

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMBINADA COM HIDROGÊNIO VERDE: UMA ESTRATÉGIA PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES E DA VULNERABILIDADE NA AMAZÔNIA

Meiriele Alvarenga Cumplido – meiriele.cumplido@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves

Enio Bueno Pereira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Divisão de Impactos, Adaptação e Vulnerabilidades

Ricardo Rütther

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Departamento de Engenharia Civil - Laboratório Fotovoltaica

6.8. Hidrogênio verde

Resumo. O óleo diesel é a principal fonte para a geração de energia elétrica nos Sistemas Isolados (SISOL) na Amazônia. Para além do aspecto econômico (elevados custos do diesel, de logística e de subsídios) e do aspecto ambiental (elevada emissão específica), a logística de transporte do combustível é um limitante para a confiabilidade no fornecimento de eletricidade às localidades atendidas pelo SISOL. O suprimento de combustível se dá principalmente por transporte fluvial e eventos de seca severa, como o ocorrido ao final de 2023, eleva o risco de desabastecimento e a necessidade de racionamento de energia nas localidades. Um exemplo dessa ocorrência foi em São Gabriel da Cachoeira, no estado do Amazonas, que possui o Rio Negro como principal meio de acesso. Em novembro de 2023, o rio atingiu o seu menor nível ao longo da série histórica avaliada, havendo impacto sobre a navegação. Eventos de seca mais intensos e frequentes tendem a ocorrer por efeito das mudanças climáticas, o que sinaliza para maior vulnerabilidade dos sistemas isolados a estes eventos e da população à falta de energia. Diante desse contexto, este trabalho avalia a substituição de combustíveis fósseis por recursos energéticos renováveis locais na matriz elétrica do SISOL. Para esta avaliação, considera-se uma planta híbrida solar fotovoltaica e hidrogênio verde (PV-H2V) suprimindo a potência gerada por diesel e gás natural. Os resultados indicam que o uso combinado das fontes renováveis pode ser uma estratégia de mitigação, em que ao menos 5,67 MtCO_{2eq} poderiam ser evitados no ano. Também, uma medida de adaptação dos sistemas naturais e humanos aos impactos das mudanças climáticas sobre os recursos naturais e energéticos. A demanda de água para a produção do hidrogênio não deverá ser um limitante para sua adoção na região amazônica, e poderá contribuir com a resiliência da região na geração de eletricidade.

Palavras-chave: Energia de Fontes Renováveis, Descarbonização, Sistemas Isolados

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte da produção e transmissão de energia elétrica se dá por meio do Sistema Interligado Nacional (SIN). Trata-se de um sistema hidro-solar-eólico-térmico de grande porte sob coordenação e controle do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o qual é fiscalizado e regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O sistema é constituído por quatro subsistemas elétricos - Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte, interconectados por meio da malha de transmissão. Isso permite atender aos consumidores conectados ao SIN com maior confiabilidade, vista a complementaridade entre regiões que reduz riscos de interrupção de energia (ONS, 2023). Já na região Norte do país, compreendendo vários estados que compõem a Amazônia Legal, razões técnicas e econômicas e até de natureza socioambientais, inviabilizam que algumas localidades sejam interligadas ao SIN, incluindo Boa Vista, capital do estado de Roraima. A essa capital e demais localidades não interligadas, a energia elétrica é então fornecida pelos chamados Sistemas Isolados (SISOL), conforme definido no Art. 2º do Decreto nº 7.246/2010 (Brasil, 2010).

Enquanto a fonte hidráulica predomina na oferta de eletricidade pelo SIN, o óleo diesel é a fonte de eletricidade predominante no SISOL. Além da elevada emissão específica do diesel (emissões de gases de efeito estufa (GEE) por unidade de energia, em gCO_{2eq}/kWh), o abastecimento do SISOL com esse combustível possui também elevado custo. Em parte devido ao próprio custo do diesel, mas também devido à logística de transporte e ao subsídio da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) - encargo pago pelos consumidores do SIN para subsidiar os custos da energia elétrica do SISOL (CCEE, 2022; ONS, 2022). Relativo à logística de transporte, o acesso para fornecimento do combustível se dá principalmente, ou exclusivamente, pelo modal de transporte fluvial. De modo a evitar a comprometer o suprimento de energia elétrica durante os períodos de estiagem, quando o acesso pelas vias fluviais fica comprometido, certas localidades precisam dispor de tanques de armazenamento de grande porte para estoque do combustível (EPE, 2022b).

No final de 2023 a Amazônia experimentou uma situação de seca severa, em especial o estado do Amazonas (AM) (CEMADEN, 2023; CPTEC/INPE, 2023; SGB/CPRM, 2023). Para além dos vários impactos ambientais, a situação de seca pode desencadear crises sociais e econômicas ao comprometer o fornecimento de bens e recursos (alimento, água e energia) às pessoas (Gonçalves *et al.*, 2021; Cumplido *et al.*, 2023). Em termos de energia elétrica, não apenas a geração pelas usinas hidrelétricas é impactada, mas o baixo nível dos rios também impacta o transporte de combustível para a geração de eletricidade nos sistemas isolados. A privação de energia elétrica, por sua vez, impacta a qualidade de vida das pessoas (Goldemberg, 2001), visto que a eletricidade é suporte aos serviços essenciais de saúde, educação, informação e nas atividades econômicas. O acesso à eletricidade permite, por exemplo, a iluminação para estudo ou trabalho no período noturno, refrigeração e conservação de alimentos e medicamentos, bombeamento de água, uso de computadores em escolas, aumento de produtividade e melhoria de renda (Mazzone, 2019; IEMA, 2020).

Evidências apontam que a situação de seca como a de 2023 é uma tendência já observada nos dados históricos e potencializada pelo fenômeno do El Niño (Marengo e Espinoza, 2015; CPTEC/INPE *et al.*, 2023). Projeções indicam que eventos de seca mais intensos e frequentes devem ocorrer por efeito das mudanças climáticas (Brêda *et al.*, 2020; ANA, 2023b), conjecturando para maior vulnerabilidade dos sistemas isolados a estes eventos e, por conseguinte, da população à falta de energia. De forma a reduzir as vulnerabilidades, contendo o risco de interrupções na oferta e no acesso à eletricidade nas localidades do SISOL, bem como reduzir as emissões de GEE, a modernização destes sistemas de energia por meio de recursos renováveis pode ter papel relevante (Nerini *et al.*, 2014; Sánchez *et al.*, 2015; Lombardi *et al.*, 2016; Alturki, 2022). Partindo-se desta hipótese, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a substituição de fontes fósseis por fontes renováveis, tanto em termos quantitativos de emissões de GEE como qualitativos da vulnerabilidade dos sistemas e da população.

