

ANÁLISE DO FATOR DE ENERGIA PRIMÁRIA, EMISSÃO E INTENSIDADE DO USO DO SOLO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM HIDROGÊNIO EM PAÍSES SUL-AMERICANOS

Fabiana de Marqui Mantovan^{1,2}

Paulo Smith Schneider^{1,2}

Jordão Gheller Junior²

Carmem Rosane Isse Gomes²

Leandro Machado de Carvalho³

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros

³Universidade Federal de Santa Maria

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.941

RESUMO

O Hidrogênio (H₂) se destaca como uma alternativa para armazenar eletricidade excedente em uma cadeia associada com produção de H₂ em eletrolizadores, seu armazenamento e posterior reconversão em eletricidade em células a combustível. O presente trabalho avalia a viabilidade do emprego desta cadeia na geração elétrica no Brasil, Argentina, Chile e Paraguai, avaliada pelas métricas de fator de energia primária (FEP), fator de emissão da matriz elétrica (FEME) e intensidade do uso da terra (I). Paraguai e Brasil apresentam os menores FEPs para a cadeia do H₂ devido à predominância da hidroeletricidade (4,5 ± 1,0 MWh_p/MWh_e e 5,6 ± 1,1 MWh_p/MWh_e, respectivamente), seguido pela Argentina (6,6 ± 0,7 MWh_p/MWh_e), com significativa geração baseada em gás natural, e o Chile, com o indicador mais elevado (7,6 ± 0,9 MWh_p/MWh_e), em função da baixa eficiência de conversão da energia solar. O desempenho da cadeia depende mais da eficiência de conversão dos sistemas do que da natureza renovável ou fóssil das fontes. Os menores valores de FEME são registrados no Brasil (84,0 ± 12,0 kg CO_{2-eq}/MWh) e no Paraguai (21,1 ± 16,9 kg CO_{2-eq}/MWh), mas eles são penalizados pelo maior uso de terra (191,0 ± 64,1 m²/MWh e 201,8 ± 99,5 m²/MWh, respectivamente), em contraste com o Chile (111,9 ± 28,3 m²/MWh) e a Argentina (78,4 ± 22,3 m²/MWh). O Brasil e o Paraguai podem se beneficiar do uso do H₂ devido à maior eficiência e mais baixa emissão de sua geração elétrica, tornando-o uma de suas estratégias para alcançar a transição energética.

Palavras-chave: Hidrogênio; Eletricidade; Cadeia de conversão energética; Emissões de gases de efeito estufa; Intensidade energética do uso da terra.

ABSTRACT

Hydrogen (H_2) stands out as an alternative for storing surplus electricity in a chain associated with the production of H_2 in electrolyzers, its storage and subsequent reconversion into electricity in fuel cells. This study evaluates the feasibility of using this chain in electricity generation in Brazil, Argentina, Chile and Paraguay, using the metrics of primary energy factor (PEF), the electrical matrix emission factor (EMEF) and the intensity of land use (I). Paraguay and Brazil have the lowest FEPs for the H_2 chain due to the predominance of hydroelectricity (4.5 ± 1.0 MWh_p/MWh_e and 5.6 ± 1.1 MWh_p/MWh_e , respectively), followed by Argentina (6.6 ± 0.7 MWh_p/MWh_e), with significant generation based on natural gas, and Chile, with the highest value (7.6 ± 0.9 MWh_p/MWh_e), due to the low conversion efficiency of solar energy. The performance of the chain depends more on the conversion efficiency of the systems than on the renewable or fossil nature of the sources. The lowest EMEF values are recorded in Brazil (84.0 ± 12.0 $kg\ CO_{2-eq}/MWh$) and Paraguay (21.1 ± 16.9 $kg\ CO_{2-eq}/MWh$), but they are penalized by higher land use (191.0 ± 64.1 m^2/MWh and 201.8 ± 99.5 m^2/MWh , respectively), in contrast to Chile (111.9 ± 28.3 m^2/MWh) and Argentina (78.4 ± 22.3 m^2/MWh). Brazil and Paraguay can benefit from the use of H_2 due to the greater efficiency and lower emissions of its electricity generation, making it one of their strategies for achieving the energy transition.

Keywords: Hydrogen; Electricity; Energy conversion chain; Greenhouse gas emissions; Land use energy intensity.

