressiva na última década, devido a incentivos governamentais, à produção em larga escala e a inovações tecnológicas na área. (BHATTACHARYYA; PALIT, 2016; KAVLAK, 2018; GOLDIE-SCOT, 2019). Espera-se também que, na próxima década, sistemas de armazenamento de energia em baterias também sofram redução expressiva em seus custos.

Desta forma, estima-se que ações de desenvolvimento sustentável no sistema elétrico destas localidades tenham um potencial significativo de reduzir a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Neste trabalho, avalia-se o desempenho, a viabilidade técnica, a atratividade financeira e as emissões evitadas de uma rede híbrida composta por geração FV, gerador a diesel e armazenamento de energia em baterias. Todos os cálculos realizados para estimar o valor de emissões evitadas foram baseados em metodologias de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), aprovadas pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), visto o prestígio do órgão e a vasta utilização destas metodologias em todo o mundo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões evitadas, expressas em toneladas de CO₂ equivalentes, proporcionadas pela hibridização de um sistema de geração à diesel integrante do SISOL, localizado no distrito de Izidolândia – RO, através da inserção de um sistema fotovoltaico com sistema de armazenamento de energia em baterias (SAEB). As emissões evitadas proporcionadas pela agregação da geração fotovoltaica, foram calculadas conforme prescrições da metodologia de MDL AM0103.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Selecionar uma localidade integrante do SISOL como objeto do presente estudo;
- Determinar, através de simulações computacionais para diferentes horizontes temporais, as configurações do sistema fotovoltaico e do SAEB que resultem no menor LCOE;
- Identificar uma metodologia de MDL para calcular as emissões evitadas proporcionadas pela agregação da energia solar FV ao sistema híbrido analisado neste trabalho;

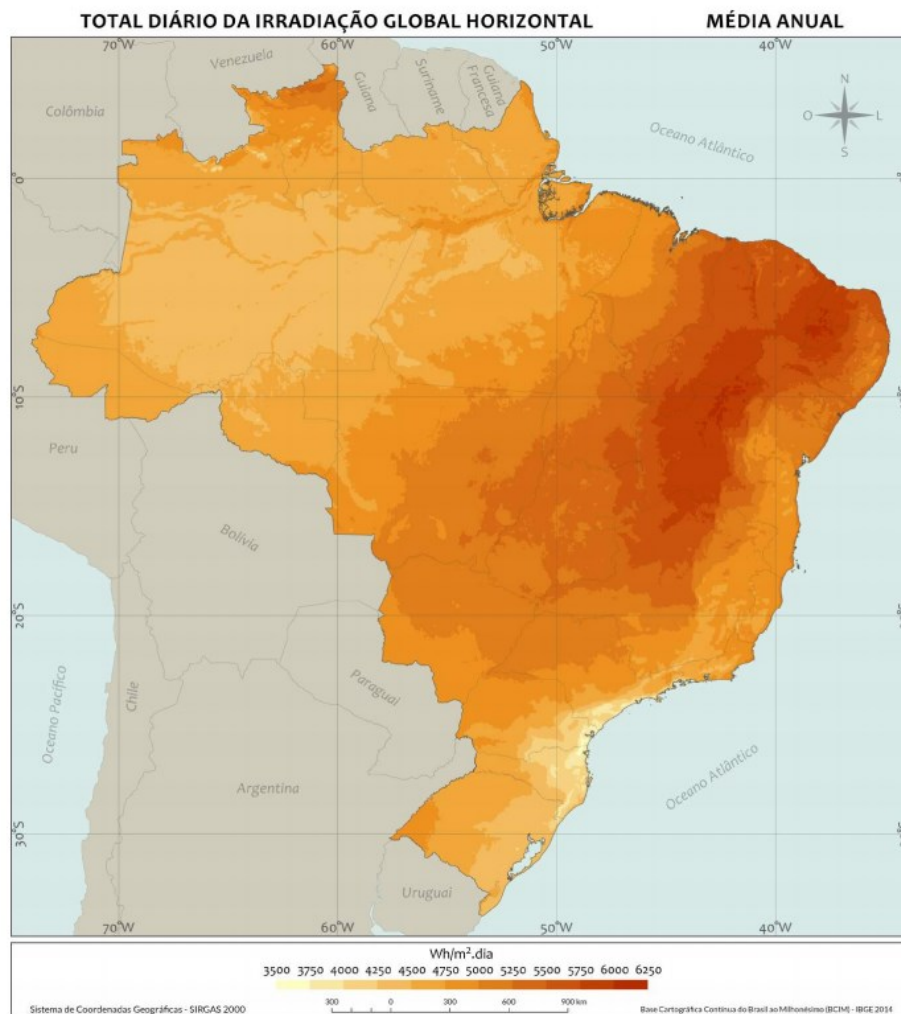
- Analisar os resultados das simulações realizadas, visando compreender melhor os benefícios que tais instalações poderiam trazer e incentivar o uso destas fontes renováveis no SISOL.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECURSO SOLAR

O Brasil possui extensa área territorial e variedade bioclimática, suas regiões apresentam diferentes condições climáticas. Tendo em vista que a maior parte dos sistemas isolados se encontra na região norte do Brasil, o recurso solar da região amazônica foi avaliado a partir da análise dos bancos de dados de irradiação. Como pode ser visto na Figura 1, oriunda da segunda edição do Atlas Solar Brasileiro (PEREIRA et al., 2017), o Brasil tem um enorme potencial de geração de energia solar, com irradiação global horizontal média diária anual de cerca de 4,6 kWh/m²/dia na região Norte do país.

Figura 1 – Irradiação global horizontal média diária no Brasil

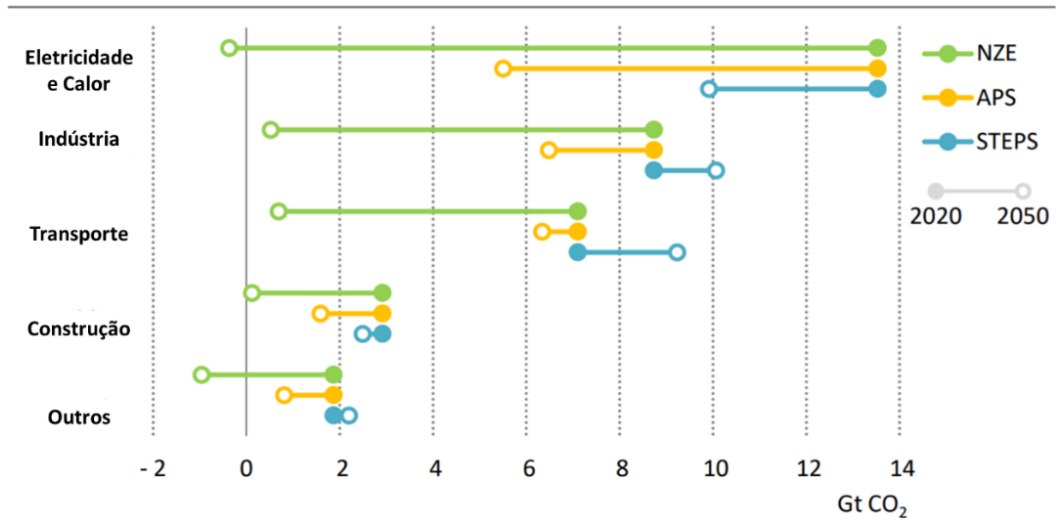


Fonte: PEREIRA et al., 2017.

Além do recurso abundante, a facilidade de instalação e a baixa manutenção requerida pelos sistemas de geração solar fotovoltaica, devido à ausência de partes móveis e ao pequeno porte dos módulos e inversores, fazem desta uma tecnologia bastante atraente para a região Norte do país. Segundo o Panorama Energético Mundial 2021 (*World Energy Outlook 2021*) da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency – IEA*), em 2020, as fontes renováveis foram responsáveis por suprir cerca de 28% da demanda mundial, graças a um aumento recorde destas fontes somado a um declínio do consumo mundial devido à pandemia de COVID-19 (IEA, 2021c). Ainda de acordo com a agência, as gerações eólicas e solar fotovoltaica representam a alternativa mais barata para novas fontes de eletricidade (IEA, 2021c).

Ainda no mesmo documento, a IEA apresenta três cenários de medidas para a mitigação do aquecimento global: o cenário de zero emissões líquidas (*Net Zero Emissions – NZE*), cenário mais otimista em que o investimento em tecnologias sustentáveis leva o mundo a um balanço de emissões nulo até 2050; o cenário referente aos compromettimentos anunciados (*Announced Pledges Scenario – APS*), cenário considerado moderado em que todos os compromettimentos feitos pelas nações em relação à redução de emissões são cumpridos; e o cenário das políticas declaradas (*Stated Policies Scenario – STEPS*), cenário mais conservador em que apenas as políticas já declaradas pelas nações serão cumpridas. Em todos os cenários, a IEA enfatiza a importância da eletrificação de diversos setores e demonstra como a redução de emissões de gases de efeito estufa pelos setores de eletricidade e calor representa uma grande contribuição para o controle do aquecimento global, principalmente para o cenário NZE, conforme é mostrado na Figura 2 (IEA, 2021c).