Para a avaliação proposta, será considerada planta híbrida solar fotovoltaica (PV) e hidrogênio verde (H2V). A energia solar fotovoltaica (juntamente à eólica) tem se apresentado como uma das alternativas disponíveis mais baratas para geração de eletricidade e além de contribuir na mitigação das emissões por parte do setor de energia, pode contribuir também no atendimento a quase 800 milhões de pessoas no mundo, atualmente privadas de acesso à energia (IEA, 2023). No entanto, devido à intermitência e variabilidade natural da radiação solar, sujeita à influência do ciclo diurno e da condição meteorológica (Pereira e Martins, 2018), a geração de energia por meio dessa fonte (não-despachável) necessita sistemas híbridos (solar-diesel ou solar-hidráulico) ou ser amparada por tecnologias de armazenamento de energia, tais como baterias eletroquímicas ou hidrogênio, especificamente, o hidrogênio verde.

O hidrogênio verde é obtido por meio do processo químico de eletrólise da água, com a eletricidade para este processo advindo de fontes renováveis de eletricidade, tal como a fonte solar. Tem sido considerado um recurso estratégico para viabilizar a descarbonização da economia mundial, atuando como um vetor energético (armazenamento de energia) e como fonte de energia de baixo ou zero carbono em setores de difícil abatimento de emissões (Santos e Ohara, 2021). De acordo com *Hydrogen Council* (2021), o hidrogênio, como fonte de energia, é fundamental para o mundo alcançar as emissões líquidas zero até 2050, evitando a emissão de 80 Gt CO₂ até meados do século.

2. METODOLOGIA

Para avaliar a substituição do diesel e gás natural por planta híbrida PV-H2V (PV - solar fotovoltaica e H2V - hidrogênio verde) nos sistemas isolados na Amazônia, este estudo parte de uma revisão bibliográfica a fim de organizar as informações de estudos existentes, além de agregar dados sobre desempenho técnico e ambiental das diferentes tecnologias de geração avaliadas. Esta revisão contempla artigos e relatórios técnicos de instituições relacionadas ao setor de energia, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), além de consultas a bases de dados públicas, como os da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do portal do Porto de Manaus, que traz os dados mais recentes de nível d'água do Rio Negro (<https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=nivel-do-rio-negro-hoje>).

Na presente seção caracteriza-se a área de estudo e, na seção seguinte, abordam-se as características do sistema elétrico na Amazônia e as condições de acesso à eletricidade pela população na região, usando-se de série histórica de dados de nível do Rio Negro para ilustrar o comprometimento no abastecimento do diesel de uma das localidades no estado do Amazonas (São Gabriel da Cachoeira). Como os dados disponibilizados pela ANA não contemplam os meses mais recentes (dados disponíveis até fevereiro/2023), optou-se pelos dados no portal do Porto de Manaus. Este dado é atualizado diariamente e captura o considerável declínio na média do nível do Rio Negro a partir do mês de setembro/2023 em relação aos meses anteriores do presente ano, e em novembro/2023 comparado à série histórica disponível, de 2000-2023.

Também na seção seguinte são abordadas as características do hidrogênio verde e a possibilidade de aplicação combinada à energia solar fotovoltaica na região amazônica. Os valores de emissão por unidade de energia (em gCO_{2eq}/kWh) no ciclo de vida das tecnologias diesel e gás natural são baseadas em D'Adamo (2018) e da solar, em WWF-Brasil (2021). A emissão no ciclo de vida de produção do hidrogênio verde, por unidade de energia entregue pelo hidrogênio, é computada considerando valores de emissão para sua produção por fonte solar (em gCO_{2eq}/gH₂), densidade energética (kWh/gH₂) e eficiência do gerador (célula a combustível, moto gerador ou turbina a gás). Para a produção do hidrogênio verde, consideram-se as demandas de água e eletricidade, além da eficiência de “ida e volta” (*round trip efficiency* - eletricidade para produzir hidrogênio e este para produzir eletricidade) (IEA, 2019; Siemens Energy, 2021b; WWF-Brasil, 2021; Escamilla *et al.*, 2022). Demais premissas estão declaradas na seção 3.3.

Enquanto o potencial de mitigação das emissões se dá pelo cálculo com base na composição da matriz elétrica do SISOL, substituindo-se a potência atualmente gerada pelas fontes fósseis por fontes renováveis, o potencial de redução da vulnerabilidade do sistema e da população são tratadas de forma qualitativa com base nas premissas de independência de combustíveis fósseis e uso de recursos energéticos renováveis locais (Wimmler *et al.*, 2015).

2.1 Área de estudo

Criada pela Lei Federal nº 1.806/1953, a Amazônia Legal representa 59% do território nacional e, como ilustra a Fig. 1, abrange os sete estados da Região Norte do país – Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, a totalidade do estado do Mato Grosso, na Região Centro-Oeste, e parte do estado do Maranhão, na Região Nordeste. Abrange também parte dos biomas Cerrado e Pantanal e toda a área do bioma Amazônia, compreendendo a Floresta Amazônica e a Bacia Amazônica (a maior floresta tropical e a maior bacia hidrográfica do mundo, respectivamente) (Santos *et al.*, 2021). O Rio Amazonas, com mais de 80% localizado no Brasil, é um dos principais rios formadores da Bacia Amazônica e constitui a principal via de transporte fluvial da região (Amazon Waters, 2023a). Outras importantes bacias que compõem a Amazônia são as bacias do Juruá, do Madeira, do Negro, e do Purus (Amazon Waters, 2023b).

A população na Amazônia Legal é em torno de 27 milhões de habitantes, representando 13% da população brasileira (IBGE, 2023). De acordo com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) referente ao ano de 2021 (EPE, 2022c), a Região Norte é a responsável por quase 20% do total da capacidade instalada de geração de energia elétrica do país, e por aproximadamente 30% da geração hidrelétrica, a maior em relação às demais regiões. Ainda assim, estima-se que cerca de 990 mil pessoas na região amazônica não possuam acesso à eletricidade, equivalente a 3,5% da população dessa região. Esta fatia é composta por diferentes grupos sociodemográficos (povos indígenas, moradores de Unidades de Conservação, grupos de assentamentos humanos, quilombolas) (IEMA, 2020).

Na Fig. 1 também é mostrada a distribuição dos sistemas isolados na região amazônica. As características das localidades atendidas são diversas em termos de população, demanda de energia, capacidade do parque gerador etc. Existem, atualmente, sistemas com demanda de 2 kW, como em Maici, Rondônia (com 15 habitantes), a sistemas com demanda de 243 MW, como em Boa Vista, capital de Roraima (com população de 413 mil habitantes). O município de São Gabriel da Cachoeira, no estado do Amazonas e para o qual o Rio Negro é o principal meio de acesso, possui 51 mil habitantes e demanda de 8 MW (EPE, 2022b; IBGE, 2023).