1. INTRODUÇÃO

O Hidrogênio (H_2) é um transportador de energia flexível com potencial de aplicação em todos os setores de energia (IEA, 2015). No final de 2021, quase 47% da sua produção mundial era proveniente do gás natural, 27% do carvão, 22% do petróleo e apenas 4% da eletrólise (IRENA, 2022). O H_2 na sua composição não contém carbono, no entanto, pode ter uma pegada de carbono significativa devido às emissões ao longo do seu ciclo de vida, determinada pela fonte de energia primária e pelo processo de produção, que devem ser contabilizados para quantificar os benefícios climáticos (IEA, 2015).

Dentre os métodos de produção do H_2 , o maior destaque está sendo dado ao H_2 verde, produzido a partir da eletrólise da água com o uso de energia elétrica renovável (INSTITUTO E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA, 2022). A compreensão dos efeitos do uso da terra para o fornecimento de energia elétrica representa uma papel fundamental no planejamento dos sistemas energéticos, juntamente com outros fatores, como impactos ambientais, qualidade da saúde pública, emis-

sões de gases de efeito estufa (GEE), acessibilidade e segurança energética (LOVERING et al., 2022).

Considerando as opções mais viáveis atualmente, o H₂ pode ser utilizado diretamente com o ar (oxigênio) em uma célula a combustível para produção de energia elétrica (TASHIE-LEWIS; NNABUIFE, 2021). As características da tecnologia de conversão influenciam o desempenho desse sistema, sendo necessário analisar a eficiência para garantir um fornecimento sustentável e econômico.

Neste sentido, o presente trabalho avalia o fator de energia primária (FEP), o fator de emissão da matriz elétrica (FEME) e a intensidade do uso da terra (I) na produção de energia elétrica pelo uso do H₂, considerando a matriz elétrica do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O FEP é utilizado para diferentes propósitos na política energética no âmbito da União Europeia e também nacionalmente: como um fator de conversão para relacionar o uso de energia final ao consumo de energia primária, para definir e comparar a eficiência de dispositivos que utilizam diferentes portadores/fontes de energia e o seu potencial de economia de energia, bem como avaliar o desempenho energético de edifícios (COGEN EUROPE, 2017). Existem cinco métodos para calcular o FEP, e dentre eles o utilizado neste trabalho foi o método de eficiência técnica de conversão. Este método utiliza a eficiência técnica de conversão entre a fonte de energia e a eletricidade para calcular a demanda da fonte primária por unidade de energia gerada (STOFFREGEN; SCHULLER, 2014).

As emissões dos GEE do setor de energia ocorrem nas etapas de produção, transformação, transporte e consumo de energia, estando divididas em dois subsetores: emissões por queima de combustíveis e emissões fugitivas. As estimativas são provenientes da abordagem setorial (*bottom-up*), que utiliza informações sobre o consumo de combustíveis por setor energético, multiplicado pelos fatores de emissão correspondentes (MCTI, 2022). Os fatores de emissões aqui utilizados são os publicados nos relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), e tomados como base para as estimativas das emissões para o Brasil, sendo considerados o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), que são os mais relevantes para este setor (EPE, 2022).

A intensidade energética do uso da terra é definida como a área ocupada por unidade de produção de energia produzida (LOVERING et al., 2022). Ela tem duas classificações: uso direto e indireto. O uso direto é o uso do terreno para a instalação e ocupação da unidade de geração de eletricidade. Por outro lado, o uso indireto é a ocupação do solo para extração, produção e transporte da matéria prima para

produção da energia, como quando há culturas energéticas (MCDONALD et al., 2009; UNCCD; IRENA, 2017; LOVERING et al., 2022).

3. METODOLOGIA

A cadeia estudada para a avaliação da geração de energia elétrica por H₂ considera a geração de energia elétrica a partir de diversas fontes de energia primária, renováveis e não renováveis, o sistema de transmissão e distribuição, a produção de H₂ por eletrolisadores, o seu armazenamento e posterior conversão em eletricidade por meio da célula a combustível.

Para estudo desta cadeia foram considerados quatro países: o Brasil, com uma matriz composta majoritariamente por hidroelétricas e energia eólica, a Argentina, que possui matriz elétrica fóssil com significativo uso do gás natural, o Chile, com uma matriz renovável baseada na geração hídrica e solar, e o Paraguai, com uma matriz predominantemente hidroelétrica.

