

EMISSÕES EVITADAS DEVIDO À HIBRIDIZAÇÃO DA GERAÇÃO EM MINIRREDES DA AMAZÔNIA ATRAVÉS DA AGREGAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS E DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Vinicius Hirassaki – vini.hira@hotmail.com

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

Helena Flávia Naspolini

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

Daniel Odilio dos Santos

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

Lucas Hack de Souza Neto

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

Ricardo Rütther

Universidade Federal da Santa Catarina, Departamento de Engenharia Civil

6.7. Caracterização, análise, equipamentos e sistemas de microrredes

Resumo. A urgência da mitigação das mudanças climáticas e da inclusão de energias renováveis em regiões remotas, implica no desafio de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em redes isoladas da Amazônia. O objetivo central deste estudo é avaliar as emissões de gases de efeito estufa evitadas por meio da hibridização de um sistema isolado. O sistema é composto por geração termoelétrica a diesel com a incorporação de sistema fotovoltaico (FV) e de sistema de armazenamento de energia em baterias (SAEB). A localidade escolhida para a análise é o distrito de Izidolândia, RO. As emissões evitadas resultantes da inserção da geração fotovoltaica (FV) foram calculadas seguindo as diretrizes da metodologia de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) AM0103. Foram realizadas simulações para diferentes períodos de projeto, incluindo 7, 10, 14 e 21 anos, os quais estão alinhados com os períodos de creditação de projetos de MDL. Para a determinação das emissões evitadas foi escolhida a configuração do sistema híbrido que apresentou o menor custo nivelado de energia para cada período. Os resultados obtidos demonstraram a contribuição altamente significativa da geração fotovoltaica combinada com sistemas de armazenamento de energia, na redução das emissões de toneladas de CO₂ equivalentes (tCO₂eq), que se mostra maior para projetos de maiores durações: projetos de 7 anos evitariam a emissão de 348,07 tCO₂eq/ano; projetos de 10 anos evitariam a emissão de 424 tCO₂eq/ano; projetos de 14 anos evitariam a emissão de 866,37 tCO₂eq/ano; e projetos de 21 anos evitariam a emissão de 1.103,34 tCO₂eq/ano.

Palavras-chave: Armazenamento de energia, Sistemas isolados híbridos, Emissões evitadas.

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma matriz energética renovável e que possa mitigar a emissão de gases de efeito estufa é o desafio energético global atual. O interesse pelas fontes renováveis de energia elétrica tem aumentado consideravelmente, motivado pelo seu baixo impacto ambiental. Nesse contexto, as pesquisas na área de geração de energia renovável desempenham um papel crucial, fornecendo informações essenciais e estimulando o avanço dessas tecnologias. De acordo com o relatório de 2021 do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), o século 21 caminha inevitavelmente para um aquecimento global variando entre 1,5°C a 2°C em relação aos anos de 1850-1900, a menos que haja uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas próximas décadas (IPCC, 2021). O relatório também enfatiza que os efeitos das mudanças climáticas se intensificam de acordo com o aumento do aquecimento global, incluindo o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuvas intensas, secas e ciclones, variando de acordo com a localização geográfica (IPCC, 2021).

O Brasil, por sua vez, tem um papel relevante nesse cenário. Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em 2020, o país foi responsável pela emissão de aproximadamente 2,16 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, sendo que cerca de 46,2 milhões de toneladas foram provenientes da geração de energia elétrica (POTENZA *et al.*, 2021). Essa parcela relativamente baixa de emissões se deve, em grande parte, ao fato de a matriz elétrica brasileira ser predominantemente composta por hidrelétricas, representando aproximadamente 65,2% de toda a geração de eletricidade em 2020 (EPE, 2021a).

No entanto, o Brasil é um país de dimensões continentais, o que traz desafios significativos quando se trata da expansão e interligação do Sistema Interligado Nacional (SIN). O país abriga diversos sistemas isolados (SISOL), localizados principalmente na região amazônica (EPE, 2021d), que dependem predominantemente de termoelétricas movidas a diesel como fonte principal de geração de energia elétrica. A utilização de termoelétricas à diesel se justifica

pelo baixo custo inicial de implantação desses sistemas, pela facilidade logística de transporte do combustível e pelo conhecimento tecnológico acumulado pelo setor elétrico nessa área.