Figura 2 – Emissões de CO₂ por setor e cenário

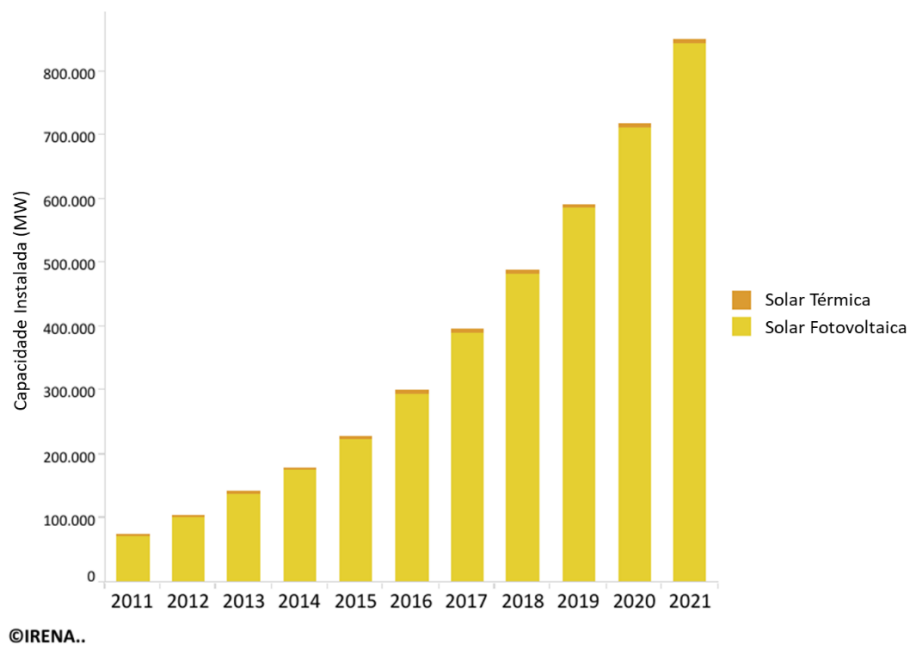


Fonte: Adaptado de IEA, 2021c

De acordo com a Revisão Estatística da Energia Mundial 2021 (*Statistical Review of World Energy 2021*) da BP, a geração solar fotovoltaica apresentou um recorde de crescimento em 2020, com crescimento anual de 20%, referente a um aumento de 148 TWh de geração (BP, 2021).

A Figura 3 apresenta a evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo.

Figura 3 – Evolução da capacidade instalada de geração solar no mundo

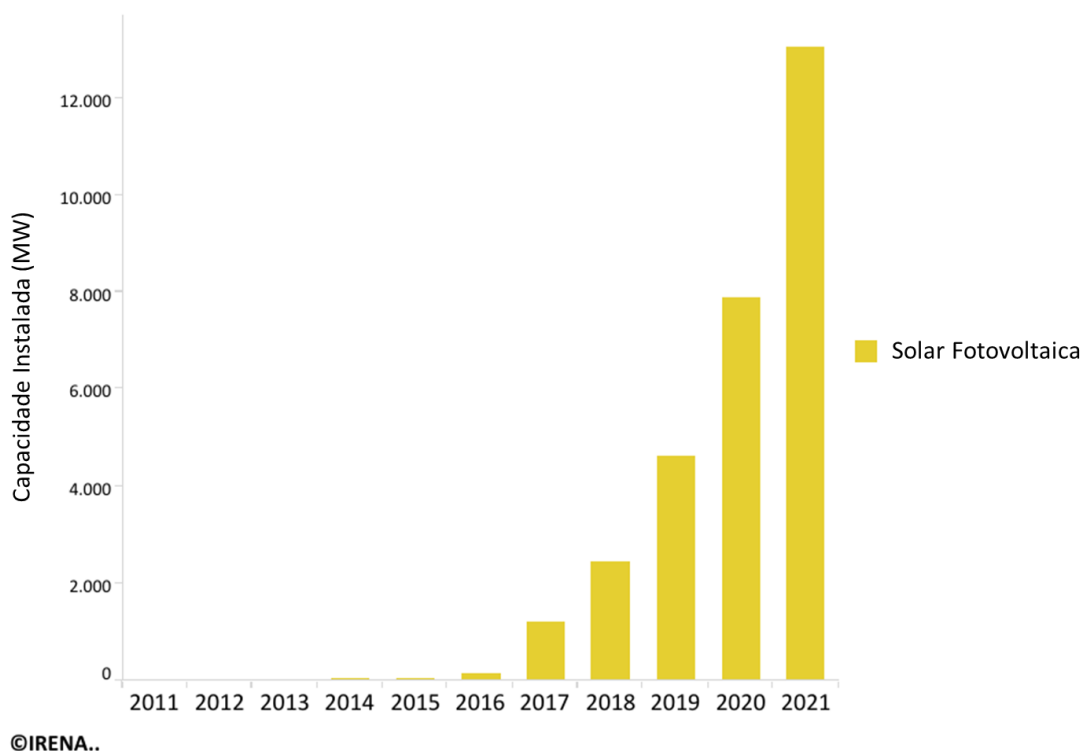


Fonte: Adaptado de IRENA, 2022

Nota-se que esta tecnologia apresentou crescimento acelerado nesta última década, e se mostra promissora para a geração de energia limpa no futuro. Entretanto, segundo Victoria et al. (2021), muitos modelos de avaliação integrada, ferramentas utilizadas por entidades como o IPCC para desenvolver diferentes cenários para o futuro, não consideram o crescimento da geração solar de forma adequada e acabam por subestimar as suas contribuições. Visto que as análises destes cenários afetam diretamente as decisões tomadas pelos *policymakers* (gestores e coordenadores), é imprescindível que haja maior desenvolvimento de conhecimento na área.

No Brasil, na última década, a tendência de crescimento da geração fotovoltaica também foi expressiva, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de geração solar no Brasil



Fonte: Adaptado de IRENA, 2022

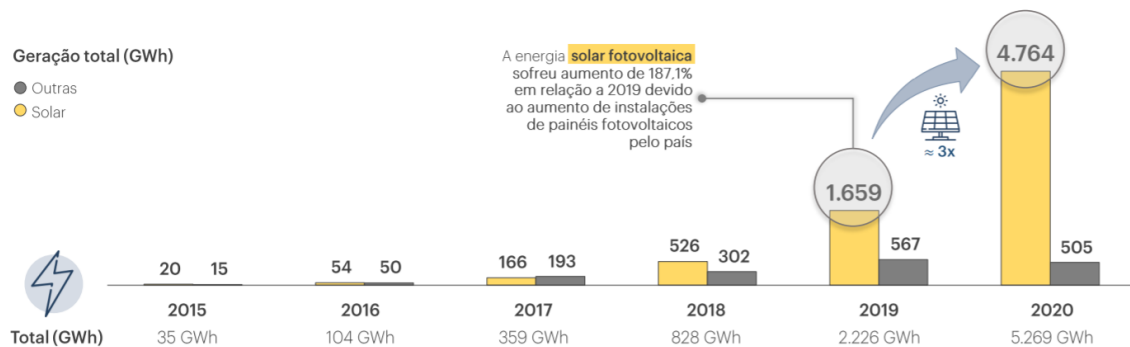
Diferentemente das tendências observadas mundialmente, a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no Brasil se mostrou bastante baixa até o ano de 2016, e apresentou um grande crescimento desde então,

aumentando em cerca de 70,8% de 2019 para 2020 e em 65,7% de 2020 para 2021 (IRENA, 2022).

A emergência da geração solar fotovoltaica no Brasil em 2013 coincide com a publicação da Resolução Normativa 482 da ANEEL em 2012 (ANEEL, 2012), na qual as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de eletricidade, bem como para o sistema de compensação de energia elétrica, foram estabelecidas. Desde então, a geração solar fotovoltaica nas modalidades de microgeração e minigeração distribuídas têm crescido significativamente, como mostra a Figura 5.

Em 2019, a geração solar fotovoltaica em microgeração e minigeração distribuídas no Brasil era responsável pela produção de 1.659 GWh de energia. Em 2020, este número aumentou em aproximadamente 187,1%, fazendo com que a geração fotovoltaica constituísse mais de 90% da geração de energia em microgeração e minigeração distribuídas (EPE, 2021b).

Figura 5 – Evolução da geração solar em microgeração e minigeração distribuídas no Brasil



Fonte: EPE, 2021b.

2.2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Atualmente, existem diversas tecnologias voltadas para o armazenamento de energia para uso posterior, cada uma com diferentes características e propriedades que definem suas melhores aplicações e restrições de uso. Os princípios de funcionamento das tecnologias mais utilizadas são de natureza mecânica, térmica, química, eletroquímica e elétrica (WORLD ENERGY COUNCIL, 2020).

As tecnologias de armazenamento de natureza mecânica armazenam energia na forma cinética, como no caso dos *Flywheels*, ou potencial, como no caso do bombeamento de água e do ar comprimido (Ibid., 2020).

As tecnologias de natureza térmica, por sua vez, armazenam a energia na forma de calor. No caso do armazenamento por sal fundido, este calor geralmente é proveniente da luz solar, que é concentrada por meio de superfícies refletoras (Ibid., 2020).