3.1 Fator de Energia Primária (FEP)

O cálculo do FEP foi realizado através do método de eficiência técnica de conversão (STOFFREGEN; SCHULLER, 2014). O cálculo do FEP (MWhp/MWhe) para a cadeia estudada foi feito pelo emprego da Equação (1).

$$PEF = \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4} \quad (1)$$

onde η_1 é a eficiência da matriz elétrica considerando o sistema de transmissão e distribuição, η_2 é a eficiência do eletrolizador, η_3 é a eficiência do sistema de armazenamento e η_4 é a eficiência da célula a combustível. A eficiência da matriz elétrica pode ser calculada considerando a participação de cada fonte primária e a sua parcela de contribuição, conforme apresentado na Equação (2).

$$\eta_1 = \sum x_i \eta_i \eta_T \eta_D \quad (2)$$

onde x_i é a participação da fonte primária na matriz elétrica, η_i é a eficiência de conversão da fonte primária, $\eta_T = 0,96$ que corresponde a eficiência de transmissão (ANEEL, 2023) e $\eta_D = 0,83$ é a eficiência de distribuição (ANEEL, 2023).

As eficiências de conversão das fontes primárias foram consideradas de acordo com dados da literatura, em que a hidrelétrica cor-

responde a $75,0 \pm 15,0\%$ (PRABOWO; SUDIARTO, 2021), eólica a $40,0 \pm 5,0\%$ (GHENAI, 2012), solar com $15,5 \pm 1,5\%$ (EPE, 2016), gás natural com $51,0 \pm 6,0\%$ (STORM, 2020), biomassa com $26,0 \pm 10,0\%$ (IEA-ETSAP; IRENA, 2015), derivados de petróleo com $38,0 \pm 8,0\%$ (GRAUS; VOOGT; WORRELL, 2007), nuclear com $34,0 \pm 1,0\%$ (OBARA; TANAKA, 2021) e carvão com $35 \pm 6\%$ (GRAUS; VOOGT; WORRELL, 2007).

A eficiência do eletrolisador foi obtida através da média das eficiências dos eletrolisadores alcalino, de $72,0 \pm 10,0\%$ (SMOLINKA,; GÜNTHE; GARCHE, 2011), membrana de troca de prótons (Proton Exchange Membrane - PEM), de $74,5 \pm 7,5\%$ (SMOLINKA; GÜNTHE; GARCHE, 2011), e de óxido sólido (OS), de $87,5 \pm 2,5\%$ (IEA, 2015). Para acumulação do H_2 , um sistema de armazenamento em cilindros à pressão de 70 MPa, com eficiência de $85,5 \pm 5,5\%$ (IEA, 2015), foi adotado. Por último, a eficiência da célula a combustível foi calculada com base na média das eficiências da célula alcalina e PEM, no valor de $55,0 \pm 5,0\%$ (ETT et al., 2002; MULDER et al., 2008; IEA, 2015), e da OS, de $60,0 \pm 10\%$ (IEA, 2015).

3.2 Fator de emissão da matriz elétrica (FEME)

A emissão de dióxido de carbono equivalente (CO_{2-eq}) foi calculada de acordo com as Diretrizes do IPCC (2006), conforme apresentado na Equação (3).

$$Emiss\tilde{a}o_{CO_{2-eq}} = \sum FE EE_{kWh} \quad (3)$$

onde $Emiss\tilde{a}o_{CO_{2-eq}}$ é a emissão do CO_{2-eq} (gCO_{2-eq}), FE é o fator de emissão da fonte primária (gCO_{2-eq} / kWh) e EE é a energia elétrica produzida pela fonte (kWh).

Os valores do fator de emissão para as fontes primárias utilizados foram $21,0 \pm 17,0 gCO_{2-eq} / kWh$ para hidrelétrica com reservatório, $14,0 \pm 6,0 gCO_{2-eq} / kWh$ para eólica, $485,0 \pm 63,0 gCO_{2-eq} / kWh$ para gás natural, $45,0 \pm 29,0 gCO_{2-eq} / kWh$ para biomassa, $812,0 \pm 90,0 gCO_{2-eq} / kWh$ para derivados do petróleo e $26,5 \pm 18,5 gCO_{2-eq} / kWh$ para nuclear, segundo o relatório Edenhofer et al. (2011) e considerando os valores do intervalo interquartil do bloxplot. Já no relatório de Schlömer et al. (2014) foi publicado que o fator de emissão da energia solar é de $43,0 \pm 17,0 gCO_{2-eq} / kWh$ e para a geração a carvão $825,0 \pm 85,0 gCO_{2-eq} / kWh$.