A combustão de óleo diesel para a geração de energia elétrica tem um grande impacto ambiental devido à emissão de gases de efeito estufa. 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). 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 da geração solar fotovoltaica em minirredes é complexa, pois esta fonte energética é intermitente e, consequentemente, 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. Para realizar esse controle, um sistema de armazenamento em baterias (SAEB) pode ser utilizado de modo a atenuar oscilações de potência, sejam estas provenientes de variações de demanda ou da geração fotovoltaica (SANTOS, 2021; SANTOS, 2022)

Visando reduzir o consumo de diesel para gerar energia elétrica em sistemas isolados, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nos últimos anos, começou a adotar políticas de incentivo à implementação de soluções alternativas para a oferta de energia nestes sistemas. 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 termoeletrônica a diesel, geração FV e SAEB. 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.

2. METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é avaliar as emissões evitadas, expressas em toneladas de CO₂ equivalentes, proporcionadas pela hibridização de um sistema de geração termoeletrônica a diesel integrante do SISOL, localizado no distrito de Izidolândia – RO, através da inserção de sistema FV e de SAEB. As emissões evitadas proporcionadas pela agregação da geração fotovoltaica, foram calculadas conforme prescrições da metodologia de MDL AM0103.

Para selecionar a localidade que representasse adequadamente os sistemas isolados que compõem o SISOL, foram utilizadas as curvas de consumo energético anual de várias localidades do SISOL disponíveis no Leilão de Energia para Sistemas Isolados de 2021.

A Fig. 1 apresenta dados de demanda e de consumo de diversos sistemas isolados integrantes do SISOL.

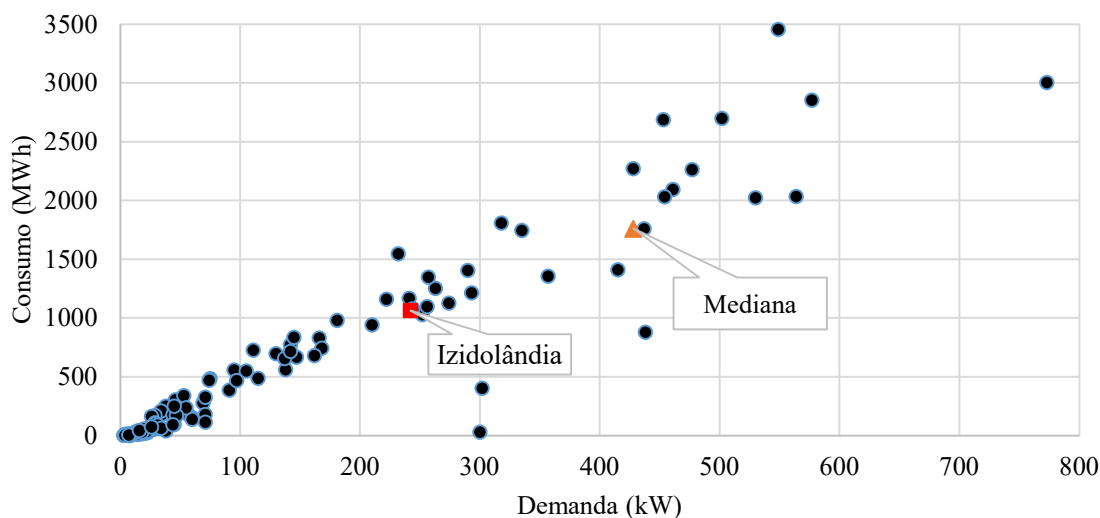


Figura 1 – Demanda e consumo de diversos sistemas isolados do SISOL. Adaptado de EPE, 2019.

Observa-se que o sistema isolado de Izidolândia é uma escolha estatisticamente adequada para representar os sistemas isolados do SISOL, visto que tal sistema, dentre os sistemas cujas informações de consumo estão disponíveis

em domínio público, apresenta consumo e demanda próximos da mediana dos consumos e demanda dos sistemas integrantes do SISOL analisados.

A geração termoeétrica a diesel de Izidolândia é composta por dois geradores a diesel, cada um com potência nominal de 168,75 kW. Cada gerador opera com, no mínimo, 30% de sua potência nominal e o consumo nominal de óleo diesel por gerador é de 329 litros/MWh (EPE, 2021b). Os geradores a diesel só seriam ativados em conjunto se um único gerador não fosse capaz de atender à demanda.