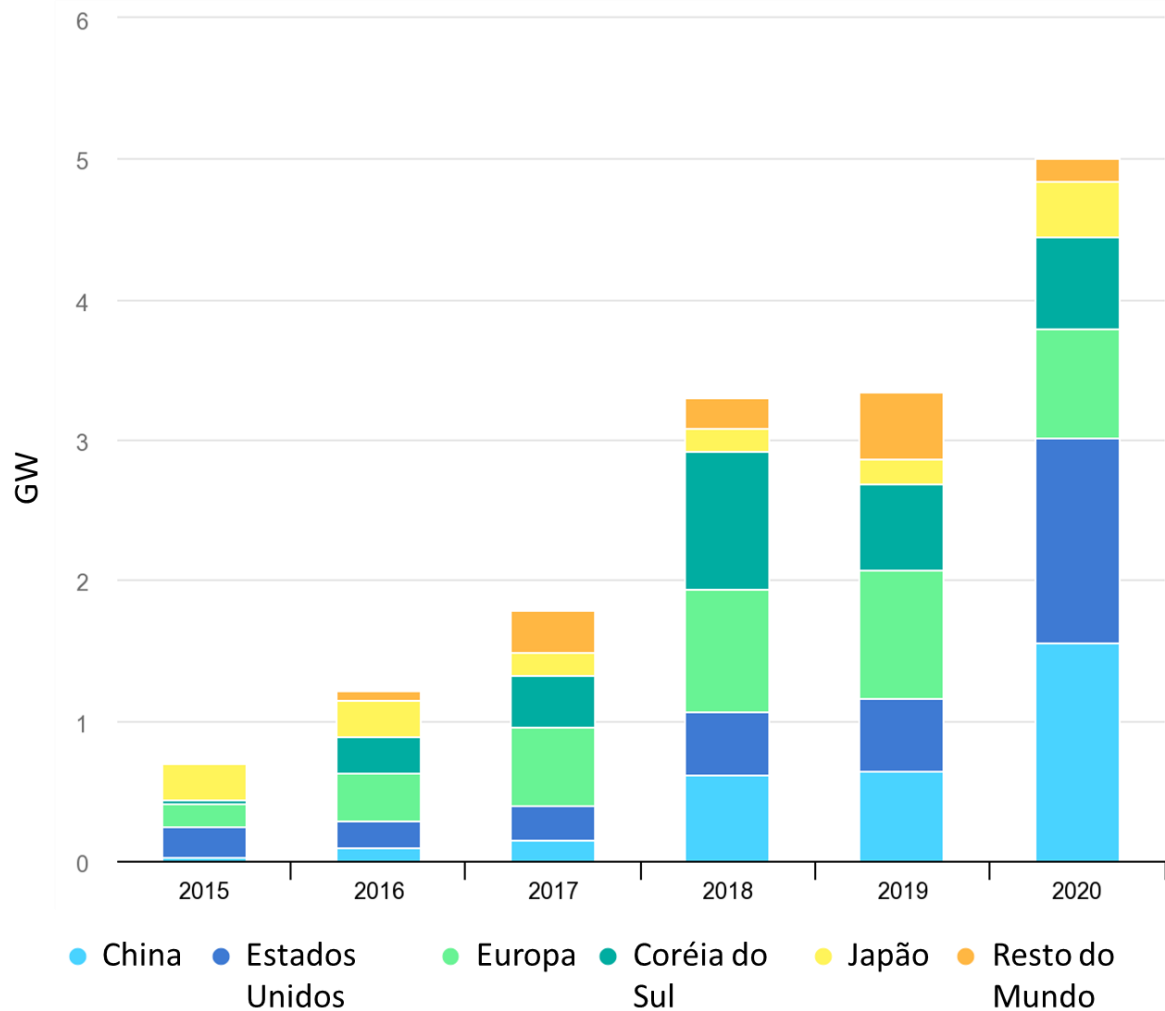
No caso das tecnologias de natureza química, a energia é utilizada para formar compostos químicos que podem ser usados posteriormente como combustíveis. A forma mais atrativa deste tipo de armazenamento é a produção de hidrogênio através da hidrólise da água, que pode ser usado como combustível em máquinas ou para a geração de eletricidade através de células combustíveis (Ibid., 2020).

As tecnologias de natureza eletroquímica também armazenam a energia quimicamente, mas não produzem combustíveis, diferentemente das tecnologias de natureza química. Esta forma de armazenamento é uma das mais convencionais, uma vez que engloba a maioria das baterias utilizadas atualmente, em especial as de íons de lítio (Ibid., 2020).

Por fim, as tecnologias de natureza elétrica armazenam energia na forma de campo elétrico ou campo magnético. Como esta forma de armazenamento não envolve reações químicas ou processos termodinâmicos, a carga e a descarga destas tecnologias podem ocorrer de forma mais rápida, como acontece com os supercapacitores (Ibid., 2020).

Segundo a IEA (2021a), investimentos em sistemas de armazenamento por baterias aumentaram em cerca de 40% em 2020, para um total de aproximadamente 5,5 bilhões de dólares. No mesmo ano, a instalação de capacidade total foi de 17 GW, após um recorde de crescimento de 5 GW instalados entre 2019 e 2020 (IEA, 2021a), conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Instalação de sistemas de armazenamento de energia em baterias por ano e país



Fonte: Adaptado de IEA, 2021a

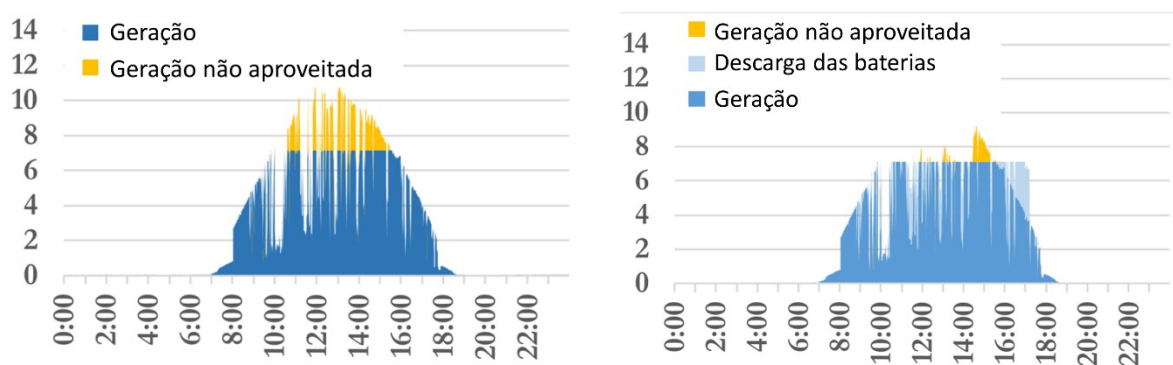
Ainda de acordo com a IEA (2021b), é previsto que a capacidade instalada global de sistemas de armazenamento por bombeamento de água, concentração solar e arranjos de larga escala de baterias cresça em cerca de 56% nos próximos anos, chegando a 270 GW em 2026.

2.3 SISTEMAS HÍBRIDOS

Segundo Gorman et al. (2020), a intermitência associada a certas fontes renováveis de energia, em especial a solar e a eólica, poderia ser remediada a partir da introdução de

armazenamento de energia na rede elétrica. Entretanto, há um interesse crescente em projetos de sistemas híbridos, ou seja, que acomodam a geração e o armazenamento no mesmo local, devido à possível redução de custos em relação a projetos separados de geração e armazenamento, bem como à sinergia apresentada por certas tecnologias (Ibid., 2020). Por exemplo, sistemas de armazenamento podem ajudar a reduzir o desgaste de geradores térmicos proveniente dos seus ciclos de funcionamento (Ibid, 2020). Em conjunto com a geração solar fotovoltaica, sistemas de armazenamento podem aumentar a eficiência da geração quando há sobredimensionamento do inversor, aproveitando a energia que seria desperdiçada devido ao *clipping*, isto é, ao limite de potência do inversor, conforme mostra a Figura 7.(NC STATE ENERGY STORAGE TEAM, 2019).

Figura 7 – Exemplo de *clipping* considerando um fator de carregamento do inversor de 1,4



Fonte: Adaptado de NC State Energy Storage Team, 2019

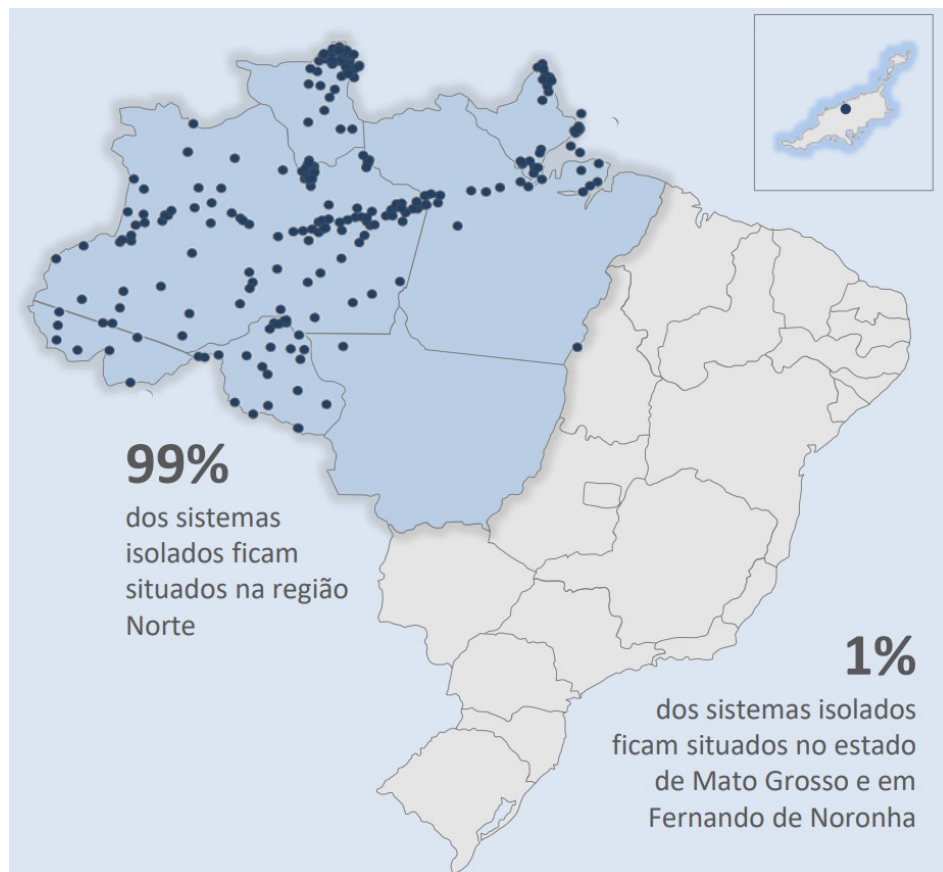
Neste sistema de exemplo, o uso da bateria em conjunto com o sistema fotovoltaico foi responsável por reduzir os efeitos de *clipping* em 80% e aumentar a parcela de tempo em que o projeto opera com produção máxima de 29% para 47%, demonstrando o potencial de sistemas híbridos com geração solar e baterias (NC STATE ENERGY STORAGE TEAM, 2019).