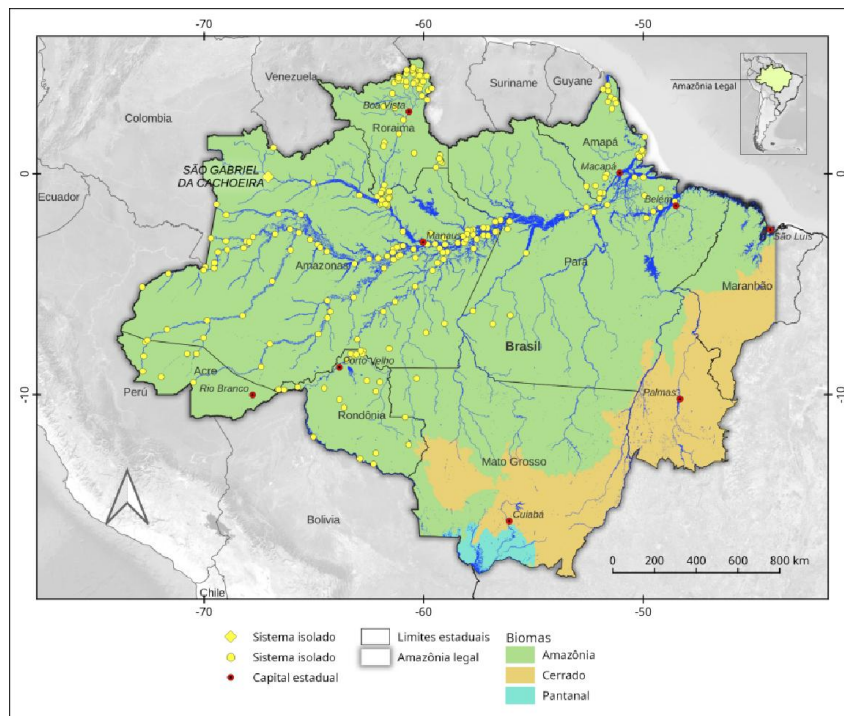


Figura 1 - Abrangência da Amazônia Legal sobre biomas e estados brasileiros e distribuição dos sistemas isolados.

3. ANÁLISES E DISCUSSÕES

3.1 Sistemas isolados e condições de acesso à eletricidade na Amazônia

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022b), na publicação do “Relatório de Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados, Horizonte 2023/2027 – Ciclo 2022”, aponta 212 sistemas isolados situados em vários estados

que compõem a Amazônia Legal e também na ilha de Fernando de Noronha, que pertence ao estado de Pernambuco. O ONS (2022), no “Plano Anual da Operação Energética dos Sistemas Isolados para 2023 – PEN SISOL 2023”, que considera apenas localidades que recebem reembolso da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), aponta 176 sistemas isolados nas mesmas localidades. Ambos contabilizam 8 distribuidoras no atendimento ao SISOL. A Tab. 1 apresenta o arranjo dos sistemas por estado e por distribuidora de energia elétrica responsável.

A participação percentual do SIN na carga total de energia no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB) é de 99,4%, a do SISOL é de apenas 0,6%. Ao considerar geração centralizada e distribuída no SIN, a matriz elétrica brasileira já atingiu praticamente 220 GW (ABSOLAR, 2023). Para o SISOL (Fig. 2), a potência instalada foi de aproximadamente 1,2 GW em 2022 e possui previsão de 1,4 GW até final de 2023, considerando o parque gerador existente, o planejado para entrada em operação, e previsões de interligação de sistemas isolados ao SIN. Apesar da considerável diferença entre os números apresentados para o SIN e SISOL, este atende a uma população de 3,1 milhões de habitantes e, como ao menos 176 localidades recebem reembolso da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), há grande impacto nas contas setoriais, R\$ 12 bilhões só em 2023 (CCEE, 2022; ONS, 2022). Ainda, com a elevada representatividade do diesel na geração de energia elétrica, o fator de emissão do SISOL supera o do SIN, em torno de 0,7 tCO₂/MWh contra 0,1 tCO₂/MWh em 2019 (Kamimura *et al.*, 2020; EPE, 2022b).

Tabela 1 - Número de sistemas isolados nos estados da região Norte e Pernambuco.

ESTADO	DISTRIBUIDORA	NÚMERO DE SISTEMAS	
		EPE (2022b)	ONS (2022)
Acre (AC)	Energisa Acre	7	7
Amapá (AP)	Equatorial Amapá	1	1
Amazonas (AM)	Amazonas Energia	97	94
Pará (PA)	Equatorial Pará	18	17
	Vibra Energia	2	2
Pernambuco (PE)	Neoenergia Pernambuco	1	1
Rondônia (RO)	Energisa Rondônia	13	12
Roraima (RR)	Roraima Energia	73	42

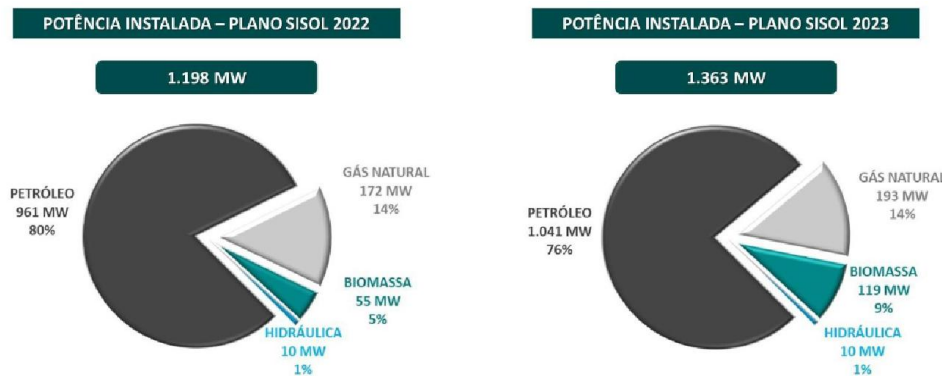


Figura 2 - Composição da matriz elétrica dos SISOL em 2022 e a prevista para 2023. Fonte: ONS (2022).

Mesmo os rios amazônicos fornecendo 87% dos 27 GW de hidroeletricidade acrescidos à matriz elétrica brasileira nos últimos 10 anos (IEMA, 2018), quase 1 milhão de pessoas na Amazônia não possuem acesso à eletricidade e para aquelas que possuem acesso através dos sistemas isolados, a disponibilidade muitas vezes é escassa e precária (IEMA, 2020; Schutze *et al.*, 2022). Como exemplo, dentre as 42 localidades no estado de Roraima, 30 recebem eletricidade durante menos de 12 horas por dia (ONS, 2022). A limitação no atendimento às localidades é potencializada em situações como a que ocorre no final de 2023, em que a seca expõe a vulnerabilidade do modelo de geração de energia dependente da importação de combustível fóssil.