Utilizando-se do conceito de integração gradual da geração FV ao sistema isolado, a geração fotovoltaica consiste de blocos de 6,6 kWp de potência. 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°. O inversor apresenta potência de 5,5 kW e FCI de 120%.

Adotando-se o mesmo conceito de integração gradual do sistema de armazenamento de energia em baterias (SAEB) ao sistema isolado, cada bloco de SAEB de íons de lítio com potência máxima de 300kW e capacidade de armazenamento de 100kWh, é incrementado gradualmente. O sistema foi projetado de forma a ser equivalente a aproximadamente 2,5% da energia consumida no dia com maior carga já registrada. Além disso, possui uma profundidade de descarga de 90% e uma eficiência global de 89%. O inversor bidirecional conta com um regime de trabalho que tem capacidade de despacho na ordem de milissegundos, garantindo a estabilidade do sistema.

Para a definição do despacho energético, foram adotadas 3 lógicas de atendimento à demanda do sistema isolado, conforme abaixo relacionadas:

- Caso a geração fotovoltaica ultrapasse a demanda, o excedente da geração FV deverá ser armazenado no SAEB;
- Caso haja energia disponível no SAEB e o sistema fotovoltaico não consiga suprir a demanda do sistema, a energia do SAEB deverá ser usada para o atendimento a demanda;
- Caso não haja energia disponível no SAEB e o sistema fotovoltaico não consiga suprir a demanda a ser atendida, os geradores a diesel deverão entrar em ação para suprir a necessidade. Se a geração mínima do gerador exceder a demanda a ser atendida, o excedente deverá ser armazenado no SAEB.

O dimensionamento do sistema FV e do SAEB a ser inserido no sistema isolado teve como objetivo minimizar o custo nivelado por unidade de energia elétrica, ou seja, o menor LCOE, conforme mostra a Eq. 1.

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

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).

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 (ANP,2021), corrigido de um fator de 10% para representar custos adicionais como impostos e transporte (EPE, 2016).

Para o SAEB, 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).

Para realizar as simulações, utilizou-se de duas ferramentas de software: o HOMER Pro, para o projeto da minirrede, e o PVsyst, para a simulação do sistema fotovoltaico a ser implementado. Dado que o objetivo era realizar uma análise que incluísse a metodologia do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), foram considerados horizontes temporais de 7, 10, 14 e 21 anos, alinhados com os períodos de creditação para projetos de MDL.

A Tab. 1 apresenta os parâmetros utilizados na análise de viabilidade econômica dos sistemas simulados.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a análise de viabilidade econômica

Indicadores	Valor	Fonte
CAPEX do diesel	R\$ 1.000,00 /kW	EPE, 2021b
OPEX fixo	5% do CAPEX	EPE, 2016
OPEX variável do diesel	R\$ 25,00 /MWh	EPE, 2021b
Preço do diesel	R\$ 5,310/L	ANP,2021

CAPEX do sistema de Armazenamento	R\$ 4.000 /kWh	EPE, 2021b
OPEX do sistema de armazenamento	0,5% do CAPEX /ano	EPE, 2021b
OPEX do sistema fotovoltaico	R\$ 50/kWp/ano	EPE, 2021c
TMA	13,25% a.a.	BCB, 2022
Taxa de inflação esperada	11,73% a.a.	BCB, 2022
OPEX fixo	5% do CAPEX	EPE, 2016
OPEX variável do diesel	R\$ 25,00 /MWh	EPE, 2021b
Preço do diesel	R\$ 5,310/L	ANP, 2021
CAPEX do sistema de Armazenamento	R\$ 4.000 /kWh	EPE, 2021b
OPEX do sistema de armazenamento	0,5% do CAPEX /ano	EPE, 2021b
OPEX do sistema fotovoltaico	R\$ 50/kWp/ano	EPE, 2021c

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). 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, os 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).

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 utilizados. De acordo com a ferramenta, o cálculo do fator de emissão do sistema elétrico isolado pode ser feito de acordo com a Eq. 4

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

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)

3. RESULTADOS

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

A Tab. 2 apresenta dados de irradiação e de perdas consideradas nas simulações realizadas via PVSyst.

Tabela 2 – Parâmetros relacionados às perdas do sistema de geração fotovoltaica

Parâmetro	Valor	Ganhos	PR
		/Perdas	
	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%

Cada bloco de geração fotovoltaica foi simulado, via PVSyst. Os resultados mostraram energia fotovoltaica anual gerada de 9.077 kWh, produtividade de 1.376 kWh/kWp/ano e *performance ratio* anual (PR) de 76,9%.

