

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS HÍBRIDOS BASEADAS EM ENERGIAS RENOVÁVEIS PARA COMUNIDADES ISOLADAS: PVDI208-2021 - Simulação e Otimização de Sistemas Híbridos Isolados de Geração de Energia Elétrica com Base em Energias Renováveis

Tarcísio de O. Klein¹ (IC), Diego Mauricio Yepes Maya¹
¹Universidade Federal de Itajubá

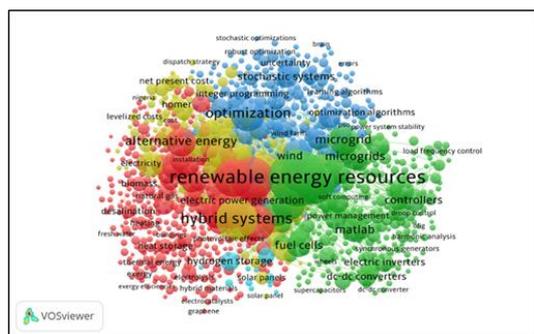
Palavras-chave: Energia renovável, iHOGA, Brasil.

Introdução

A pesquisa foca na criação de modelos de sistemas híbridos de energia renovável para atender comunidades remotas desconectadas da rede elétrica nacional no Brasil. O objetivo é ampliar essa simulação para várias áreas isoladas no país, considerando os capitais energéticos locais para garantir a viabilidade. Na atualidade, existe uma necessidade de realizar análises energéticas que sejam abrangentes a mais de uma comunidade ou localidade, logo, que utilizem o mínimo de dados disponíveis e ainda sim seja o suficiente para suprir as necessidades dos habitantes. Utiliza software especializado, dados de satélite (como NASA Power Data) e o software iHOGA® para dimensionar sistemas energéticos. O estudo prático foi realizado na Reserva Extrativista Lago do Cuniã, no Amazonas, explorando um sistema híbrido composto de energia solar, eólica, armazenamento de baterias de íon de lítio, eletrolisador, célula de combustível e geradores a diesel para fornecer energia confiável. Isso permitiu uma análise mais abrangente das opções de distribuição de energia em comunidades remotas em todo o país.

Também, visando compreender o foco das pesquisas da atualidade realizou-se uma análise bibliométrica como na Figura 1.

Figura 1 – Análise bibliométrica de 2018 a 2023. Palavras-chave: renewable E energy E hybrid E systems (análise conduzida em junho de 2023).



Os termos predominantes na análise estão relacionados a tecnologias de energia, com destaque para o custo presente líquido e o uso de algoritmos de otimização. No entanto, observa-se uma lacuna na análise socioambiental dos sistemas híbridos, o que levou à inclusão de uma avaliação de impacto inspirada no estudo de Roy et al. (2022), examinando os efeitos do projeto na vida humana, nos ecossistemas e na geração de empregos.

Metodologia

Uma etapa crucial é a escolha do local, que se baseia nas informações fornecidas pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) por meio do WebMap, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Sistemas de energia isolados (destacados em amarelo) registrados no Brasil.



Fonte: WebMap EPE, 2023.

Observa-se, nesse caso, que todos os pontos amarelos seriam comunidades desconectadas do Sistema Interligado Nacional dentro do território brasileiro.

Assim, optou-se por escolher locais na Região Norte do Brasil que fossem social e economicamente adequados para a implementação de sistemas híbridos de energias renováveis, com foco na Reserva Extrativista Lago do Cuniã devido à disponibilidade de informações em documentos institucionais, o que proporcionou uma

análise mais abrangente e compatível com a realidade local. Para garantir a confiabilidade dos resultados, todos os parâmetros do software iHOGA foram ajustados, incluindo demanda, recursos naturais, equipamentos e fatores econômicos, com base em estudos atualizados. O dimensionamento do sistema teve como foco a minimização dos custos presentes líquidos (CPL), pois a viabilidade econômica é crucial na fase de implementação.

No contexto da Reserva Extrativista Lago do Cuniã, foi realizada uma análise multiobjetivo, buscando otimizar simultaneamente as emissões de dióxido de carbono e o custo presente líquido. Essa série de simulações não apenas ajudou a compreender os fatores que mais afetam os equipamentos de geração de energia renovável, mas também explorou o ambiente de simulação, identificando convergências e divergências nos resultados.