Os fatores de emissão utilizados têm como referência os relatórios do IPCC. A primeira versão foi publicada em 1996 e revisada em 2006 (EPE, 2022). No entanto, os dados aqui utilizados são de relató-

rios mais recentes, que são baseados em vários trabalhos considerando as emissões de GEE no ciclo de vida da geração de eletricidade (EDENHOFER et al., 2011; SCHLÖMER et al., 2014). Além disso, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), os fatores de emissão estimados em $\text{gCO}_2\text{-eq/kWh}$ levam em consideração a eficiência térmica de conversão. Para calcular o FEME ($\text{gCO}_2\text{-eq/MWh}$) foi considerada a emissão de $\text{CO}_2\text{-eq}$ proveniente da matriz elétrica e a geração na matriz elétrica (EE_{MWh}), em MWh, como apresentado na Equação 4.

$$FEME = \frac{\text{Emissão } CO_2 \text{ eq}}{EE_{MWh}} \quad (4)$$

3.3 Intensidade energética do uso da terra da matriz elétrica

A extensão territorial dedicada à geração de energia elétrica foi estimada da Equação (5).

$$A = \sum LUIE EE_{MWh} \quad (5)$$

onde A é a área utilizada para produção de energia elétrica (m^2) e $LUIE$ é a intensidade energética do uso da terra de cada fonte primária (m^2/MWh).

Os valores da intensidade energética do uso da terra são de $200,0 \pm 100,0 \text{ m}^2/\text{MWh}$ para hidrelétrica (UNCCD; IRENA, 2017), $150,0 \pm 60,0 \text{ m}^2/\text{MWh}$ para eólica, $21,0 \pm 4,3 \text{ m}^2/\text{MWh}$ para solar e $19,0 \pm 14,0 \text{ m}^2/\text{MWh}$ para gás natural, segundo Lovering et al. (2022), considerando os valores do intervalo interquartil. Para biomassa foi adotado $543,5 \pm 110,5 \text{ m}^2/\text{MWh}$, para derivados do petróleo $44,7 \pm 12,0 \text{ m}^2/\text{MWh}$, para nuclear $2,4 \pm 0,5 \text{ m}^2/\text{MWh}$ e para carvão $9,8 \pm 7,3 \text{ m}^2/\text{MWh}$ (MCDO-NALD et al., 2009).

Os dados foram selecionados a partir do levantamento de vários trabalhos acadêmicos e relatórios institucionais. O valor do índice da $LUIE$ das fontes primárias foi escolhido com base nos dados que apresentavam uma ordem de grandeza similar aos de outros autores e que incluíam informações reais de várias unidades geradoras de energia elétrica localizadas em diferentes regiões. Para calcular a intensidade energética do uso da terra da matriz elétrica (I), em m^2/MWh , foi utilizada a área territorial para produção de energia elétrica e a produção de energia elétrica total em um ano, conforme apresentado na Equação 6.

$$I = \frac{A}{EE_{MWh}} \quad (6)$$

3.4 Matriz elétrica do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai

As matrizes elétricas estudadas neste trabalho foram as do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai. A matriz elétrica brasileira foi definida com base nos dados coletados no Balanço Energético Nacional (EPE, 2023), enquanto as matrizes dos demais países foram obtidas a partir dos dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2025). Na Tabela 1 são apresentadas as matrizes elétricas desses países, em percentual e em TWh.

Tabela 1 – Matriz elétrica do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai

Referência	Brasil		Argentina		Chile		Paraguai	
	(EPE, 2023)		(IEA, 2025)		(IEA, 2025)		(IEA, 2025)	
Fonte	(%)	TWh	(%)	TWh	(%)	TWh	(%)	TWh
Hidrelétrica	63,9 ^a	427,1	20,2	29,5	26,6	23,3	99,5	43,9
Eólica	11,8	81,6	9,7	14,2	10,8	9,5	0	0
Solar	4,4	30,1	2,0	2,9	20,2	17,7	0	0
Gás Natural	6,1	42,0	48,8	71,0	15,4	13,5	0	0
Biomassa	8,0 ^b	54,6 ^b	1,6 ^c	2,3 ^c	6,0 ^c	5,2 ^c	0,5 ^c	227,0 ^c
Derivados do Petróleo	1,8 ^d	7,8 ^d	10,3	15,1	2,9	2,6	0	1,0
Nuclear	2,1	14,6	5,5	7,9	0	0	0	0
Carvão	2,1 ^e	19,3 ^e	1,8	2,7	17,3	15,2	0	0
Outras fontes ^f					0,9	0,8		