A Tab. 3 apresenta para cada período de projeto, a potência fotovoltaica instalada, a capacidade do SAEB, a geração média anual diesel, a geração média anual fotovoltaica, o investimento inicial e o menor LCOE.

Tabela 3 – Potência fotovoltaica instalada, capacidade do SAEB, geração média anual diesel, geração média anual fotovoltaica, investimento inicial e LCOE.

Período	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	935.747	1.496.049	11.026.097,43	0,82

Observou-se que a quantidade anual de energia gerada pelo sistema fotovoltaico é maior para períodos de projeto mais longos. Em cenários de projetos de menor duração, é favorecida a implementação de sistemas com investimento inicial reduzido. Em contrapartida, em projetos de longo prazo, é possível fazer um investimento inicial mais substancial, permitindo a utilização de sistemas fotovoltaicos de maior porte e de sistemas de armazenamento de energia em baterias mais robustos.

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. Portanto, o fator de emissão do sistema isolado de 0,7375 tCO₂/MWh.

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). 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.

A Fig. 2 apresenta as emissões que seriam evitadas pela inserção da geração FV e de SAEB para as condições apresentadas na Tab. 4.

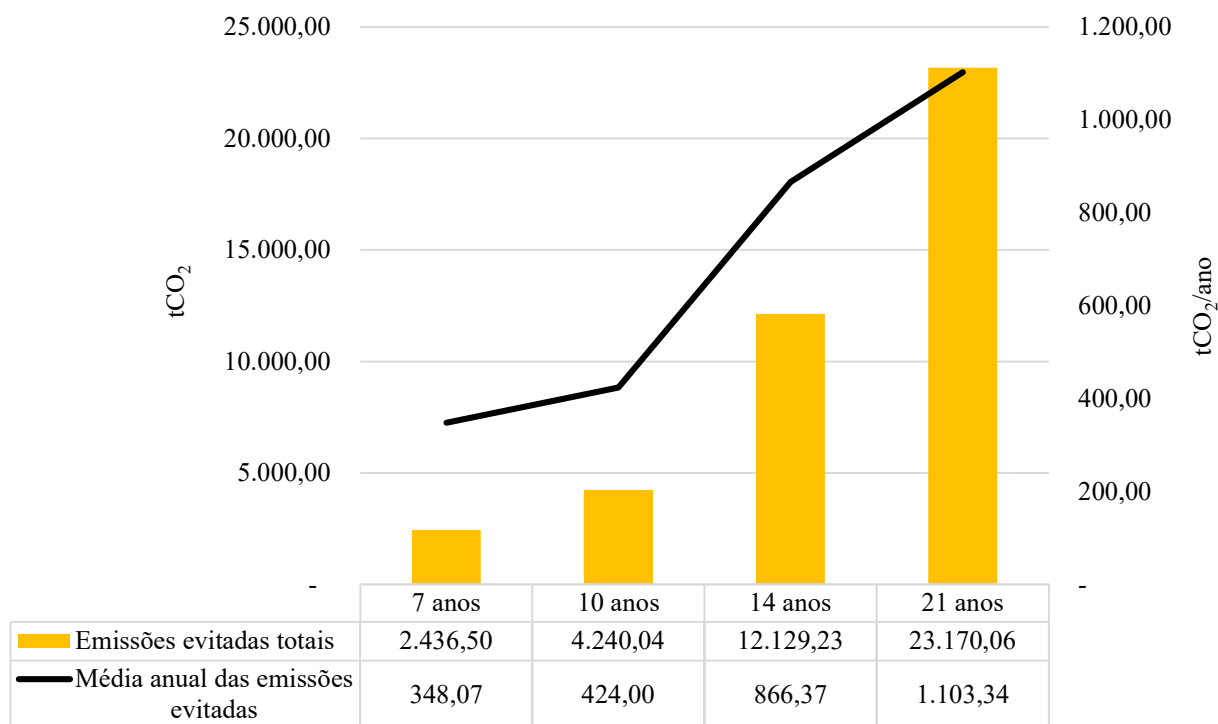


Figura 2 –Emissões evitadas totais e médias anuais de emissões evitadas para cada período de projeto

Os resultados revelam que as emissões evitadas para cada período de projeto analisado seguem a mesma tendência da geração de energia fotovoltaica, com valores mais baixos para os períodos de 7 e 10 anos. Entretanto, observa-se um crescimento significativo de 104% na média anual das emissões evitadas para duração de projetos entre 10 a 14 anos. Os resultados demonstram ainda, um aumento mais modesto das emissões evitadas para períodos de projeto de 14 a 21 anos.