De acordo com Bolinger et al. (2021), estima-se que havia 73 projetos híbridos de geração solar e armazenamento nos Estados Unidos em 2020, com um total de 992 MW de capacidade instalada, 250 MW de capacidade de armazenamento e 650 MWh de armazenamento de energia, sendo o tipo de projeto híbrido mais numeroso nos EUA.

2.4 SISTEMAS ISOLADOS

No Brasil, a maioria das unidades consumidoras é conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), que é controlado e coordenado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e possui cerca de 145.600 km de extensão (ONS, 2022). No entanto, certas localidades não são conectadas ao SIN devido a limitações econômicas, geográficas e técnicas. Essas localidades são supridas por sistemas locais, chamados de sistemas isolados. Em 2020, havia um total de 263 destes sistemas, que se localizam predominantemente na região norte (EPE, 2021e), conforme mostra o mapa apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Mapa das localidades de sistemas isolados no Brasil

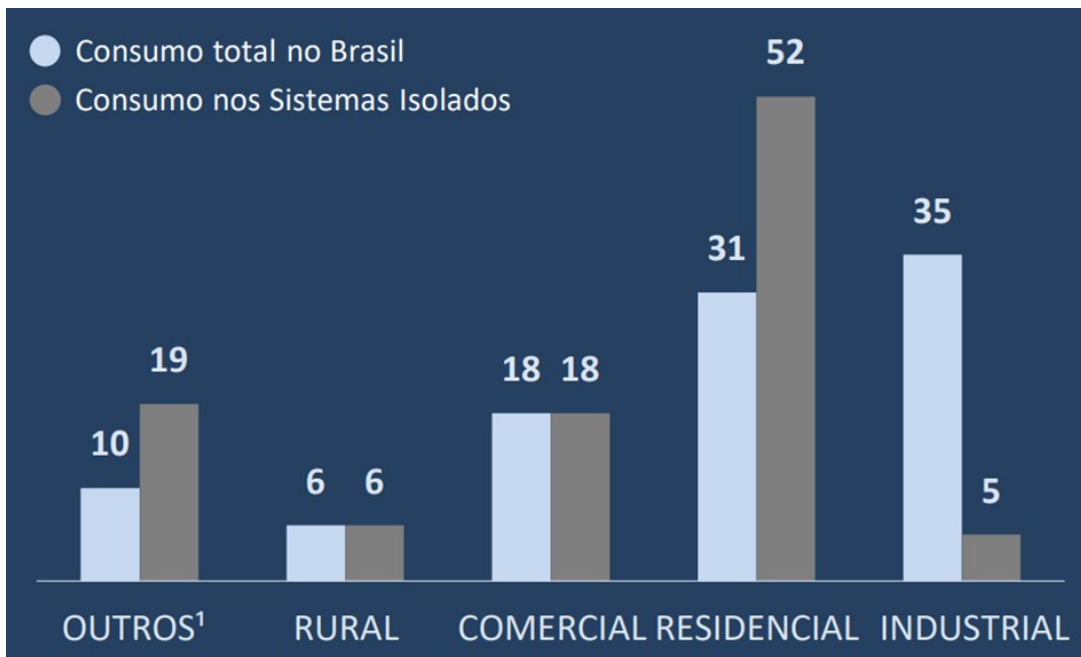


Fonte: EPE, 2021e.

No SISOL a maior parte do consumo é proveniente de unidades consumidoras residenciais, com apenas uma pequena parcela sendo atribuída ao setor industrial (EPE, 2021e).

O gráfico da Figura 9 mostra a contribuição percentual do consumo de cada classe de consumidores para os sistemas isolados e o SIN.

Figura 9 – Contribuição percentual no consumo por classe em 2020



Fonte: EPE, 2021e.

Estima-se que os sistemas isolados tenham coletivamente consumido um total de 2.947 GWh de energia, equivalente a apenas 0,624% do consumo de energia atendido pelo SIN (EPE, 2021e).

Entretanto estima-se que a as emissões de gases de efeito estufa dos sistemas isolados tenham totalizado 2,6 milhões de toneladas de CO₂, equivalente a cerca de 8,667% das emissões provenientes do SIN (EPE, 2021a). Esta discrepância entre energia gerada e emissões de gases de efeito estufa se deve ao fato de os sistemas isolados utilizarem predominantemente geração térmica a diesel em sua matriz energética. Em 2020, cerca de 96% da geração total nos sistemas isolados foi constituída de geradores a diesel ou óleo combustível (EPE, 2020), com um consumo previsto de aproximadamente 504.678 m³ destes combustíveis (ONS, 2019).

Neste sentido, fica evidente que sistemas isolados possuem um grande potencial para a redução de emissões de gases de efeito estufa e, atualmente, existem alguns projetos e medidas

que exploram este potencial. A usina termelétrica BK Energia Itacoatiara, mostrada na Figura 10, utiliza como combustível biomassa de resíduos de madeira provenientes da atividade madeireira certificada da cidade de Itacoatiara-AM, gerando energia renovável para o sistema elétrico da cidade e evitando que os resíduos de madeira entrem em decomposição e emitam gás metano (CH_4), outro gás de efeito estufa (BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA, 2017).

Figura 10 – Usina termelétrica BK Energia Itacoatiara



Fonte: BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA, 2017.

A usina, que forneceu cerca de 48.980 MWh de energia para o sistema da cidade de Itacoatiara em 2020, foi objeto de estudo de um projeto de MDL (BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA, 2021). Neste projeto, que foi registrado na UNFCCC em 2006 e ainda está em vigor, estima-se que a emissão de cerca de 40.776 toneladas de CO_2 equivalente (tCO_2eq) tenham sido evitadas em 2020, dos quais 38.057 tCO_2eq foram provenientes apenas da geração de eletricidade (BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA, 2021).

Outros exemplos de fontes renováveis de energia em sistemas isolados são a usina hidrelétrica de Alto do Jatapu, que atende ao sistema isolado de São João da Baliza - RR e estava prevista para gerar 37.364 MWh de energia em 2020 (ONS, 2019), a usina fotovoltaica de Oiapoque-AP, que conta com uma potência instalada de 3,6 MWp (EPE, 2021f), e quatro usinas a gás natural no estado do Amazonas, que estavam previstas para gerar um total de 61.870 MWh de energia em 2020 (ONS, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 ESCOLHA DA LOCALIDADE PARA ESTUDO DE CASO

Para a determinação da localidade estudada neste trabalho, foi avaliada a disponibilidade dos dados de recursos elétricos e energéticos necessários para as simulações e a representatividade da comunidade escolhida nos outros sistemas no SISOL através de uma análise estatística.

As curvas de consumo energético anuais de algumas localidades foram disponibilizadas no Leilão de Energia para os Sistemas Isolados de 2021 (EPE, 2020). Foi escolhido o distrito de Izidolândia, que faz parte de Alta Floresta D'Oeste-RO, município com pouco menos que 24.400 habitantes (de acordo com o último censo do IBGE), com PIB per capita de R\$ 21.600,73 e IDHM de 0,641 (IBGE, 2010, 2019). O distrito se encontra na parte sul do município de Alta Floresta D'Oeste, conforme mostra o mapa da Figura 11 .

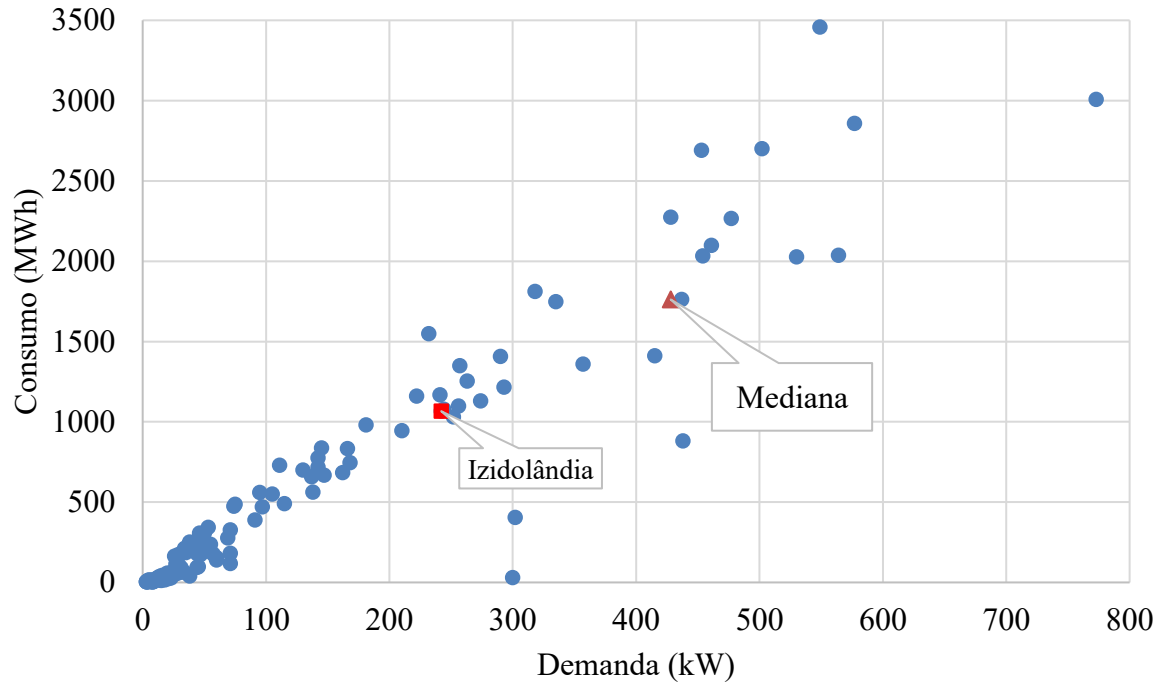
Figura 11 – Localização de Izidolândia



Fonte: Google, 2022.