Além disso, considerando todo o território nacional e as comunidades isoladas mapeadas pela EPE, começou-se a desenvolver uma metodologia que dividiria o Brasil em uma grade, sendo essa abordagem um produto novo do projeto que permitiria vislumbrar a elaboração de sistemas híbridos contribuindo para as pesquisas futuras e permitindo a avaliação da implementação de redes híbridas em áreas com características semelhantes.

Por fim, investigou-se a viabilidade e o impacto da inclusão de uma turbina de queda ultra baixa no sistema híbrido de energia renovável estabelecido para a RESEX Lago do Cuniã.

Resultados e discussão

Os componentes listados na Tabela 1 representam a configuração ideal de um sistema híbrido de energia renovável projetado para atender às demandas da Reserva Extrativista Lago do Cuniã, considerando sua localização específica.

Tabela 1 – Equipamentos selecionados para o sistema ótimo.

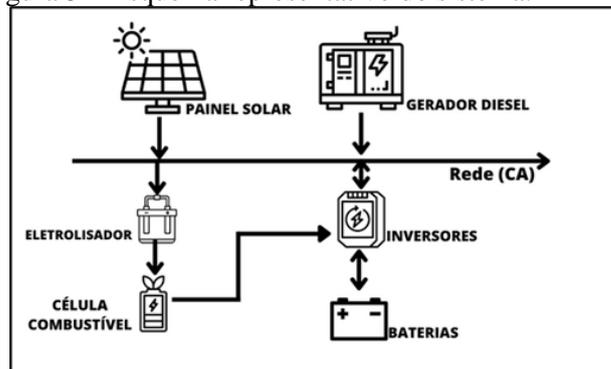
Equipamentos	Modelo	Potência
Painéis Fotovoltaicos (PF)	PV100	100kWp
Baterias (BT)	Bat240kWh	0,24MWh
Turbinas Eólicas (TE)	-	-
Geradores Diesel (GD)	Diesel50kW	50KVA
Célula de Combustível (CdC)	FuelCell1kW	1kW
Eletrolizador (EZ)	Elyzer2kW	2kW
Inversor (INV)	Inv-Ch75kW	75kW

Fonte: Klein et al. (2023).

É importante destacar que a não inclusão de uma turbina eólica no sistema se deve às velocidades de vento baixas na região, o que resulta em um potencial limitado de geração de energia eólica. Além disso, a representação do

sistema pode ser visualizada como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema representativo do sistema.



Fonte: Klein et al. (2023).

Vale ressaltar que os inversores operam de forma bidirecional, permitindo tanto o armazenamento quanto o fornecimento de energia elétrica para a rede simultaneamente. Quanto ao Valor Presente Líquido (VPL), bem como às emissões de dióxido de carbono e outros aspectos inerentes ao sistema, todos esses dados estão consolidados na Tabela 2.

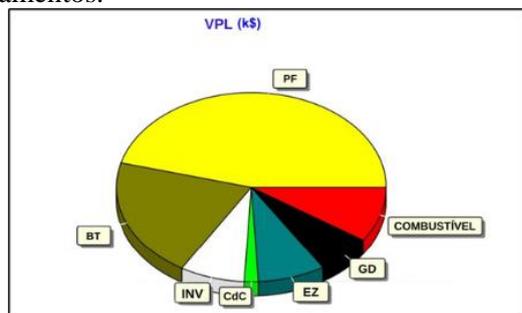
Tabela 2 – Conjunto de parâmetros para a melhor solução encontrada.

Variável	Valor
VPL	174,395k\$
Custo Nivelado da Energia	0,18\$/kWh
Investimento Inicial	221,25k\$
Horas de Gerador por Ano	346,67h/ano
Emissão Total de CO ₂	10,24t CO ₂ /ano

Fonte: Klein et al. (2023).

Os valores monetários obtidos são dados em dólar americano (cotado em 4,98 R\$, segundo Bolsa de Valores Brasileira em 08/09/2023). Na atual situação, o Custo Nivelado de Energia (CNDE), também conhecido como *Levelized Cost of Energy*, está em linha com as análises mais recentes em sistemas híbridos, conforme estabelecido por Roy et al. (2022), apresentando um valor de 0,1967 \$/kWh. Além disso, existe potencial para otimizar as emissões de CO₂, uma vez que o arranjo híbrido ideal, que maximiza o Valor Presente Líquido (VPL), é composto principalmente por fontes renováveis, totalizando 95,65%. Nesse cenário, os geradores são usados apenas quando as fontes renováveis não conseguem atender à demanda, correspondendo às Horas de Gerador por Ano. Outra abordagem para avaliar os custos é examinar individualmente cada equipamento, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição do custo em relação aos equipamentos.