A Fig. 3 mostra a série histórica das médias mensais (de novembro/2000 a novembro/2023) do nível do Rio Negro. Neste trecho foi reportado ponto de impacto sobre a navegação e comprometimento no abastecimento de diesel a São Gabriel da Cachoeira, localidade que já passa por racionamento de energia. Impactos sobre a navegação também foram reportados para os rios Juruá, Madeira, Purus e Solimões, afluentes do Rio Amazonas (CPTEC/INPE *et al.*, 2023). Nota-se que, em nov/2023, a cota do Rio Negro atingiu seu menor valor ao longo da série histórica. Esta evidência, aliada às tendências verificadas e projeções climáticas, sugerem que o suprimento de combustível para sistemas isolados por via fluvial pode se tornar inviável em estiagens futuras, elevando o risco de desabastecimento e o custo, devido a necessidade de maiores volumes de armazenamento nas localidades.

De um modo geral, os países possuem seus sistemas isolados categorizados como ilhas, áreas rurais ou regiões longínquas, com diferentes condições e tamanhos (Da Ponte *et al.*, 2021). Segundo Wimmmler *et al.* (2015), para a maioria das regiões isoladas, tecnologias que utilizam fontes de energia renovável combinadas com dispositivos de

armazenamento se apresentam como soluções desejáveis para o desenvolvimento sustentável. Conforme Wang *et al.* (2009), isso implica no equilíbrio entre as atividades sociais e econômicas e o meio ambiente. Como meio de alcançá-lo, Wimmeler *et al.* (2015) declaram que o uso de recursos locais abundantes deve ser incentivado, demandando redução dos combustíveis fósseis e da dependência de importações.

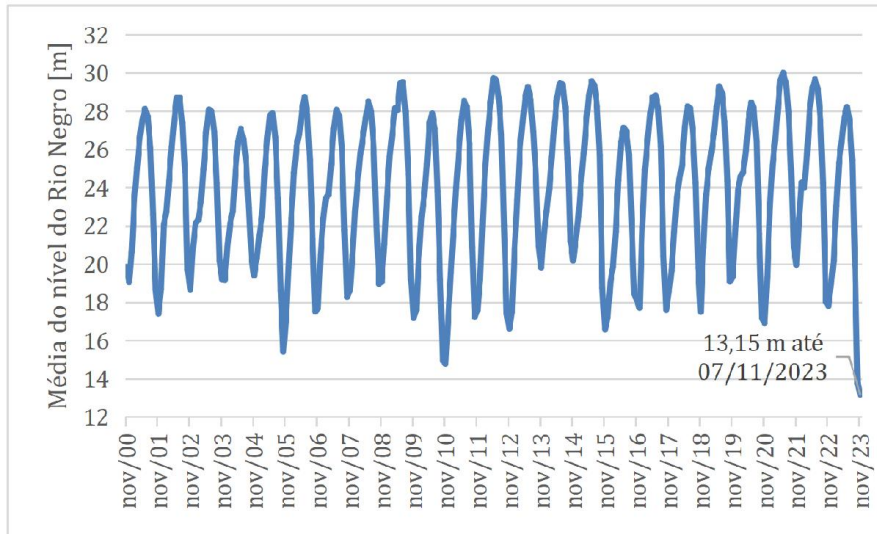


Figura 3 - Médias mensais do nível do Rio Negro, nov/2000 a nov/2023. Dados: Porto de Manaus (2023).

3.2 Hidrogênio verde e planta híbrida PV-H2V para geração de eletricidade

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo. No ambiente terrestre é muito escasso na sua forma molecular (H_2), porém é fartamente encontrado ligado a outro elemento, nos minerais que compõem a crosta terrestre ou na atmosfera e hidrosfera na forma de água, por exemplo. A molécula H_2 pode ser produzida a partir de diferentes matérias-primas (fontes primárias) mediante consumo de energia, através de rotas e processos diversos, para diferentes aplicações e oportunidades de uso (CGEE, 2022). A depender da rota tecnológica para sua obtenção ou produção, o hidrogênio tem sido alocado em um espectro de cores (EPE, 2021). Se obtido naturalmente é denominado hidrogênio branco; se produzido pela reforma a vapor do gás natural sem captura de carbono (CCUS - *Carbon Capture Utilisation and Storage*), tem-se o hidrogênio cinza; desse mesmo processo combinado a tecnologias CCUS, denomina-se hidrogênio azul; o hidrogênio musgo é o produzido a partir de biomassas ou biocombustíveis; se produzido via eletrólise da água com uso de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, eólica ou solar fotovoltaica (PV), é denominado hidrogênio verde (H2V).

No processo de eletrólise, processo químico que produz hidrogênio a partir da água e da eletricidade, utilizam-se dispositivos chamados eletrólises para a decomposição da água (H_2O) em hidrogênio (H, formando H_2) e oxigênio (O, formando O_2). O H_2 pode ser armazenado (como líquido, gás ou composto químico) e transportado e, por sua vez, convertido em energia elétrica quando na sua combustão em turbinas a gás, motores a combustão interna ou células a combustível (Siemens Energy, 2021a; IEA, 2022). É altamente reativo, com alto poder calorífico e versatilidade de uso. Além de estimular a construção de novas plantas de geração com fontes renováveis, pode atuar como um combustível livre de carbono (*carbon-free*) ou um vetor energético (Nikolaidis e Poullikkas, 2017).

Como combustível na geração por célula a combustível, por exemplo, o hidrogênio verde pode servir como uma alternativa primária na oferta de eletricidade (Siemens Energy, 2021a; EPE, 2022a; IEA, 2022). Como uma solução de armazenamento de energia, pode colaborar no maior aproveitamento das fontes renováveis não-despacháveis e contribuir para maior flexibilidade do sistema elétrico; as fontes eólica ou solar podem ser aproveitadas para a produção do H2V, do qual parte pode ser armazenado e utilizado para geração de eletricidade quando há escassez das outras fontes. Conforme comparações feitas por Patonia e Poudineh (2020), entre as técnicas de armazenamento atualmente disponíveis, o hidrogênio mostra-se uma das soluções mais promissoras.

Embora a concretização do uso energético do hidrogênio tenha desafios a serem superados nas cadeias de produção, transporte, armazenamento e consumo, o recurso tem tido relevância e prioridade nas estratégias energética e climática de vários países diante da urgência em reduzir suas emissões de GEE (MME, 2021; EPE, 2022a). Dentre os principais obstáculos para a maior oferta do hidrogênio verde, a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA, 2022) menciona o seu alto custo produtivo e de logística. Para que o H2V se torne mais competitivo, é necessária a redução nos custos de energia renovável e eletrólise, que está diretamente relacionada à maior implantação comercial dessas tecnologias (DNV, 2021a; Santos e Ohara, 2021) e isso, por sua vez, depende da própria disponibilidade local dos recursos energéticos renováveis. Por exemplo: para produzir 1 kg de hidrogênio por meio de eletrólise da água, demanda-se cerca de 9 litros de água (IEA, 2019; WWF-Brasil, 2023) e 55 kWh de energia elétrica (Siemens Energy, 2021b).