Segundo o Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2024 – Ciclo 2019 (EPE, 2019), em 2019 o SISOL apresentou um consumo médio de 11.826 MWh, consumo mediano de 1.762 MWh, demanda média de 2.278,71 kW e demanda mediana de 428 kW. A Figura 12 apresenta o consumo e a demanda das localidades do SISOL para o ano de 2019.

Figura 12 – Demanda e consumo do SISOL.

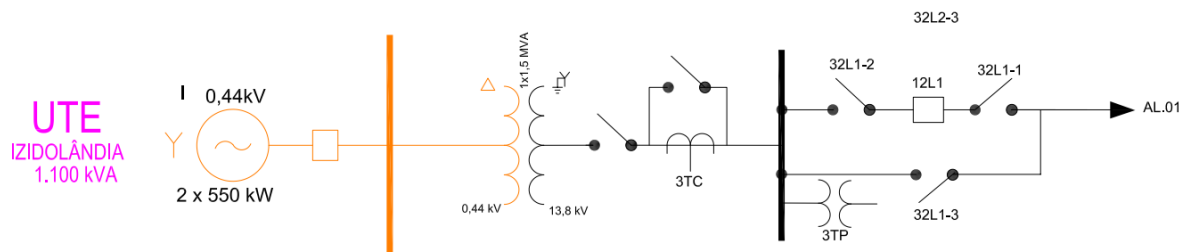


Fonte: Adaptado de EPE, 2019.

Analisando as localidades cujas informações de consumo estão disponíveis em domínio público, concluiu-se que a localidade de Izidolândia é adequada para representar estatisticamente os sistemas do SISOL, apresentando consumo de 1.066 MWh e demanda de 242 kW em 2019 (EPE, 2019).

Segundo o Leilão dos Sistemas Isolados de 2021 (EPE, 2020), a cidade de Izidolândia é suprida por apenas uma unidade geradora termelétrica, denominada UTE Izidolândia, conforme mostra a Figura 13.

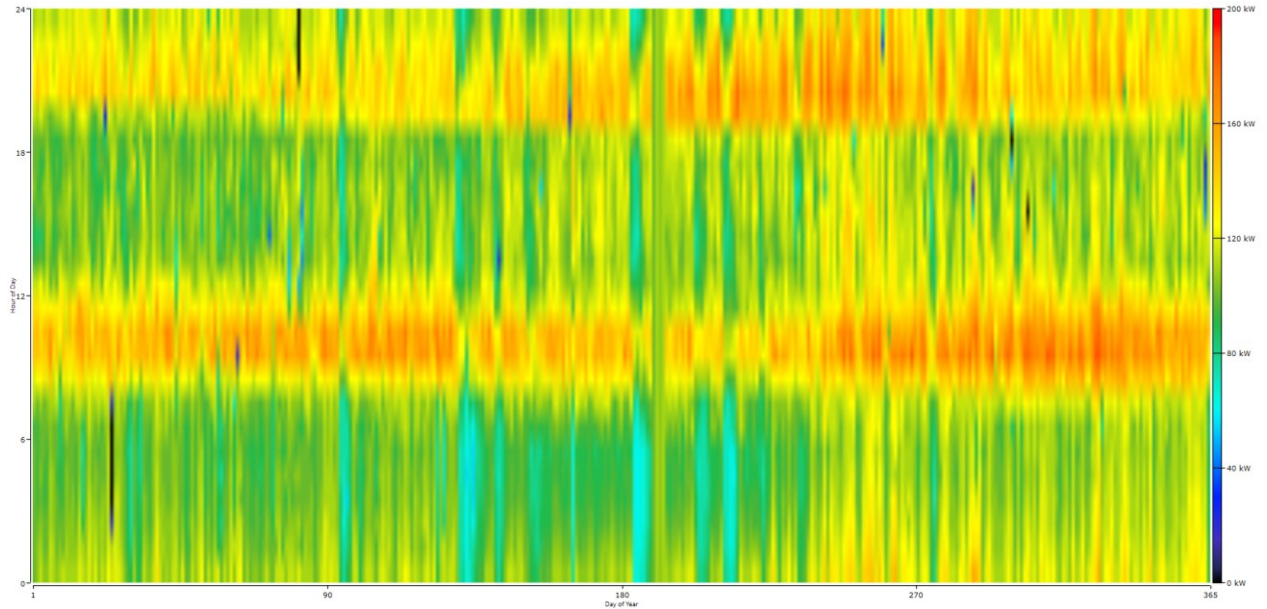
Figura 13 – Diagrama unifilar de Izidolândia



Fonte: EPE (2020).

A Figura 14 mostra o mapa de calor da demanda do distrito de Izidolândia em base horária.

Figura 14 – Mapa de calor da demanda de Izidolândia em base horária.



Fonte: Adaptado de EPE (2020).

3.2 GERADORES A DIESEL

Para esse estudo, a premissa utilizada nas simulações consiste de uma usina termoelétrica com dois geradores a diesel. O despacho dos geradores a diesel é feito de tal forma que cada gerador busque um ponto de operação acima de 30% de sua potência nominal. Nas simulações realizadas, os geradores a diesel foram utilizados para atender à demanda da localidade já compensada pela geração fotovoltaica, de modo que os dois geradores só estariam em operação simultaneamente se a capacidade de apenas um gerador não fosse suficiente para atender à demanda.

Neste estudo, considerou-se um consumo nominal de 329 litros/MWh de óleo diesel por gerador (EPE, 2021c). Cada gerador possui uma potência nominal de 168,75 kW e seus consumos específicos variam linearmente em função do carregamento, de 0 a 55,52 litros/h para carregamentos de 0% e 100% respectivamente.

3.3 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

Visando analisar a implementação gradual do sistema de armazenamento de energia no sistema híbrido, foi considerado um sistema de armazenamento de energia formado por blocos de baterias de íons de lítio de potência máxima de 300 kW e capacidade de armazenamento de 100 kWh, equivalente a aproximadamente 2,5% da energia consumida pela localidade no dia com maior carga registrada, no período analisado (4,064 MWh). A Tabela 1 apresenta os parâmetros do sistema de armazenamento considerado nas simulações.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema de armazenamento

Parâmetro	Valor
Máxima Profundidade de Descarga	90%
Eficiência Global do Sistema de Armazenamento	89%

Fonte: Adaptado de EPE, 2021c.

3.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Visando analisar a inserção gradual da geração fotovoltaica no sistema estudado, similarmente ao sistema de armazenamento de energia em baterias, considerou-se que o sistema de geração solar fotovoltaica foi composto por blocos de 6,6 kWp de potência. O sistema fotovoltaico é constituído de módulos monofaciais de silício monocristalino com potência individual de 440 Wp e eficiência de 22,17%, orientados ao norte com inclinação de 10°.

O dimensionamento do inversor foi feito de acordo com a soma da potência de todos os blocos considerados por simulação, utilizando um fator de carregamento (FCI), resultado da razão entre a potência de pico C.C da usina fotovoltaica e a potência nominal C.A. dos inversores, de 120%.

Para a simulação do perfil de geração anual FV, foram utilizados dados de irradiação global horizontal e de irradiação difusa da localidade de Izidolândia provenientes da segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al., 2017), mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de irradiação da localidade de Izidolândia

Dado	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Irr. Global Horizontal	4,579	4,46	4,506	4,511	4,005	4,236	4,483	4,944	4,872	5,051	5,085	4,864
Irr. Difusa	2,553	2,55	2,343	1,976	1,734	1,486	1,479	1,786	2,1	2,204	2,336	2,56

Fonte: Adaptado de PEREIRA et al., 2017

3.5 POLÍTICA DE DESPACHO

O sistema estudado neste trabalho é composto por uma usina termoeétrica com dois geradores à diesel de 168,75 kW, um sistema de geração solar fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia conectados a uma barra C.A., sendo que os dois últimos deverão ser dimensionados buscando a otimização financeira.

Tendo em vista que a geração fotovoltaica é uma fonte não despachável de energia, ela é considerada como uma carga negativa para o sistema, sendo subtraída da demanda de consumo para o cálculo da demanda líquida.

A lógica utilizada para o atendimento da demanda da localidade pode ser resumida conforme abaixo relacionado:

- Se a geração fotovoltaica for maior que a demanda de consumo da localidade, a energia FV excedente deverá ser armazenada nas baterias;
- Se a geração fotovoltaica for menor que a demanda de consumo da localidade e se houver energia utilizável na bateria, ou seja, se a bateria estiver acima do seu estado de carga mínimo, a energia da bateria deve ser usada para suprir a demanda da localidade;
- Se a geração fotovoltaica for menor que a demanda de consumo da localidade e não houver energia utilizável na bateria, os geradores a diesel devem ser acionados para suprir a demanda da localidade. A ativação dos geradores deverá ser feita de modo a respeitar seus limites de carga e, caso a carga mínima do gerador seja maior que a demanda a ser atendida, a energia excedente deve ser armazenada nas baterias.

3.6 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais foram feitas via HOMER Pro e PVsyst. O software HOMER Pro, desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), é um software utilizado globalmente para otimizar o *design* de minirredes.