^a Inclui importação; ^b Inclui bagaço de cana de açúcar, lenha, lixívia e outras fontes renováveis; ^c Inclui bio-combustíveis; ^d Inclui óleo combustível e óleo diesel; ^e Inclui carvão mineral, gás coqueria e outras fontes não renováveis; ^f Inclui energia solar térmica e geotérmica.

3.5 Análise de incerteza

Análise de incerteza é um procedimento pelo qual se estima a propagação do desvio padrão de uma grandeza Y a partir do desvio padrão de suas variáveis independentes, conforme apresentado na Equação (7).

$$U_Y = \left[\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} U_{X_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} U_{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_n} U_{X_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

onde Y é a função de “n” variáveis independentes, U_Y é a incerteza de Y, X_n é a enésima variável independente e U_{X_n} é a incerteza da enésima variável independente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para as três métricas escolhidas para avaliar a viabilidade do emprego da cadeia de H₂ para produção de energia elétrica no Brasil, Argentina, Chile e Paraguai estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz elétrica do Brasil, Argentina, Chile e Paraguai

Métricas	Unidade	Brasil	Argentina	Chile	Paraguai
FEP	MWh _p /MWh _e	5,6 ± 1,1	6,6 ± 0,7	7,6 ± 0,9	4,5 ± 1,0
FEME	kg CO ₂ -eq/MWh	84,0 ± 12,0	344,1 ± 32,3	259,4 ± 18,8	21,1 ± 16,9
I	m ² /MWh	191,0 ± 64,1	78,4 ± 22,3	111,9 ± 28,3	201,8 ± 99,5

O Paraguai apresenta o menor FEP entre os países analisados, devido à sua matriz elétrica ser praticamente 100% renovável, baseada na geração hidrelétrica. Esse cenário é o mais eficiente para a adoção da cadeia de conversão do H₂ para produção de eletricidade, pois demanda menos energia primária para abastecer a cadeia.

O Brasil possui um PEF intermediário, mesmo tendo sua matriz elétrica predominantemente renovável, mas com participação da hidroeletricidade inferior ao do Paraguai, de aproximadamente 64%.

O Chile apresentou o maior FEP devido à sua matriz elétrica ser composta por 26,6% de geração hídrica e 20,2% de energia solar. A baixa eficiência de conversão da energia solar e sua elevada participação contribuiu para o aumento do FEP do país.

A Argentina apresentou um FEP inferior ao estimado para o Chile, mesmo com uma matriz elétrica predominante fóssil, com o gás natural representando 48,8% da geração de eletricidade. Isso ocorreu pois o fator de conversão do gás natural é superior ao da energia solar, como indicado na seção 3.1.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2015) divulgou a eficiência de diferentes sistemas de armazenamento do H₂, incluindo a geração de energia elétrica. Segundo a agência, o processo possui uma eficiência de conversão na faixa de 20 a 30%, considerando 100% de eficiência na matriz elétrica. Esses valores, quando transformados para o FEP, representam índices de 3,3 e 5 MWh_p/MWh_e. Essa faixa apresenta valores próximos aos estimados para o Brasil e o Paraguai, considerando a eficiência de conversão da matriz elétrica na análise da cadeia.

O Paraguai apresenta o menor FEME em comparação com os demais países, sendo considerada uma matriz elétrica de menor emissão de GEE por unidade de energia elétrica gerada. Para o Our World in Data (2025), o Paraguai emitiu 24 kg CO₂-eq/MWh em 2023, valor próximo ao encontrado neste trabalho.