A energia solar fotovoltaica já é uma tecnologia competitiva em termos de custos e já está contribuindo na mitigação de emissões do setor de energia a curto prazo. Calado e Castro (2021) apontam a energia solar fotovoltaica, juntamente com a eólica *onshore*, como as fontes de eletricidade mais economicamente viáveis para a produção de hidrogênio verde. Dada a disponibilidade de recursos solar (Pereira *et al.*, 2017) e hídrico no Brasil (ANA, 2023a), enquanto o custo de produção do hidrogênio verde no mercado internacional pode alcançar 15,70 US\$/kgH₂, no país esse custo limita-se a 9,52 US\$/kgH₂ (WWF-Brasil, 2023), com indicação de que o custo nivelado do H₂V (LCOH) já pode se encontrar entre 2,87 e 3,56 US\$/kgH₂ (CELA, 2023) para produção em grande escala. Ainda, o Brasil tende a se destacar como o produtor com menor custo nos horizontes 2030 e 2050, podendo chegar a 0,55 US\$/kgH₂ (Piegas, 2021), também para a produção em grande escala.

Em termos de logística para fornecimento do hidrogênio, a opção pela produção distribuída (*off-grid*) e consumo no próprio local de produção (*onsite*) podem contornar desafios e custos relacionados ao transporte - eletrolisadores podem ser instalados próximos ao local de abastecimento ou consumo (EPE, 2021; Santos e Ohara, 2021). A DNV (2021b) estima que o hidrogênio verde compreenderá em torno de 60% do total do fornecimento de hidrogênio para fins energéticos até 2050, prevalecendo a geração por fontes renováveis *off-grid* (16% solar fotovoltaica, 16% eólica *onshore* e 9% eólica *offshore*).

Para o presente estudo, considera-se que a energia solar fotovoltaica, além de geração de eletricidade para as localidades atendidas pelos sistemas isolados, também pode atuar como a fonte de energia elétrica para a produção de hidrogênio verde. Este, é então armazenado para contínua e posterior geração de eletricidade quando na indisponibilidade do recurso solar (acumulação de longo prazo), juntamente com o uso de baterias de íons de lítio (acumulação de curto prazo). Dessa forma, configura-se uma planta híbrida PV-H₂V de geração e fornecimento de eletricidade no SISOL. O diagrama esquemático na Fig. 4 mostra a interação entre cada componente da planta PV-H₂V.

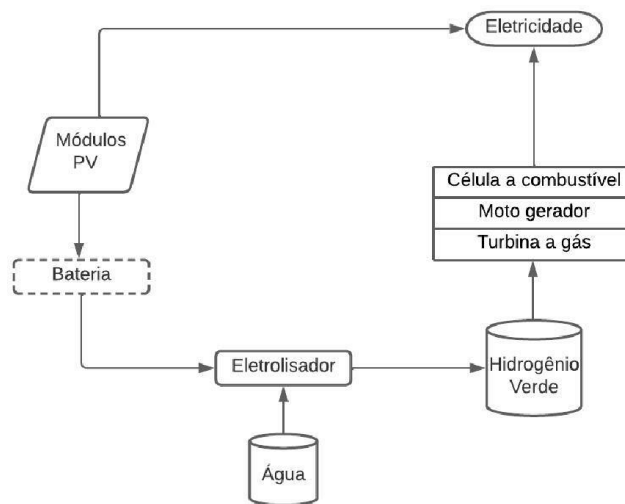


Figura 4 - Diagrama esquemático da planta híbrida PV-H₂V para geração de eletricidade no SISOL.

3.3 Potencial para aplicação da planta híbrida PV-H₂V na Amazônia

Conforme anteriormente apresentado, os rios são comumente o meio de acesso para abastecimento dos sistemas isolados e a água é recurso essencial para a produção do hidrogênio verde. No entanto, ao considerar um cenário hipotético, em que toda a eletricidade de origem fóssil fosse gerada pelo hidrogênio verde (H₂V/Pot.Total = 100 na Fig. 5), o consumo de água não superaria os 7.000.000 m³ por ano para cobrir a potência instalada das térmicas no SISOL em 2022 (1.133 MW). Para fins de comparação, a vazão típica do Rio Negro é 28.000 m³/s e do Rio Amazonas, 209.000 m³/s. Isso implicaria dizer que, no cenário hipotético, bastariam em torno de 4 e 0,5 minutos, respectivamente, das vazões dos rios Negro e Amazonas para obter o volume de água necessário para produzir H₂V, o qual atenderia a demanda de energia dos sistemas isolados ao longo de um ano. Resta claro que a demanda de água para eletrólise é muito inferior à disponibilidade hídrica da região amazônica (da ordem de 10⁻⁵ - 10⁻⁶). Mesmo em estiagens extremas, este não deve ser um fator limitante para a adoção do H₂V na região.

A Fig. 5 traz, em conjunto com as estimativas de demanda de água para diferentes proporções entre as fontes solar e hidrogênio verde, as estimativas de emissões que poderiam ser evitadas na implantação de planta híbrida PV-H₂V na matriz elétrica do SISOL. Para tanto, a potência gerada pelas térmicas a óleo diesel e gás natural em 2022 (Fig. 2) foi substituída pelas fontes renováveis, partindo-se das seguintes premissas: (i) produção e consumo local de hidrogênio verde; (ii) energia solar fotovoltaica gera eletricidade diretamente para consumo e também para o processo de eletrólise da água (Fig. 4); (iii) produção de 1 kg de H₂ demanda 55 kWh e 9 litros de água, e 1 kg de H₂ gera 33 kWh; (iv) *round trip efficiency* de 22% e eficiência do gerador de 40%; (v) ao longo do ciclo de vida, o diesel emite cerca de 824 gCO_{2eq}/kWh, o gás natural emite cerca de 568 gCO_{2eq}/kWh, a solar fotovoltaica emite, em média, 40 gCO_{2eq}/kWh, e o hidrogênio verde emite em torno de 32 gCO_{2eq}/kWh; (vi) as emissões do ciclo de vida da solar fotovoltaica para produção do hidrogênio verde são desagregadas das emissões do ciclo de vida do hidrogênio; (vii) o gerador e a bateria

de íon de lítio não são considerados nas análises de emissões; (viii) considera-se a potência instalada do SISOL sem agregar o fator de capacidade das usinas.