O PVSyst, por sua vez, é um software voltado para simulação de sistemas fotovoltaicos, oferecendo relatórios detalhados sobre seus desempenhos com base em informações inseridas pelo usuário ou selecionadas dos bancos de dados integrados do programa.

Em ambos os programas, foi utilizada uma base horária para as simulações. Para cada horizonte de projeto de 7, 10, 14 e 21 anos, foram definidos os parâmetros do sistema híbrido e realizadas as simulações para obter a configuração de menor custo por unidade de energia elétrica, ou seja, do menor LCOE.

Os horizontes de 7, 10, 14 e 21 anos estão alinhados aos períodos de creditação para projetos de MDL, que podem ser constituídos de até três períodos de 7 anos ou um único período de 10 anos (UNFCCC, 2006).

Conforme mostra a Eq. 1, o LCOE é calculado em termos do custo inicial e dos custos de operação e manutenção.

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{I_i + O\&M_i}{(1 + TMA)^i} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{E_i}{(1 + TMA)^i} \right]} \quad (1)$$

Em que:

LCOE = Custo nivelado de produção de energia (R\$/kWh);

$I_{(i)}$ = Valor investido no ano i (R\$);

$O\&M_{(i)}$ = Despesas com operação e manutenção no ano i (R\$);

$E_{(i)}$ = Geração de energia elétrica no ano i (kWh);

TMA = Taxa mínima de atratividade (porcentagem);

n = Vida útil do sistema (anos).

3.7 AVALIAÇÃO FINANCEIRA

Para avaliar a viabilidade econômica de cada sistema simulado foram considerados os seguintes parâmetros:

- CAPEX do diesel: R\$ 1.000,00 /kW (EPE, 2021c);
- OPEX fixo: 5% do CAPEX (EPE, 2016);
- OPEX variável do diesel: R\$ 25,00 /MWh (EPE, 2021c);
- Preço do diesel: R\$ 5,310/L (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2021);
- CAPEX do sistema de armazenamento: R\$ 4.000 /kWh (EPE, 2021c);
- OPEX do sistema de armazenamento: 0,5% do CAPEX /ano (EPE, 2021c);
- OPEX do sistema fotovoltaico: R\$ 50/kWp/ano (EPE, 2021d)
- TMA: 13,25% a.a. (BCB, 2022)
- Taxa de inflação esperada: 11,73% a.a. (BCB, 2022)

Neste trabalho, o preço do diesel foi calculado através do levantamento de Preços de Revenda e de Distribuição de Combustíveis, da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), como a média dos preços para o estado de Rondônia no ano de 2021 (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2021), corrigido de um fator de 10% para representar custos adicionais como impostos e transporte (EPE, 2016).

Para o sistema de armazenamento, considerou-se que não haveria a reposição das baterias durante o período do projeto, portanto a vida útil da bateria é a única para todas as premissas de análises temporais. Para o CAPEX do sistema fotovoltaico, foram adotados diferentes valores correspondentes ao tamanho do sistema: R\$ 5,25/Wp para sistemas de 4 kWp a 50 kWp, R\$ 4,44/Wp para sistemas de 50 kWp a 1 MWp e R\$ 4,08/Wp para sistemas a partir de 1 MWp (GREENER, 2022).

3.8 EMISSÕES EVITADAS

A metodologia utilizada neste trabalho para o cálculo de emissões de GEE evitadas é intitulada AM0103 - *Renewable energy power generation in isolated grids* (geração de energia renovável em sistemas isolados) (UNFCCC, 2019). Esta metodologia detalha os passos que devem ser seguidos para o desenvolvimento e o registro de projetos de MDL que envolvam a instalação ou renovação de usinas geradoras de eletricidade a partir de fontes renováveis, como a solar, hidrelétrica e eólica (UNFCCC, 2019). A metodologia também descreve as condições de adicionalidade para os projetos, sem as quais estes se tornam inelegíveis à compensação com

créditos de carbono. Visto que o escopo deste trabalho envolve apenas o cálculo das emissões evitadas, e que as condições de adicionalidade raramente influenciam no resultado dos cálculos, tais condições não serão consideradas para a aplicabilidade das metodologias.

De acordo com a AM0103, o cálculo das emissões evitadas deve ser feito de acordo com as equações a seguir.

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (2)$$

$$BE_y = EG_{PJ,y} \times EF_{CM,y} \quad (3)$$

Em que:

ER_y = Emissões evitadas no ano y (tCO₂eq/ano)

BE_y = Emissões de linha de base no ano y (tCO₂eq/ano)

PE_y = Emissões de projeto no ano y (tCO₂eq/ano)

$EG_{PJ,y}$ = Energia elétrica fornecida pelo projeto no ano y (MWh/ano)

$EF_{CM,y}$ = Fator de emissão de margem combinada do sistema isolado no ano y (tCO₂/MWh)

Ainda de acordo com a AM0103, estes cálculos têm como base a noção de que, na ausência da atividade de projeto, a energia seria gerada pelas demais unidades geradoras do sistema isolado. Assim, devido à atividade de projeto, as emissões provenientes da operação destas outras unidades geradoras são evitadas, sendo substituídas pelas emissões do próprio projeto, quando significativas (UNFCCC, 2019, p. 10).

As *Tools* (ferramentas) são usadas para calcular, determinar, demonstrar, estimar, identificar e/ou testar informações relacionadas a um projeto de MDL e são geralmente referenciadas em uma metodologia aprovada ou em um formulário. Para o cálculo do fator de emissão do sistema elétrico isolado, é utilizada a TOOL07: *Tool to calculate the emission factor for an electricity system* (Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico). Esta ferramenta detalha vários métodos, de acordo com o tipo de sistema e as informações disponíveis, para calcular a margem de operação, a margem de construção e a margem combinada de sistemas elétricos, que são usadas para determinar o seu fator de emissão. Esta ferramenta também apresenta uma seção dedicada ao cálculo do fator de emissão de redes isoladas com apenas uma usina geradora à diesel, detalhando quais informações devem ser utilizadas e, na ausência de tais informações, informa os valores padrão que podem ser usados.

De acordo com a ferramenta, o cálculo do fator de emissão do sistema elétrico isolado pode ser feito de acordo com a equação a seguir.

$$EF_{grid,CM,y} = EF_{grid,OM,y} \times w_{OM} + EF_{grid,BM,y} \times w_{BM} \quad (4)$$

Em que:

$EF_{grid,CM,y}$ = Fator de emissão de margem combinada do sistema isolado no ano y (tCO₂/MWh)

$EF_{grid,OM,y}$ = Fator de emissão de margem de operação do sistema isolado no ano y (tCO₂/MWh)

$EF_{grid,BM,y}$ = Fator de emissão de margem de construção do sistema isolado no ano y (tCO₂/MWh)

w_{OM} = Fator de ponderação de emissões de margem de operação (percentual)

w_{BM} = Fator de ponderação de emissões de margem de construção (percentual)

4 RESULTADOS

4.1 GERAÇÃO À DIESEL, GERAÇÃO FV, PRODUTIVIDADE E LCOE

A análise energética e operacional do sistema com geração puramente a diesel foi simulada através do software HOMER Pro. Os resultados mostram a geração média anual dos geradores a diesel de 1.069.529 kWh e LCOE de R\$ 1,46/kWh.

A Tabela 3 apresenta dados de irradiação e de perdas consideradas nas simulações realizadas via PVSyst.

Tabela 3 – Parâmetros relacionados às perdas do sistema de geração fotovoltaica

Parâmetro	Valor	Ganhos / Perdas PR		
		kWh/m ²	%	%
Irradiação global horizontal	1.692			
Irradiação no plano inclinado	1.739		2,80%	100,0%
Sombreamento do horizonte	1.739		0,0%	100,0%
Perdas por reflexão	1.699		-2,7%	97,7%
Sujeira	1.648		-3,0%	94,7%
		kWh/kWp	%	%
Perdas por irradiação	1.637		-0,8%	93,9%
Perdas por temperatura	1.513		-7,5%	86,3%
Perdas de qualidade do módulo	1.513		0,0%	86,3%
Perdas por degradação induzida (LID+LeTID+PID)	1.474		-2,6%	83,7%
Perdas de interconexão (mismatch)	1.461		-0,9%	82,8%
Perdas no cabeamento CC	1.460		-0,1%	82,7%
Perdas no Inversor	1.417		-2,91%	79,8%
Perdas no cabeamento CA	1.415		-0,15%	79,7%
Perdas no transformador	1.403		-0,9%	78,8%
Perdas de indisponibilidade	1.376		-1,9%	76,9%
TOTAL	1.376			76,9%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada bloco representativo do sistema fotovoltaico é constituído de módulos monofaciais de silício monocristalino com potência individual de 440 Wp e eficiência de 22,17%, orientados ao norte com inclinação de 10°, totalizando uma potência instalada de 6,6 kWp. O inversor utilizado apresenta potência de 5,5 kW e FCI de 120%.

Para cada bloco de geração fotovoltaica foram calculados, via PVSyst, a energia fotovoltaica anual gerada e os indicadores de desempenho (produtividade e PR).

Os resultados mostram geração fotovoltaica anual de 9.077 kWh, produtividade de 1.376 kWh/kWp/ano e *performance ratio* anual (PR) de 76,9%.

Para o período analisado (1 ano), através do software PVSyst, foi gerada uma série temporal em base horária da potência gerada pelo sistema fotovoltaico. Esta série foi, então, importada para o software HOMER Pro.

Adicionalmente, foram introduzidos no HOMER Pro dados referentes aos geradores a diesel e dados referentes aos blocos de SAEBs com potência máxima de 300 kW e capacidade de armazenamento de 100 kWh.