O Brasil e o Paraguai apresentam os menores valores de FEME. Em termos absolutos, na geração de eletricidade o Brasil emitiu 56,9 milhões de toneladas de CO_{2-eq}, frente aos 0,9 milhão de toneladas de CO_{2-eq} emitidos pelo Paraguai. Essa diferença é resultado da geração fóssil no Brasil, que ainda corresponde por 11,9% da sua matriz elétrica, e da magnitude da geração de eletricidade em cada país, com o Brasil gerando 677,1 TWh e o Paraguai 44,1 TWh. Segundo o *Our World in Data* (2025), o Brasil tem intensidade de carbono de 106 kg CO_{2-eq}/MWh, ou 61,7 kg CO_{2-eq}/MWh, segundo a EPE (2023).

A Argentina apresenta o maior FEME devido à maior contribuição de fontes não renováveis na sua matriz elétrica. O valor é próximo ao divulgado por *Our World in Data* (2025), de 395 kg CO_{2-eq}/MWh para o ano de 2022.

O Chile, apesar de ter fontes hidrelétrica e solar em sua matriz, possui uma significativa contribuição de fontes não renováveis na geração, como o carvão (17,3%) e o gás natural (15,4%). O FEME encontrado para o país é semelhante ao divulgado pelo *Our World in Data* (2025), 291 kg CO_{2-eq}/MWh.

A Argentina tem o menor uso da terra para geração de energia elétrica em comparação com os demais países, devido à participação de fontes não renováveis. Em contrapartida, o Brasil e o Paraguai apresentam valores próximos e elevados do uso da terra, já que ambos têm uma matriz elétrica predominantemente renovável. O Brasil com grande participação na matriz elétrica das gerações hidrelétrica e eólica, e o Paraguai pela geração majoritária hidrelétrica.

5. CONCLUSÃO

As métricas de fator de energia primária (FEP), emissões de CO_{2-eq} (FEME) e extensão territorial (I) foram empregadas para avaliar o emprego do H₂ no armazenamento de energia elétrica em quatro países da América do Sul. O Paraguai apresenta os melhores resultados de FEP e FEME devido à alta eficiência de conversão da geração hidrelétrica e às baixas emissões de GEE associadas a essa fonte. A Argentina registrou o menor uso da terra devido à utilização de fontes não renováveis, com maior densidade energética, apesar de apresentar valores maiores nas outras métricas.

O armazenamento do H₂ eletrolítico associado à geração elétrica com fontes predominantemente renováveis, como nos casos do Brasil, Chile e Paraguai, demonstra potencial de redução das emissões CO_{2-eq}. Essas fontes de energia, com menores emissões de gases nocivos ao meio ambiente, desempenham um papel crucial no combate às alterações climáticas. Embora as fontes renováveis demandem uma maior extensão territorial devido à menor densidade energética, em alguns casos, como os da eólica e solar, parte da área pode ser

aproveitada para culturas agrícolas ou criação de rebanho, promovendo benefícios econômicos adicionais e uma abordagem mais integrada.

O Chile e a Argentina possuem altos valores de FEP, o que penaliza o armazenamento do H₂ e posterior geração de energia elétrica. Os resultados agregados dependem mais da eficiência dos sistemas de conversão do que da natureza renovável ou fóssil das fontes, uma vez que o Paraguai apresenta um FEP menor do que Brasil e Chile, apesar dos três países possuírem uma matriz elétrica predominantemente renovável. Mesmo assim, sempre haverá uma penalização associada, independentemente da natureza da matriz elétrica, pois a cadeia do H₂ tem ineficiências, computadas em 37,1% neste estudo. Entre os países analisados, o Brasil e o Paraguai se destacam pelas elevadas eficiências de conversão, podendo se beneficiar do uso do H₂ para armazenamento de eletricidade, como parte de suas estratégias para alcançar a transição energética.

6. AGRADECIMENTOS

Fabiana de Marqui Mantovan agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do seu doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2023). Perdas de Energia. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia/perdas-de-energia>>. Acesso em: 21 abr. 2024.

COGEN EUROPE (2017). EU Primary Energy Factor for Electricity: key to ensure well-informed choices, achieve real energy savings and reduce consumer energy bills. [S.l.]. Disponível em: <https://www.cogeneurope.eu/images/2017_05_26_COGEN_Europe_Primary_Energy_Factor_Position.pdf>

EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; IPCC - INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. Renewable energy sources and climate change mitigation: summary for policymakers and technical summary. Genebra: IPCC, 2011.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GEE nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE. Rio de Janeiro: EPE, dez. 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>>. Acesso em: 9 maio. 2024.