Fonte: Klein et al. (2023).

Em muitos casos, o armazenamento de íon de lítio é apropriado para garantir a distribuição contínua de eletricidade, quando os painéis solares recarregam as baterias com o excesso de energia. Isso torna o sistema de armazenamento um componente significativo tanto em termos de custos quanto de balanço anual de energia, ocupando a segunda posição em importância.

Além disso, a contribuição limitada dos geradores, eletrolisador e célula de combustível tem um efeito direto na estratégia de controle otimizada estabelecida para o Sistema Híbrido de Energia Renovável. Do ponto de vista ambiental, a interconexão dos dispositivos permite avaliar as implicações do projeto simulado, a fim de compreender seu impacto tanto na vida humana quanto nos ecossistemas terrestres e aquáticos. A Tabela 3 revela claramente como as espécies são afetadas e de que forma a saúde humana é influenciada pelas emissões de dióxido de carbono. Enquanto isso, a perspectiva social é abordada na Tabela 4, que discrimina os efeitos do sistema na geração de empregos.

Tabela 3 – Indicadores ambientais do impacto da emissão de dióxido de carbono.

Indicadores	Impacto
AVAI	$2,20 \cdot 10^{-2}$
Espécies Aquáticas por Ano	$3,93 \cdot 10^{-10}$
Espécies Terrestres por Ano	$1,44 \cdot 10^{-4}$

Fonte: Klein et al. (2023).

Tabela 4 – Empregos gerados pela implementação do sistema.

Equipamentos	Empregos Gerados
Painéis Fotovoltaicos	0,270
Geradores Diesel	0,024
Célula de Combustível	0,001
Total	0,295

Fonte: Klein et al. (2023).

Com base nos dados, o sistema geraria poucos empregos diretos. No entanto, isso pode ser influenciado pela

necessidade de supervisão, manutenção e pela possível criação de oportunidades locais devido ao acesso à energia elétrica.

Uma perspectiva alternativa para avaliar o impacto social do projeto na reserva é através do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), com base na disponibilidade de energia elétrica para a comunidade. Com um consumo médio anual de aproximadamente 88,377 MWh/ano, o cálculo do IDH resulta em 0,496. É importante observar que esse valor é classificado como "muito baixo" (UNDP, 2022). No entanto, o município de Pauini-AM, com uma população estimada de 19.616 pessoas, possui um IDH com o mesmo valor (IBGE, 2010), o que coloca a RESEX Lago do Cuniã em uma situação comparável a outras cidades da região.

Considerando os dados e características do sistema híbrido de energia renovável (SHER) obtidos pelo software iHOGA, é possível otimizá-lo com ajustes na forma de armazenamento de energia e até eliminar o gerador a diesel para reduzir emissões. Além disso, para uma análise mais abrangente, pode-se simplificar a curva de demanda média para aproximadamente 6,92 kWh/dia na Reserva Extrativista Lago do Cuniã.

Foram identificados três sistemas para análise no projeto. Dois deles foram obtidos por meio de simulação multiobjetivo, um visando menor custo e o outro menor emissões. O terceiro sistema se concentra apenas no custo e apresenta um conjunto de soluções diferente. A Tabela 5 oferece detalhes das características de cada sistema.

Tabela 5 – Resultados para os diferentes casos.

Caso	Tipo de Otimização	Equipamento	Emissão	CPL
M0	Multi-objetivo	PV/BT	146,8kg CO ₂ /yr	8091,3 \$
M1	Multi-objetivo	PV/BT/DG	135,86kg CO ₂ /yr	10047,3 \$
M2	Mono-objetivo	PV/BT	146,8kg CO ₂ /yr	8091,3 \$

Fonte: Klein et al. (2023).

Os sistemas M0 e M2 têm semelhanças, enquanto o sistema M1, com foco em redução de emissões, difere nos equipamentos. Isso resulta em um aumento de 24,2% no Custo Nivelado de Energia (CPL) e uma redução de 8,0% nas emissões de dióxido de carbono em comparação com M0 e M2. Todos os sistemas evitam o uso de turbinas eólicas devido às condições de alta irradiação solar e baixa velocidade do vento na localização.