Na Fig. 5, o eixo horizontal se refere à alocação do hidrogênio verde em relação à potência total (Pot.Total) da planta híbrida PV-H2V, onde: $x = H2V/Pot.Total = 0$ significa que não há participação do hidrogênio na geração de eletricidade; $H2V/Pot.Total = 10$ significa que 10% da geração de eletricidade provém do hidrogênio e 90% da solar; e assim até o cenário hipotético $H2V/Pot.Total = 100$, em que toda a eletricidade provém do hidrogênio e a solar participa apenas do processo de eletrólise. Observa-se nesta Fig. 5 que, com aumento da participação do H2V na planta híbrida PV-H2V, tem-se o aumento da demanda por água e aumento nas emissões de CO_{2eq} (emissão evitada reduz). O aumento na demanda por água é esperado, uma vez que mais hidrogênio é produzido pelo processo de eletrólise. Já o aumento nas emissões pode ser melhor explicado pela Fig. 6, onde são mostradas as contribuições nas emissões da composição da planta híbrida: ‘emissão PV’ é a contribuição da planta solar fotovoltaica na geração de eletricidade direta para consumo; ‘emissão PV (para H2V)’ refere-se à contribuição da planta solar na geração de eletricidade para eletrólise da água; a soma das duas primeiras é ‘emissão PV (total)’; e ‘emissão H2V’ refere-se à contribuição na geração de eletricidade pela planta de hidrogênio.

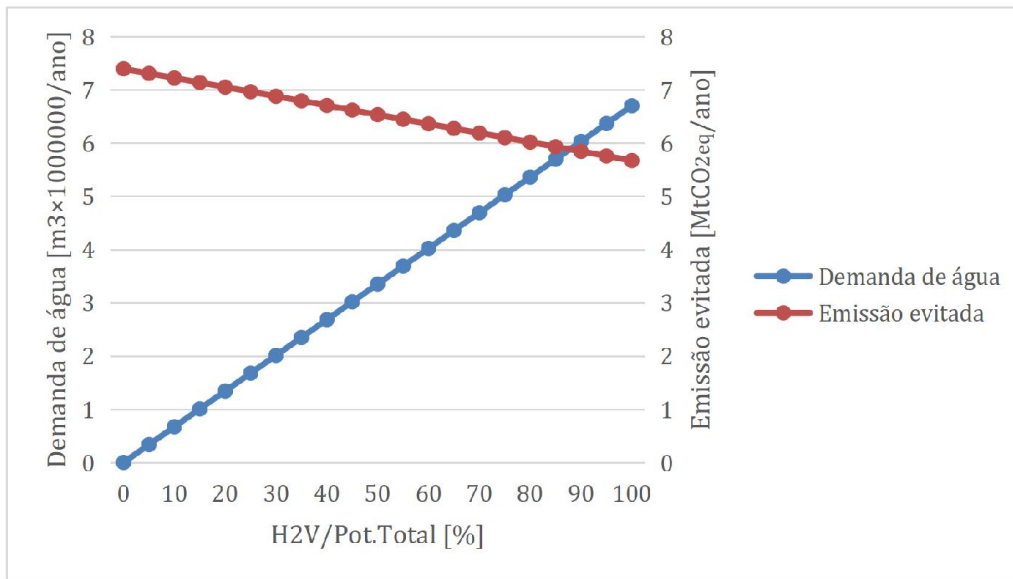


Figura 5 - Demanda de água e emissão evitada por hora em função da fração de H2V na geração de eletricidade.

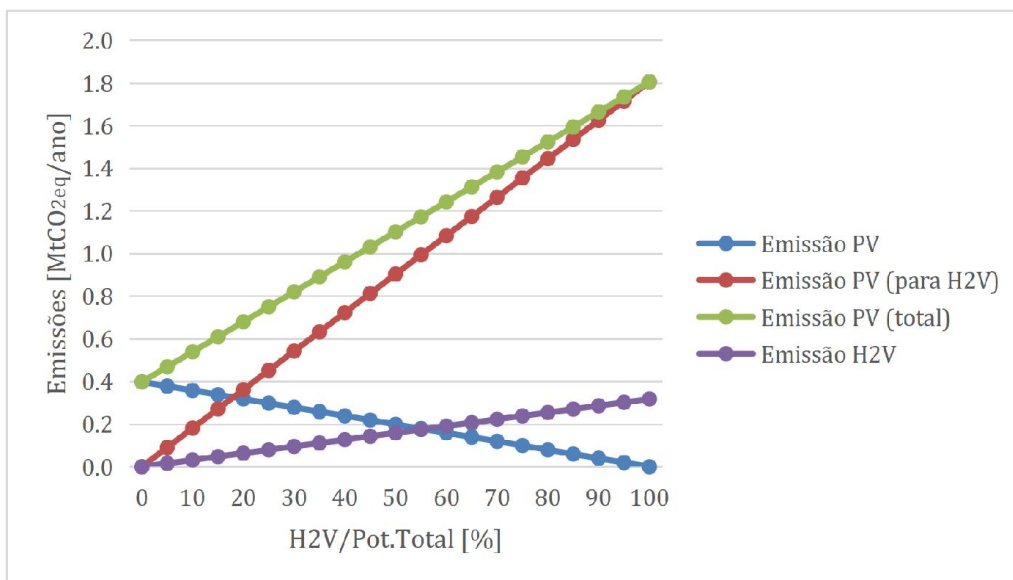


Figura 6 - Emissões por hora da planta híbrida em função da fração H2V na geração de eletricidade.

A ‘emissão PV (para H2V)’ é a que possui maior sensibilidade na alteração da proporção entre H2V e PV na planta, de modo que define a curva ‘emissão PV (total)’. Com o aumento da participação do hidrogênio, maior a proporção de solar fotovoltaica dedicada à eletrólise, sendo o aumento das emissões mais associado à planta PV para produção do hidrogênio do que à planta H2V propriamente. Em outras palavras, a tecnologia do hidrogênio possui

baixa contribuição nas emissões ao longo do ciclo de vida da sua produção. Mesmo no cenário hipotético, em que o hidrogênio geraria toda a eletricidade, apenas 15% das emissões provêm da planta H2V (0,32 MtCO_{2eq}/ano) e o restante das emissões (1,80 MtCO_{2eq}/ano), da planta PV para sua produção.