Os resultados mostraram soluções otimizadas de *design* para a minirrede híbrida, objeto desta análise (menor LCOE), conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 –Potência fotovoltaica instalada, capacidade do SAEB, geração média anual diesel, geração média anual fotovoltaica, investimento inicial e LCOE.

Período de projeto	Potência FV (kWp)	Capacidade do SAEB (kWh)	Geração média anual (Diesel) (kWh/ano)	Geração média anual (Fotovoltaica) (kWh/ano)	Investimento inicial (R\$)	LCOE (R\$/kWh)
7 Anos	249,48	100	708.939	471.961	1.485.018,39	1,20
10 Anos	303,60	100	683.250	574.920	1.720.383,21	1,13
14 Anos	621,06	1200	316.696	1.174.744	7.491.588,34	1,04
21 Anos	792,00	1900	126.557	1.496.049	11.026.097,43	0,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os horizontes analisados neste projeto, os resultados mostram que os sistemas híbridos adotados apresentaram redução no LCOE em comparação com o sistema puramente a diesel. Para o período de projeto de 7 anos e para a solução híbrida adotada neste período, os resultados mostraram redução percentual no LCOE de 17,8%, enquanto para o período de projeto a de 21 anos e para a solução híbrida adotada neste período, os resultados mostraram redução percentual de 43,8%, evidenciando que projetos de horizontes maiores são economicamente mais atrativos.

Percebe-se que a energia anual gerada pelo sistema fotovoltaico é maior para períodos de projeto de maior duração. Neste caso, períodos de projeto mais curtos favorecem sistemas

com baixo investimento inicial, enquanto períodos mais longos habilitam um investimento inicial maior, possibilitando a utilização de maiores sistemas fotovoltaicos e maiores sistemas de armazenamento de energia em baterias.

4.2 FATOR DE EMISSÃO DA REDE

De acordo com a *Tool07*, pode-se calcular o fator de emissão do sistema isolado a partir do fator de emissão das unidades geradoras que o integram ou a partir da energia gerada e da quantidade de combustível consumida anualmente. Na ausência destas informações, pode-se adotar valores padrão para tais fatores. Como as informações anteriormente apresentadas não se encontram disponíveis para a UTE Izidolândia, optou-se por atribuir o valor padrão de 0,58 tCO₂/MWh para o fator de emissão de margem de construção e 0,79 tCO₂/MWh para o fator de emissão da margem de operação, conforme estabelecido pela ferramenta (UNFCCC, 2018).

Adicionalmente, faz-se necessário determinar os fatores de ponderação para as margens de operação e construção. Segundo a *Tool07*, para atividades de projeto de geração solar e eólica: $w_{OM} = 0,75$ e $w_{BM} = 0,25$ (devido às suas naturezas intermitentes e não despacháveis). Visto que a ferramenta considera os fatores de ponderação invariáveis dentre os períodos de creditação do projeto, pode-se assumir que, para fins de levantamento das emissões evitadas, estes valores também se mantenham constantes durante os anos.

Conforme apresentado abaixo, os resultados mostram fator de emissão do sistema isolado de 0,7375 tCO₂/MWh.

$$EF_{grid,CM,y} = 0,79 \times 0,75 + 0,58 \times 0,25 = 0,7375 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$$

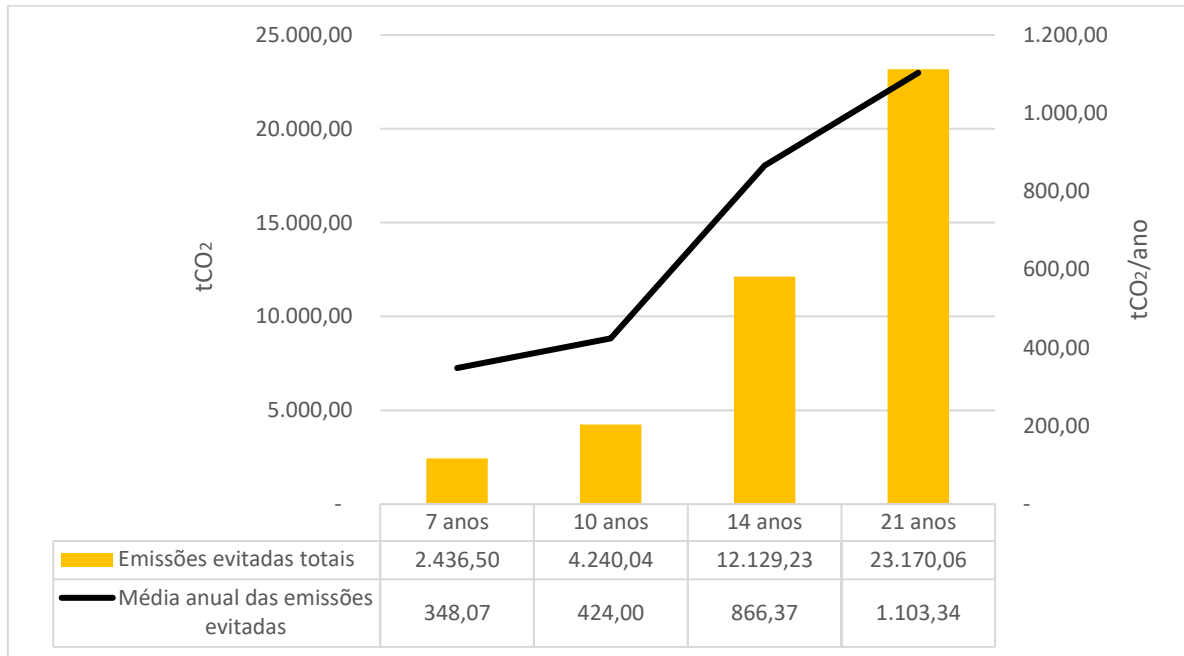
4.3 EMISSÕES EVITADAS

De acordo com a AM0103, as emissões de projeto (PE_y) são consideradas nulas exceto para projetos que envolvam queima de combustível fóssil, geração hidrelétrica com reservatórios de água ou geração geotérmica (UNFCCC, 2019, p. 8). Visto que o estudo analisado neste trabalho considera apenas geração solar fotovoltaica e bancos de baterias, pode-se assumir que as emissões do projeto são nulas. Assim, a partir das equações 1 e 2, pode-se chegar à seguinte relação:

$$ER_y = EG_{PJ,y} \times EF_{CM,y} \quad (5)$$

Com as informações apresentadas nas seções 4.1 e 4.2, obtém-se os resultados conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 –Emissão evitada total e médias anuais de emissões evitadas para cada período de projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que a emissão evitada para cada período de projeto analisado segue a mesma tendência da energia fotovoltaica gerada, assumindo valores menores para os períodos de 7 e 10 anos. Os resultados mostram crescimento significativo (104%) na média anual das emissões evitadas no período compreendido entre 10 e 14 anos. Os resultados mostram ainda pouco incremento das emissões evitadas no período compreendido entre 14 e 21 anos.

5 CONCLUSÃO

A partir das análises elaboradas neste trabalho, foi possível avaliar os impactos dos sistemas de geração solar fotovoltaica com SAEB na redução de emissões de gases de efeito estufa em sistemas isolados. Esta avaliação se mostra pertinente à situação atual da problemática do aquecimento global, especialmente devido ao crescimento significativo da geração solar fotovoltaica nos últimos anos.

De acordo com os resultados obtidos, para um horizonte de 7 anos, o sistema constituído de blocos de geração solar fotovoltaica de 6,6 kWp e blocos de SAEB de 100 kWh que apresenta menor LCOE seria capaz de gerar anualmente 472 MWh (penetração energética de 33,7%) em Izidolândia – RO, totalizando 3.304 MWh após os 7 anos de funcionamento. Neste caso, este sistema seria capaz de evitar as emissões anuais de 348,07 tCO₂, totalizando 2.436,50 tCO₂ ao final dos 7 anos. Considerando que o plantio de um hectare de árvores com menos de 20 anos de idade é capaz de capturar cerca de 25,99 tCO₂ por ano (Rodríguez, 2015, p. 85), seria necessário plantar aproximadamente 13,39 hectares de árvores para se obter o mesmo impacto ambiental no mesmo período.

Para um horizonte de 10 anos, o sistema seria capaz de gerar anualmente 575 MWh (penetração energética de 36,1%), resultando em 5.749 MWh e reduziria anualmente as emissões de gases de efeito estufa em 424,00 tCO₂, equivalente a 4.240,04 tCO₂ ao final dos 10 anos. Apesar do aumento de cerca de 21,8% na energia anual gerada e nas emissões anuais evitadas em relação ao cenário de 7 anos, este cenário ainda apresenta baixo impacto em relação aos cenários de 14 e 21 anos.

Para um horizonte de 14 anos, o sistema apresenta um salto na geração FV, sendo capaz de gerar anualmente 1.175 MWh (penetração energética de 70,4%), resultando em 16.446 MWh e reduzindo as emissões anuais de gases de efeito estufa em 866,37 tCO₂, equivalente a 12.129,23 tCO₂ ao final do período analisado, efeito similar ao que o plantio de aproximadamente 33,33 hectares de árvores surtiria no mesmo período. Este cenário apresenta um aumento de cerca de 104% na energia anual gerada e nas emissões anuais evitadas em relação ao cenário de 10 anos.

Finalmente, para um horizonte de 21 anos, apesar de o sistema apresentar um aumento considerável na penetração energética, chegando a 88,2%, a geração de energia renovável demonstrou um incremento mais sutil, gerando 1.496 MWh anualmente e resultando em 31.417 MWh ao todo. O impacto ambiental também não apresentou aumento expressivo, com uma

redução de emissões de gases de efeito estufa de 1.103,34 tCO₂ por ano, equivalente a 23.170,06 tCO₂ ao final dos 21 anos, efeito similar ao que o plantio de aproximadamente 42,45 hectares de árvores surtiria em 20 anos.