4. CONCLUSÃO

Com base nas análises detalhadas neste estudo, foi possível avaliar os impactos dos sistemas de geração solar fotovoltaica com SAEB na redução das emissões de gases de efeito estufa em sistemas isolados.

Para Izidolândia e para o horizonte de projeto de 7 anos, o sistema, que apresenta o menor LCOE seria capaz de gerar anualmente 472 MWh (33,7% de penetração energética), totalizando 3.304 MWh após 7 anos de operação. Nesse cenário, o sistema seria capaz de evitar a emissão anual de 348,07 toneladas de CO₂ equivalentes, totalizando 2.436,50 toneladas de CO₂ ao final dos 7 anos. Comparativamente, seria necessário o plantio de aproximadamente 13,39 hectares de árvores com menos de 20 anos de idade para alcançar o mesmo impacto ambiental no mesmo período, considerando que um hectare captura cerca de 25,99 toneladas de CO₂ por ano (Rodríguez, 2015).

Para Izidolândia e para o horizonte de projeto de 10 anos, o sistema FV geraria anualmente 575 MWh (36,1% de penetração energética) e reduziria anualmente as emissões de gases de efeito estufa em 424,00 toneladas de CO₂ equivalentes. No período de 10 anos, o sistema FV geraria 5.749 MWh e reduziria 4.240,04 toneladas de CO₂ equivalentes. Embora haja um aumento de cerca de 21,8% na energia gerada anualmente e nas emissões evitadas anualmente em relação ao cenário de 7 anos, esse cenário ainda apresentaria um impacto ambiental menor em comparação com os cenários de 14 e 21 anos.

Para Izidolândia e para o período de projeto de 14 anos, o sistema FV geraria anualmente 1.175 MWh (70,4% de penetração energética) e reduziria anualmente as emissões de gases de efeito estufa em 866,37 toneladas de CO₂ equivalentes. No período de 14 anos, o sistema FV geraria 16.446 MWh e reduziria 12.129,23 toneladas de CO₂ equivalentes, equivalente ao plantio de aproximadamente 33,33 hectares de árvores no mesmo período. Nota-se um

aumento notável (104%) na energia gerada anualmente e nas emissões evitadas anualmente em comparação com o cenário de 10 anos.

Por fim, para um horizonte de projeto de 21 anos, embora o sistema apresente uma alta penetração de energia renovável (88,2%), a geração de energia solar fotovoltaica aumenta de forma mais moderada, produzindo anualmente 1.496 MWh e totalizando 31.417 MWh (21 anos). Neste período, o sistema FV geraria 31.417 MWh e reduziria 23.170,06 toneladas de CO₂ equivalentes, equivalentes ao plantio de aproximadamente 42,45 hectares de árvores.

Com base nas informações apresentadas, pode-se concluir que existe um grande potencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa em sistemas isolados por meio da instalação de sistemas fotovoltaicos e sistemas de armazenamento de energia por baterias. No entanto, esse potencial está intimamente ligado ao período de duração 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. Estas conclusões reforçam a importância de considerar horizontes de projeto mais longos ao planejar iniciativas de energia limpa e redução de emissões de carbono em sistemas isolados.