Agora comparativamente ao atual modelo de geração, supondo novamente o cenário hipotético em substituição à potência gerada pelo diesel e gás natural, a emissão evitada seria de 5,67 MtCO_{2eq} por ano, o equivalente a uma redução de 73% das emissões dos combustíveis fósseis. Em uma outra proporção, como 75% H2V e 25% PV na planta híbrida, a emissão evitada seria de 6,10 MtCO_{2eq} por ano (redução de 78% das emissões). Com 50% de cada fonte renovável compondo a planta híbrida, 6,53 MtCO_{2eq} por ano seriam evitados (84% a menos nas emissões).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A situação de seca na Amazônia expõe a vulnerabilidade do atual modelo de geração de energia em sistemas isolados na região, em sua maioria dependente do suprimento de combustível fóssil através de transporte fluvial. De forma a minimizar os riscos de interrupção na geração pelos sistemas e do acesso à eletricidade pela população, além de reduzir as emissões de GEE, o presente trabalho avaliou a substituição do óleo diesel e gás natural na matriz elétrica do SISOL por planta híbrida solar fotovoltaica e hidrogênio verde (PV-H2V). Ao considerar a potência gerada pelas térmicas fósseis em 2022 sendo suprida pela planta híbrida PV-H2V, em variadas proporções entre as fontes renováveis, o estudo apresentou as estimativas de demanda de água e de emissões evitadas. Os resultados mostraram que a demanda de água para eletrólise não deve ser um fator limitante para a adoção do H2V na região e que ao menos 5,67 MtCO_{2eq} poderiam ter sido evitados no ano de 2022.

O modelo de geração de energia proposto neste trabalho busca contribuir com a diversificação da matriz, permite complementaridade entre fontes e comporta a geração contínua por fontes renováveis. Por sua vez, tende a promover maior segurança do sistema elétrico, reduzindo sua vulnerabilidade à interrupção na geração de energia pelo uso de recursos locais. Por se tratar de um modelo que proporciona reduzir e substituir o consumo de combustíveis fósseis, o mesmo pode ser caracterizado como uma medida de mitigação para limitação das emissões de GEE, bem como de adaptação dos sistemas naturais e humanos aos impactos das mudanças do clima sobre os recursos naturais e energéticos. Com uso de recursos energéticos renováveis locais (independência de combustíveis fósseis), pode-se aumentar a resiliência da região amazônica pela promoção da sustentabilidade econômica e ambiental na geração de eletricidade.

O presente estudo foca na avaliação de uma planta híbrida PV-H2V e não extrapola a análise para outras alternativas tecnológicas de fontes renováveis. Além disso, não se aprofunda na necessidade de uso de baterias de íons de lítio (Li) associadas à PV, e suas características de desempenho técnico e ambiental não são contempladas nas análises das emissões evitadas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (nº 88887.601215/2021-00) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Bolsa de Produtividade (nº 310148/2020-0). Os autores agradecem pelo financiamento recebido através dos projetos: “Avaliação do recurso fotovoltaico em reservatórios hidroelétricos com base em modelagem numérica e sensoriamento remoto” (CNPq 409711/2021-7), INCT-Mudanças Climáticas Fase 2 (FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1, CAPES/FAPS 16/2014), e FINEP “SOLTER - União por difusão de metais leves em acumuladores de energia solar compactos para a geração de eletricidade por fonte termossolar no Brasil” (nº 0018/21). Os autores também agradecem pelo apoio de Sílvia V. Pereira, ao LABREN-INPE (Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e ao FOTOVOLTAICA-UFSC (Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina).

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR, 2023. Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. Matriz elétrica brasileira. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>>. Acesso em: 19/09/2023.
- Alturki, A. A., 2022. Optimal design for a hybrid microgrid-hydrogen storage facility in Saudi Arabia, *Energy, Sustainability and Society*, vol. 12, n. 1, pp. 24.
- Amazon Waters, 2023a. Eixo Principal. Disponível em: <<https://pt.aguasamazonicas.org/bacia/canal-principal-do-amazonas/eixo-principal/>>. Acesso em: 09/05/2023.
- Amazon Waters, 2023b. Bacias Principais. Disponível em: <<https://pt.aguasamazonicas.org/bacia/bacias-principais/>>. Acesso em: 29/10/2023.
- ANA, 2023a. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2022: informe anual. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
- ANA, 2023b. Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos do Brasil. Março, 2023. Brasília: ANA.

- Brasil, 2010. Decreto nº 7.246, de 28 de julho de 2010. Regulamenta a Lei no 12.111, de 9 de dezembro de 2009, que dispõe sobre o serviço de energia elétrica dos Sistemas Isolados, as instalações de transmissão de interligações internacionais no Sistema Interligado Nacional - SIN, e dá outras providências. Diário Oficial da União, seção: 1, Brasília, DF, nº 144.
- Brêda, J. P. L. F., De Paiva, R. C. D., Collischon, W., Bravo, J. M., Siqueira, V. A., Steinke, E. B., 2020. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, vol. 159, n. 4, pp. 503-522.
- Calado, G., Castro, R., 2021. Hydrogen Production from Offshore Wind Parks: Current Situation and Future Perspectives. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n. 12, pp. 5561.
- CCEE, 2022. Premissas Orçamentárias das Contas Setoriais 2023. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica.
- CGEE, 2022. Informe Inovação em Soluções Energéticas Sustentáveis – Informe ISES. Primeira edição – Hidrogênio renovável. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- CEMADEN, 2023. Boletim Setembro/2023: Monitoramento de Secas e Impactos no Brasil. Ano 04, n. 64, 22p. São José dos Campos: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.
- CPTEC/INPE, 2023. Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Outubro, 2023. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/spi/pt>>. Acesso em: 24/10/2023.
- CPTEC/INPE, INMET, ANA, CENAD, 2023. Boletim Mensal Nº 02: Painel El-Niño 2023-2024. Outubro, 2023. 32p.
- CELA, 2023. Custo Nivelado de Hidrogênio Verde no Brasil: Índice LCOH Brasil da CELA. Agosto, 2023. *Clean Energy Latin America*.
- Cumplido, M. A., Inocente, M. C., Medeiros, T. P., Sampaio, G., Marengo, J. A., 2023. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 32, n. 19, pp. 129-153.
- Da Ponte, G. P.; Calili, R. F.; Souza, R. C., 2021. Energy generation in Brazilian isolated systems: Challenges and proposals for increasing the share of renewables based on a multicriteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, vol. 61, pp. 74-88.
- D'Adamo, I., 2018. The Profitability of Residential Photovoltaic Systems. A New Scheme of Subsidies Based on the Price of CO2 in a Developed PV Market. *Social Sciences*, vol. 7, n. 9, pp. 148.
- DNV, 2021a. Energy Transition Outlook 2021 (ETO 2021): Technology Progress Report.
- DNV, 2021b. Energy Transition Outlook 2021 (ETO 2021). Oslo: Det Norske Veritas.
- EPE, 2021. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. Nota Técnica Nº EPE-DEA-NT-003/2021. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE, 2022a. Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 (PDE 2031). Brasília: Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE, 2022b. Planejamento do atendimento aos Sistemas Isolados - Horizonte 2023-2027 - Ciclo 2022. Nº EPE-DEE-NT-102/2022-r0. Rio de Janeiro: EPE.
- EPE, 2022c. Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021 (BEN 2022). Rio de Janeiro: EPE.
- Escamilla, A., Sánchez, D., García-Rodríguez, L., 2022. Assessment of power-to-power renewable energy storage based on the smart integration of hydrogen and micro gas turbine technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, pp. 17505-17525.
- Goldemberg, J., 2001. Energy and Human Well-being. In: United Nations Development Programme. *Human Development Reports*.
- Gonçalves, S. T. N., Vasconcelos Junior, F. Das C., Sakamoto, M. S., Silveira, C. Da S., Martins, E. S. P. R. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, vol. 36, n. 3 (suplemento), pp. 495-511.
- Hydrogen Council, 2021. Hydrogen for Net-Zero - A critical cost-competitive energy vector. November, 2021. Disponível em: <<https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-for-net-zero/>>. Acesso em: 03/05/2022.
- IBGE, 2023. Censo Demográfico 2022. Relação da população dos municípios de 2022 com base nos dados divulgados nos Primeiros Resultados de População e Domicílios. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- IEA, 2019. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities. IEA Report prepared for the G20, Japan.
- IEA, 2022. ETP Clean Energy Technology Guide. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>>. Acesso em: 18/11/2022.
- IEA, 2023. World Energy Outlook (WEO) 2023. International Energy Agency .
- IEMA, 2018. Acesso aos serviços de energia elétrica nas comunidades isoladas da Amazônia: mapeamento jurídico-institucional. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente.
- IEMA, 2020. Exclusão Elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica?. São Paulo: IEMA.
- IRENA, 2022. Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Kamimura, A. M., Rupp, R. F., Fossati, M., Lamberts, R., 2020. Relatório: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações. UFSC: Florianópolis, Brazil.
- Lombardi, P., Sokolnikova, T., Suslov, K., Voropai, N., Styczynski, Z. A., 2016. Isolated power system in Russia: A chance for renewable energies? *Renewable Energy*, vol. 90, pp. 532-541.