A partir do exposto nos parágrafos anteriores, pode-se concluir que há um grande potencial para redução de emissões de gases de efeito estufa em sistemas isolados a partir da instalação de sistemas fotovoltaicos e de sistemas de armazenamento de energia por baterias. Tal potencial está fortemente atrelado ao período de cada projeto, com os melhores resultados sendo observados em projetos com durações de 14 e 21 anos, equivalentes a 2 e 3 períodos de creditação de projetos de MDL, respectivamente.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar:

- Realizar simulações mais detalhadas, levando em consideração efeitos de natureza temporal, tais como a degradação dos sistemas fotovoltaicos e das baterias;
- Realizar estudos similares aos conduzidos neste trabalho em outras localidades do SISOL;
- Efetuar análises de emissões evitadas com outras fontes de energia além da geração solar fotovoltaica, tais como a usina hidrelétrica de Alto do Jatapu;
- Elaborar o projeto de MDL para a solução adotada;
- Avaliar a possibilidade da elaboração de projetos de MDL para outras localidades do SISOL;

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012**. 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, e dá outras providências. 2012. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Série histórica do levantamento de preços**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/serie-historica-do-levantamento-de-precos>. Acesso em: 30 mai. 2022.

BCB. **Panorama econômico**. 2022. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/?bc=>. Acesso em: 30 mai. 2022.

BHATTACHARYYA, S. C., PALIT, D. Mini-grid based off-grid electrification to enhance electricity access in developing countries: What policies may be required? **Energy Policy**, v. 94, p. 166—178., jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.010>.

BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA. **Monitoring report form for CDM project activity: BK Energia Itacoatiara Project**. 2021. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/filestorage/6/2/Q/62QOATIW9K8NKG0EVBH3MZD7L14FSU/0168_BK%20Energia%20Monitoring%20Report%202020_V1_22June2021.pdf?t=WWt8cmFha2ZifDAS2GhVrc7pbwn3hzM1wHCn. Acesso em: 08 mar. 2022.

BK ENERGIA ITACOATIARA LTDA. **Project design document form for small-scale CDM project activities: BK Energia Itacoatiara Project**. 2017. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/filestorage/U/E/V/UEVHL0YR8WMJN54TF9A2IZK6XC3Q7D/BK_Energia_Itacoatiara_PDD_V6.4_03Feb.pdf?t=dHV8cmFhanl4fDC5Ndlac4NwE3tUDk8ZZ1xw. Acesso em: 08 mar. 2022.

BOLINGER, Mark et al. **Hybrid Power Plants: Status of Installed and Proposed Projects**. ago. 2021. 38 slides. Disponível em: https://emp.lbl.gov/sites/default/files/hybrid_plant_development_2021.pdf. Acesso em: 07 mar. 2022.

BP. **Statistical Review of World Energy: 2021 | 70th edition**. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2021.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas S.A (Eletrobrás). Grupo Técnico Operacional da Região Norte. GTON. **Relatório do Plano Anual de Operação para 2015**. Rio de Janeiro. 2014.

EPE. **Anexos Lote IV – Rondônia**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/leilao-dos-sistemas-isolados-2021>. Acesso em: 15 nov. 2021

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021**: ano base 2020. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuário_2021.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021

EPE. **BEN**: Relatório Síntese 2021 Ano Base 2020. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2021_PT.pdf. Acesso em 05 mar. 2022.

EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**: Micro e Minigeração Distribuída & Baterias. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-607/topico-591/Caderno_MMGD_Baterias_rev2022.pdf. Acesso em 05 mar. 2022.

EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**: Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno%20de%20Parâmetros%20de%20Custos%20-%20PDE%202030.pdf>. Acesso em 05 mar. 2022.

EPE. **Fact Sheet**: Sistemas Isolados de Energia no Brasil. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-586/EPEFactSheetSistemasIsolados.pdf>. Acesso em 05 mar. 2022.

EPE. **Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados**: Horizonte 2025 Ciclo 2020. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-614/EPE-NT-Planejamento%20SI-ciclo_2020.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.

EPE. **SISTEMAS ISOLADOS: ENERGIA SOLAR PARA SUPRIMENTO DE SISTEMAS ISOLADOS DO AMAZONAS**. [S. l. : s. n.]. 2016. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Paginas/Energia-Solar-para-Suprimento-de-Sistemas-Isolados-do-Amazonas.aspx>. Acesso em 05 dez. 2021.

GOLDIE-SCOT, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. **BloombergNEF**, 2019. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Acesso em: 05 dez. 2021.

GORMAN, Will et al. Motivations and options for deploying hybrid generator-plus-battery projects within the bulk power system. **The Electricity Journal**, v. 33, n. 5, jun. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619020300312>. Acesso em: 07 mar. 2022.

GREENER. **Greener Strategic Report: DG Market Brazil | 2nd Half of 2021**. Disponível em: <https://www.greener.com.br/estudo/strategic-report-dg-market-brazil-2nd-half-of-2021/>. Acesso em: 05 mar. 2022.

HIGUERA, Leidy Milena Mora. **Análise de redução de custos de transporte de óleo diesel para as termelétricas das áreas isoladas de Rondônia**. 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

HOMER PRO. Software de otimização de microrredes. ver. 3.14.5. 2021. Disponível em: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>

IBGE. **Alta Floresta D'Oeste: Panorama**. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ro/alta-floresta-doeste/panorama>. Acesso em: 09 mar. 2022

IEA, **Energy Storage**, 2021, Paris <https://www.iea.org/reports/energy-storage>

IEA, **How rapidly will the global electricity storage market grow by 2026?**, 2021, Paris <https://www.iea.org/articles/how-rapidly-will-the-global-electricity-storage-market-grow-by-2026>

IEA. **World Energy Outlook 2021**. Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>. Acesso em: 05 mar. 2022

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Solar Energy**. 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/solar>. Acesso em: 06 mai. 2022.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

KAVLAK, G., MCNERNEY, J., TRANCIK, J. E., 2018. Evaluating the causes of costs reduction in photovoltaic modules. **Energy Policy**, v. 123, p. 700-710, dez. 2018 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.015>

NC STATE ENERGY STORAGE TEAM. **Energy Storage Options for North Carolina**. 2019. Disponível em: <https://energy.ncsu.edu/storage/wp-content/uploads/sites/2/2019/02/NC-Storage-Study-FINAL.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2022.

ONS. **PLANO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DOS SISTEMAS ISOLADOS PARA 2020**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/DPL-REL-0248-2019%20-%20PEN%20SISOL%202020.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2022.

ONS. **Sobre o SIN: O Sistema Em Números**. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 08 mar. 2022.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>

PIERNAGORDA, César Oswaldo Peralta. **Reduction of CO₂ Emissions in Isolated Power Systems Using Energy Storage**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

PINHO, J. T., BARBOSA, C. F. O., PEREIRA, E. J. S., SOUZA, H. M. S., BLASQUES, L. C. M., GALHARDO, M. A. B., MACÊDO, W. N. **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia: tecnologias de energias renováveis**. Ed. 1. (Brasília – Brasil), 2008. ISBN 978-85-98341-02-6. Disponível em: https://www.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hibrido.pdf. Acesso em: 05 mar. 2022.

POTENZA, Renata F. *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa: e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. [S. l. : s. n.]. 2021. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em 05 mar. 2022.

PVSYST. Software de dimensionamento fotovoltaico. ver. 7.2, 2021. Disponível em: <https://www.pvsyst.com> RODRÍGUEZ, Carlos René Muñiz. **ESTIMATIVA DO POTENCIAL SEQUESTRO DE CARBONO EM ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE DE CURSOS D'ÁGUA E TOPOS DE MORROS MEDIANTE REFLORESTAMENTO COM ESPÉCIES NATIVAS NO MUNICÍPIO DE SÃO LUIZ DO PARAÍTINGA**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Pós-Graduação em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 2015.

SANTOS, Veronica Solimar dos; BLANCO, Claudio José Cavalcante. ESTIMATIVA DE CRÉDITO DE CARBONO NA GERAÇÃO DE ENERGIA COM FONTES RENOVÁVEIS NA ILHA DE MARIMARITUBA-SANTARÉM-PA. *Revista de Estudos Ambientais*, [S.l.], v. 18, n. 1, p. 17-29, dez. 2016. ISSN 1983-1501. Disponível em: <https://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/5330>. Acesso em: 05 mar. 2022.

SOARES, Munir Younes. **Avaliação do desempenho dos sistemas isolados no Estado do Amazonas a partir de um estudo de caso: O Município de Uarini (AM)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi:10.11606/D.86.2008.tde-07082008-130606. Acesso em: 05 mar. 2022. UNFCCC. **Large-scale Methodology: Renewable energy power generation in isolated grids**. v. 4. 2019. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/filestorage/G/Y/7/GY7BL5R1W04MQZUJD2TKIHAFV8SNEX/EB105_repan02_AM0103.pdf?t=SUV8cmY2cTA5fDC8cn6335LefhjLZwdzaBmI. Acesso em: 15 nov. 2021

UNFCCC. **Methodological tool**. Tool to calculate the emission factor for an electricity system. v. 7. 2018. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-07-v7.0.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2021

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session, held at Montreal from 28 November to 10 December 2005**. 2006. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/Reference/COPMOP/08a01_abbr.pdf. Acesso em: 05 nov. 2021.

Victoria et al., Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future, **Joule** (2021), <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>

WORLD ENERGY COUNCIL. **Innovation Insights Brief: Five Steps To Energy Storage**. Londres, 2020. Used by permission of the World Energy Council. Disponível em: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Five_steps_to_energy_storage_v301.pdf?v=1583316514. Acesso em: 07 mar. 2022.