Enfim, ampliando a análise e considerando a possibilidade de um sistema híbrido que incorporaria todos os equipamentos do iHOGA, incluindo as turbinas hidro cinéticas, isso resultou em uma significativa alteração na distribuição dos custos e nas formas de geração utilizadas. Ao otimizar mono-objetivamente o Custo Nivelado de Energia (CPL) com base nos parâmetros de uma turbina hidro cinética para quedas

ultra baixas (entre 0,5 e 2,5m), identificou-se o conjunto de equipamentos mais eficiente, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados para os diferentes casos.

Equipamentos	Modelo	Potência
Painéis Fotovoltaicos (PF)	-	-
Baterias (BT)	Bat48kWh	0,048MWh
Turbinas Eólicas (TE)	-	-
Geradores Diesel (GD)	Diesel110kW	10KVA
Célula de Combustível (CdC)	-	-
Turbina Hidro Cinética	ULTRAL	39kW
Eletrolizador (EZ)	-	-
Inversor (INV)	Inv-Ch 75kW	75kW

Comparando com a Tabela 1, a turbina hidro cinética parece ser a melhor opção para a comunidade. No entanto, é importante notar que os dados segundo Botan et al. (2016) precisam ser confirmados com dados reais, considerando fatores como a disponibilidade de água, fluxo de água real e como a turbina se encaixa nas atividades extrativistas, como a pesca, que é uma fonte importante de renda. Apesar disso, mesmo com dados teóricos, a turbina pode influenciar significativamente a escolha dos equipamentos no sistema híbrido.

Conclusões

Foi estabelecido uma metodologia sólida para selecionar configurações ideais de tecnologias de geração de energia renovável em sistemas híbridos autônomos, incluindo armazenamento de energia. Além disso, considerou impactos ambientais e socioeconômicos, expandindo seu foco para regiões isoladas do Brasil. A introdução de turbinas hidro cinéticas abre novas perspectivas de pesquisa, questionando a relevância desses equipamentos em comparação com os geradores convencionais. Este projeto promove a viabilidade de redes de energia renovável em regiões com acesso limitado à eletricidade, atraindo investimentos, reduzindo emissões poluentes e melhorando a qualidade de vida das comunidades isoladas. Isso contribui para um futuro mais sustentável e inclusivo, demonstrando um compromisso com a inovação, preservação ambiental e bem-estar dessas comunidades.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG; pelo financiamento do Projeto: “simulação e otimização de sistemas híbridos isolados de geração de energia elétrica com base em energias renováveis [PROCESSO APQ-01932-21] executado na Universidade Federal de Itajubá

sob o edital 001/2021 - Demanda universal, registro DPI UNIFEI Nro: PVDI208-2021; à Universidade Federal de Itajubá.; ao Núcleo de Excelência em Sistemas Térmicos, NEST; ao professor Diego Mauricio Yepes Maya e a professora Angie Lizeth Espinosa Sarmiento.

Referências

- BOTAN, A. C. B. et al. Comparative analysis for distributed generation using ultra-low head hydro, solar and wind energies. *International Journal of Energy Research*, v. 45, n. 11, p. 16310–16328, 1 set. 2021.
- EPE. “WebMap EPE”. Sistema de Informações Geográficas do Setor Energético Brasileiro. Disponível em: <https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>.
- IBGE. “Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística”. (2010). Censo 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/>.
- KLEIN, A., RODRIGUES, R., KLEIN, T. O., XAVIER, T., RODRIGUES, W. MAYA, D. M. Y., SARMIENTO, A. L. E. Socio-Environmental Analysis Of The Impacts Of A Hybrid Renewable Energy System In An Isolated Region Of Brazil. *Experimental Mechanics in Engineering and Biomechanics - Proceedings ICEM20* [s.l.: s.n.], 2023.
- NASA. (2021). Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER). Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>.
- ROY, D., Hassan, R., & Das, B. K., (2022). A hybrid renewable-based solution to electricity and freshwater problems in the off-grid Sundarbans region of India: Optimum sizing and socio-enviro-economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133761. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133761>.
- SOFTWARE IHOGA. Software de simulación y optimización de suministro eléctrico basado en energías renovables. Versão PRO+ 3.4. Espanha. Universidad Zaragoza. Disponível em: <https://ihoga.unizar.es>.
- UNDP. “United Nations Development Programme”. (2022). Human Development Index (HDI). Human Development Report. Disponível em: <https://hdr.undp.org/data-center/human-development-index#/indicies/HDI>.