ETT, G.; JANÓLIO, G.; ETT, V.; EBESUI, A. M.; VULCANO, G.; JUNQUEIRA, M. S. D. Geração de energia elétrica distribuída a partir de célula a combustível. Anais do Quarto Encontro de Energia no Meio Rural 2002, Campinas, SP, 2002.

GHENAI, C. Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - Manufacturing and Environment. [S.l.]: InTech, 2012.

GRAUS, W. H. J.; VOOGT, M.; WORRELL, E. International comparison of energy efficiency of fossil power generation. Energy Policy, v. 35, n. 7, p. 3936–3951, 1 jul. 2007.

IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. [S.l.], 2015. Disponível em:< <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e669e0b6-148c-4d5c-816b-a7661301fa96/TechnologyRoadmapHydrogenandFuelCells.pdf>>.

IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY (2025). Countries & Regions. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.iea.org/countries>>. Acesso em: 30 janeiro. 2025.

IEA- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY - ETSAP - ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS ANALYSIS PROGRAMME; IRENA - INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Biomass for Heat and Power: Technology Brief. [S.l.: S.N.], 2015.

INSTITUTO E+ TRANSIÇÃO ENERGÉTICA. Descarbonização do Setor de Energia no Brasil. Rio de Janeiro/RJ: [S.N.], 2022.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL OF CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2 - Energy. Chapter 2: Stationary Combustion. [S.l.: S.N.], 2006.

IRENA - INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2022). Hydrogen. [S.l.]. Disponível em: <<https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>>. Acesso em: 18 maio. 2024.

LOVERING, J.; SWAIN, M.; BLOMQUIST, L.; HERNANDEZ, R. R. Land-use intensity of electricity production and tomorrow's energy landscape. PLOS ONE, v. 17, n. 7, p. e0270155, 6 jul. 2022.

MCDONALD, R. I.; FARGIONE, J.; KIESECKER, J.; MILLER, W. M.; POWELL, J. Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America. PLoS ONE, v. 4, n. 8, p. e6802, 26 ago. 2009.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Esufa no Brasil. Brasília: S.N., 2022. 137 p.

MULDER, G.; COENEN, P.; MARTENS, A.; SPAEPEN, J. Market-ready Stationary 6 kW Generator with Alkaline Fuel Cells. ECS Transactions, v. 12, n. 1, p. 743–753, 2 maio 2008.

OBARA, S.; TANAKA, R. Waste heat recovery system for nuclear power plants using the gas hydrate heat cycle. Applied Energy, v. 292, p. 116667, 15 jun. 2021.

OUR WORLD IN DATA (2025). Carbon intensity of electricity generation. [S.I.]. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=~BRA>>. Acesso em: 30 janeiro. 2025.

PRABOWO, H.; SUDIARTO, B. Technical and financial analysis of a mini-hydro power plant 2x500 kW Bandung Regency, Indonesia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 1098, n. 4, p. 042073, 1 mar. 2021.

SCHLÖMER, S.; BRUCKNER, T.; FULTON, L.; HERTWICH, E.; MCKINNON, A.; PERCZYK, D.; ROY, J.; SCHAEFFER, R.; SIMS, R.; SMITH, P.; WISER, R. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.I.: S.N.], 2014. 28 p.

SMOLINKA, T.; GÜNTHE, M.; GARCHE, J. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Technologiefortschreibung der Elektrolysetechnik. Berlin: [S.N.], 2011. Disponível em: <<https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now-studie-wasserelektrolyse-2011.pdf>>

STOFFREGEN, A.; SCHULLER, O. Primary Energy Demand of Renewable Energy Carriers - Part 1: Definitions and accounting methods. [S.I.: S.N.], 2014.

STORM, K. Chapter 6 - Combined cycle power plant (1x1) labor estimate. Em: STORM, K. (Ed.). Industrial Construction Estimating Manual. [S.I.] Gulf Professional Publishing, 2020. 95–159 p.

TASHIE-LEWIS, B. C.; NNABUIFE, S. G. Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, v. 8, p. 100172, nov. 2021.

UNCCD - UNITED NATIONS CONVENTION TO COMBAT DESERTIFICATION; IRENA - INTERNACIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Energy and Land use*. Darmstadt, Gothenburg, Armidale, Oak Ridge, Stockholm, Wageningen, Nairobi, Durban, United Kingdom: Margie Peters-Fawcett, 2017.