- Marengo, J. A., Espinoza, J. C., 2015. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, vol. 36, n. 3, pp. 1033-1050.
- Mazzone, A., 2019. Decentralised energy systems and sustainable livelihoods, what are the links? Evidence from two isolated villages of the Brazilian Amazon. *Energy and Buildings*, vol. 186, pp. 138-146.
- MME, 2021. PNH2 Programa Nacional do Hidrogênio - Proposta de Diretrizes. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Nerini, F. F., Howells, M., Bazilian, M., Gomez, M. F., 2014. Rural electrification options in the Brazilian Amazon: A multi-criteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, vol. 20, pp. 36-48, 2014.
- Nikolaidis, P., Poullikkas, A., 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 597-611.
- ONS, 2022. Plano Anual da Operação Energética dos Sistemas Isolados para 2023 (PEN SISOL 2023). RT-ONS DPL 0528/2022. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- ONS, 2023. O que é o SIN? O Sistema Interligado Nacional. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 18/07/2023.
- Patonia, A., Poudineh, R., 2020. Ammonia as a storage solution for future decarbonized energy systems. *Oxford for Energy Studies*, n. 42. OIES Paper: EL.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., 2018. Capítulo I: Energia Solar - O Potencial Brasileiro. Fascículo Renováveis, pp. 42-49.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. J. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed., vol. 1, 80p. São José dos Campos: INPE.
- Piegas, J. D., 2021. Custos de Hidrogênio: Perspectivas no longo prazo - Gas Energy. Agosto, 2021. Disponível em: <<https://gasenergy.com.br/custos-de-hidrogenio-perspectivas-no-longo-prazo/>>.
- Porto de Manaus, 2023. Nível do Rio Negro. Disponível em: <<https://www.portodemanau.com.br/?pagina=nivel-do-rio-negro- hoje>>. Acesso em: 07/11/2023.
- Sánchez, A. S., Torres, E. A., Kalid, R. A., 2015. Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 278-290.
- Santos, D., Salomão, R., Veríssimo, A., 2021. Fatos da Amazônia 2021. Amazônia 2030. Centro de Empreendedorismo da Amazônia/Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAIZON).
- Santos, V., Ohara, A., 2021. Desafios e Oportunidades para o Brasil com Hidrogênio Verde. Heinrich Böll Stiftung.
- SGB/CPRM, 2023. 48º Boletim de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas. Novembro, 2023. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/publique/Hidrologia/Eventos-Criticos/Seca-na-Regiao-Amazonica-8328.html>>. Acesso em: 10/11/2023.
- Schutze, A., Bines, L., Assunção, J., 2022. Rios de Diesel na Amazônia Legal: Por que a Região com as Maiores Hidrelétricas do País Depende de Combustível Caro e Poluente? Rio de Janeiro: PUC-Rio..
- Siemens Energy, 2021a. Power-to-X: The crucial business on the way to a carbon-free world.
- Siemens Energy, 2021b. Hydrogen infrastructure – the pillar of energy transition: The practical conversion of long-distance gas networks to hydrogen operation.
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Zhao, J.-H., 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2263-2278.
- Wimmler, C., Hejazi, G., Oliveira Fernandes, E., Moreira, C., Connors, S., 2015. Multi-criteria decision support methods for renewable energy systems on islands. *Journal of Clean Energy Technologies*, vol. 3, n. 3, pp. 185-195.
- WWF-Brasil, 2023. Rotas para a produção de hidrogênio sustentável no Brasil - análise ambiental e econômica. 19p.

PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY COMBINED WITH GREEN HYDROGEN: A STRATEGY TO REDUCE EMISSIONS AND VULNERABILITY IN THE AMAZON

Abstract. Diesel fuel is the main source of electricity generation in the isolated systems (SISOL) in the Amazon. In addition to the economic aspect (high diesel, logistics and subsidies costs) and the environmental aspect (high specific emissions), the logistics of transporting the fuel is a limiting factor for the reliability of electricity supply to the locations served by SISOL. Fuel is mainly transported by river, and severe droughts, such as the one that occurred at the end of 2023, increase the risk of shortages and the need for energy rationing in the locations. A case in point is São Gabriel da Cachoeira, in the state of Amazonas and which has the Rio Negro as its main access route. In November 2023, the river reached its lowest level in the historical series evaluated, with consequences for navigation. As a result of climate change, droughts are expected to become more intense and frequent, which will increase the vulnerability of isolated systems to these events and the population to energy shortages. In this context, this work evaluates the replacement of fossil fuels with local renewable energy resources in the SISOL power matrix. For this evaluation, a solar photovoltaic and green hydrogen (PV-H₂V) hybrid system is considered to supply the electricity generated by diesel and natural gas. The results indicate that the combined use of renewable energy sources could be a mitigation strategy that could avoid at least 5.67 MtCO_{2eq} per year. It is also an adaptation measure to natural and human systems to the impacts of climate change on natural and energy resources. The demand for water for hydrogen production should not be a limiting factor for its adoption in the Amazon region and could contribute to the region's resilience in electricity generation.

Keywords: Renewable Energy, Decarbonization, Isolated Systems