Os resultados para projetos com durações maiores também levantam a importância de simulações que contemplem efeitos de natureza temporal, como degradação dos sistemas fotovoltaicos e do SAEB, que podem ser analisadas em trabalhos futuros. Outra possibilidade que poderia ser estudada é a elaboração de um projeto de MDL para a hibridização de sistemas isolados, o que poderia alterar os indicadores econômicos devido aos créditos de carbono.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o auxílio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de suas bolsas de fomento, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ANP. 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., 2016. 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. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.010>.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas S.A (Eletrobrás). Grupo Técnico Operacional da Região Norte. GTON., 2014. Relatório do Plano Anual de Operação para 2015. Rio de Janeiro.
- EPE, 2020. Anexos Lote IV – Rondônia. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/leiloes-de-energia/leiloes/leilao-dos-sistemas-isolados-2021>. Acesso em: 15 nov. 2021
- EPE, 2021. BEN: Relatório Síntese 2021 Ano Base 2020. 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, 2021. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Micro e Minigeração Distribuída & Baterias. 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, 2021. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031: Parâmetros de Custos – Geração e Transmissão. 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, 2021. Fact Sheet: Sistemas Isolados de Energia no Brasil. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-586/EPEFactSheetSistemasIsolados.pdf>. Acesso em 05 mar. 2022.
- EPE, 2019. Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados: Horizonte 2024 Ciclo 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-452/EPE-NT-Planejamento%20SI-ciclo_2019_rev1.pdf. Acesso em: 15 nov. 2021.
- EPE, 2016. SISTEMAS ISOLADOS: ENERGIA SOLAR PARA SUPRIMENTO DE SISTEMAS ISOLADOS DO AMAZONAS. 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., 2019. 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.
- GREENER, 2022. 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, 2017. Análise de redução de custos de transporte de óleo diesel para as termelétricas das áreas isoladas de Rondônia. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- 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>
- 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., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>
- 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., 2008. Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia: tecnologias de energias renováveis. Ed. 1. (Brasília – Brasil). 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.*, 2021. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa: e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020. Disponível em: https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf. Acesso em 05 mar. 2022.
- RODRÍGUEZ, Carlos René Muñiz, 2015. 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 Paraitinga. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Pós-Graduação em Meteorologia, INPE, São José dos Campos.
- SANTOS, D. O., BRAGA, M., NASCIMENTO, L. R. do, & Rütther, R., 2021. Consultoria para identificação modelos técnicos e econômicos de integração renovável em sistemas isolado – Produto 2 : Avaliação de fatores críticos na integração de fontes intermitentes de energia em sistemas isolado. EPE. <https://www.epe.gov.br/p8publicaçõeses-dados-aberto8publicaçõeses/estudo-para-identificacao-de-modelos-tecnicos-e-economicos-de-integracao-renovavel-em-sistemas-isolados>
- SANTOS, D. O. dos, BRAGA, M., NASCIMENTO, Lucas. R., NASPOLINI, H. F., & RUTHER, R. , 2022. Avaliação de estratégias passivas para aumento da penetração da geração solar fotovoltaica em minirredes híbridas PV+Diesel. IX Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- SOARES, Munir Younes, 2008. Avaliação do desempenho dos sistemas isolados no Estado do Amazonas a partir de um estudo de caso: O Município de Uarini (AM). 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, 2019. Large-scale Methodology: Renewable energy power generation in isolated grids. v. 4. Disponível em: https://cdm.unfccc.int/filestorage/G/Y/7/GY7BL5R1W04MQZUJD2TKIHAFV8SNEX/EB105_repan02_AM0103.pdf?t=SUV8cmY2cTA5fDC8cn6335LefhjLZwdzaBmI. Acesso em: Acesso em: 15 nov. 2021

EMISSIONS REDUCTIONS DUE TO GENERATION HYBRIDIZATION IN AMAZON MINIGRIDS THROUGH THE INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS AND ENERGY STORAGE

Abstract. *The urgent need to mitigate climate change and include renewable energies in remote regions implies the challenge of reducing greenhouse gas emissions in isolated Amazonian networks. The main objective of this study is to evaluate the greenhouse gas emissions avoided by hybridizing an isolated system. The system consists of diesel thermoelectric generation with the incorporation of a photovoltaic system (PV) and a battery energy storage system (BESS). The site chosen for the analysis is located in the district of Izidolândia, RO. The emission reductions resulting from photovoltaic (PV) generation were calculated following the guidelines of the Clean Development Mechanism (CDM) methodology AM0103. Simulations were carried out for different project periods, including 7, 10, 14 and 21 years, which are in line with the crediting periods for CDM projects. To determine the emission reductions, the hybrid system configuration with the lowest levelized cost of energy for each period was chosen. The results obtained demonstrated the highly significant contribution of photovoltaic generation, combined with energy storage systems, in reducing emissions of tons of CO₂ equivalent (tCO₂eq), which is higher for projects with longer durations: 7-year projects result in 348,07 tCO₂eq reduction per year; 10-year projects result in 424 tCO₂eq reduction per year; 14-year projects result in 966,37 tCO₂eq reduction per year; and 21-year projects result in 1.103,34 tCO₂eq reduction per year.*

Keywords: *Energy Storage; Hybrid Isolated Systems; Avoided Emissions.*