

## **Impactos da utilização de turbinas hidrocínéticas de queda ultra baixa em sistemas híbridos de energia renovável em uma comunidade isolada**

**Tarcísio de O. Klein<sup>1</sup>, Amanda Klein<sup>2</sup>, Diego M. Y. Maya<sup>3</sup>, Angie L. E. Sarmiento<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IRN, Universidade Federal de Itajubá, Brasil –  
tarcisioklein@unifei.edu.br

<sup>2</sup>Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IMC, Universidade Federal de Itajubá, Brasil –  
amandaklein@unifei.edu.br

<sup>3</sup> Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída - NEST. Grupo TIES (Tecnologias Integradas e Engenharia Sustentável), IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil – diegoyepes@unifei.edu.br, angieespinosa@unifei.edu.br

### **Resumo**

Cada vez mais, busca-se a disponibilidade de energia elétrica em localidades isoladas com maior eficiência e aproveitamento dos recursos energéticos disponíveis, visando a redução dos impactos ambientais. Nesse sentido, os estudos dos sistemas híbridos de energia renovável (SHER) com formas alternativas de se armazenar energia, assim como, a utilização de diferentes tecnologias de geração assume cada vez mais relevância para o estabelecimento de redes confiáveis e sustentáveis. Assim, através de simulações com foco nos sistemas ótimos com e sem a presença das turbinas hidrocínéticas de queda ultrabaixa seria o caminho para compreender como esses equipamentos podem influenciar um SHER. Dessa forma, os resultados encontrados corroboram o esperado, uma vez que, ao se comparar os sistemas elaborados, aqueles que utilizam as turbinas hidrocínéticas são 100% mais baratos e 18,5% menos prejudicial ao meio ambiente do que o melhor sistema sem esse equipamento.

**Palavras-chave:** São Carlos do Jamari; Brasil; sustentabilidade; iHOGA.

### **Abstract**

Increasingly, there is a pursuit of electric power availability in isolated locations with greater efficiency and utilization of available energy resources, aiming to reduce environmental impacts. In this context, studies on hybrid renewable energy systems (HRES) with alternative forms of energy storage, as well as the use of different generation technologies, are becoming increasingly relevant for establishing reliable and sustainable networks. Thus, simulations focused on optimal systems with and without the presence of ultra-low head hydrokinetic turbines would be the way to understand how these devices can influence an HRES. In this way, the results found corroborate expectations, as when comparing the developed systems, those that use hydrokinetic turbines are 100% cheaper and 18.5% less harmful to the environment than the best system without this equipment.

**Keywords:** São Carlos do Jamari; Brazil; sustainability; iHOGA.

## 1. Introdução

Além de uma necessidade do cotidiano, a demanda por energia elétrica em localidades isoladas tem crescido substancialmente. De acordo com um estudo sobre o potencial produtivo de comunidades remotas na Amazônia a partir do acesso à energia elétrica, feito pela WWF-Brasil de 2016 a 2021, ficou evidente que não só a questão produtiva, mas a educação deveria ser priorizada, como forma de manter os jovens estudantes em suas comunidades e permitindo a replicação de conhecimentos [1]. Ao final do projeto, verificou-se, além de aumento de produção na região e melhoria das relações comunitárias, professores e estudantes passaram a ter um ambiente escolar mais eficiente e confortável, e o combustível antes destinado aos geradores à diesel destinou-se para transporte de estudantes e outras aplicações [1].

Em paralelo, há uma preocupação crescente com a redução dos impactos ambientais associados à geração de energia. Prover energia de maneira sustentável e eficiente para essas comunidades é essencial para promover seu desenvolvimento econômico e social, sem afetar o meio ambiente. Além disso, o uso de um meio de armazenamento sustentável, como células de combustível, favorece o desenvolvimento ecológico das comunidades isoladas [2].

Nesse contexto, os sistemas híbridos de energia renovável (SHER) surgem como uma solução promissora. Os SHER combinam diferentes fontes de energia renovável e tecnologias de armazenamento, maximizando a eficiência e a confiabilidade da geração de energia, uma vez que são desenvolvidos levando em consideração a intermitência da natureza [3]. Sendo assim, essa abordagem permite o uso otimizado dos recursos locais, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e minimizando os impactos ambientais.

Entre as tecnologias de geração de energia renovável, as turbinas hidrocinéticas de queda ultrabaixa (UHB) destacam-se pelo seu potencial de aproveitamento em SHER. As UHB convertem a energia cinética dos rios em hidroeletricidade, não requerendo a construção de barragens, e não emitindo qualquer tipo de poluente, sendo uma das importantes alternativas para o fornecimento de energia elétrica para as comunidades isoladas ribeirinhas [4]. Essas turbinas podem ser instaladas em cursos d'água com pequena declividade, como rios e canais. Desta forma, a implementação de turbinas UHB em SHER oferece uma alternativa para a geração de energia em áreas onde outras formas de energia renovável possam ser menos viáveis.

Nesse sentido, para avaliar a eficácia da utilização de turbinas UHB em SHER, foi realizada simulações detalhadas, considerando as características específicas

de cada localidade, como o potencial hidroenergético da região, a demanda energética local, os custos de instalação e operação das turbinas e os impactos ambientais. As simulações devem focar na análise de sistemas ótimos com e sem a presença das turbinas hidrocinéticas, buscando compreender como esses equipamentos podem influenciar a eficiência e os custos do SHER.

Em sequência, buscando uma localidade isolada para realizar as simulações e tornar-se objeto de estudo desta pesquisa, foi selecionada a comunidade São Carlos do Jamari, localizada às margens do Rio Madeira. Nesta região, grande parte da população coleta os produtos da mata para o consumo da família ou para comercialização. Além disso, a comunidade conta com aproximadamente 591 famílias e 1700 habitantes, com atividades tradicionais como pesca, agricultura e extrativismo [5]. Também, uma parcela considerável das pessoas que moram em São Carlos são funcionárias e muitas trabalham e geram renda por meio do comércio [5].

Em função disto, este estudo visa simular e verificar a viabilidade da integração de turbinas hidrocinéticas de queda ultrabaixa em sistemas híbridos de energia renovável na comunidade isolada São Carlos do Jamari. Além disso, procura-se abrir espaço para uma discussão sobre a aplicação de baterias para atender a baixas demandas de energia, ressaltando a importância da geração de energia local e renovável para o desenvolvimento sustentável de comunidades isoladas.

## 2. Metodologia

### 2.1. Seleção da comunidade adequada para realização do estudo

A princípio, para se realizar um estudo direcionado a implementação de sistemas híbridos de energia renovável, é necessário conhecer a demanda elétrica local, assim como as principais atividades econômicas desenvolvidas na região de interesse e a disponibilidade da maior diversidade de fontes de energia renovável passíveis de serem estudadas via software.

Dessa forma, a partir das informações contidas nos diagnósticos socioambientais do NAPRA (Núcleo de Apoio à População Ribeirinha da Amazônia) foi possível encontrar na comunidade de São Carlos do Jamari as características compatíveis para simulação do SHER proposto, principalmente no que diz respeito à utilização das turbinas hidrocinéticas associada a proximidade com um rio [5].

A comunidade está localizada no estado de Rondônia, próxima ao município de Porto Velho e possui coordenadas 8°27'27 S 63°30'05 O. São Carlos do

Jamari é banhada pelo Rio Jamari e Rio Madeira, sendo o segundo de grande relevância econômica para a região, além de ser cercada pela Reserva Extrativista Lago do Cuniã e Floresta Nacional do Jacundá, vislumbrando-se na Figura 1 a localização da comunidade no mapa do Brasil.

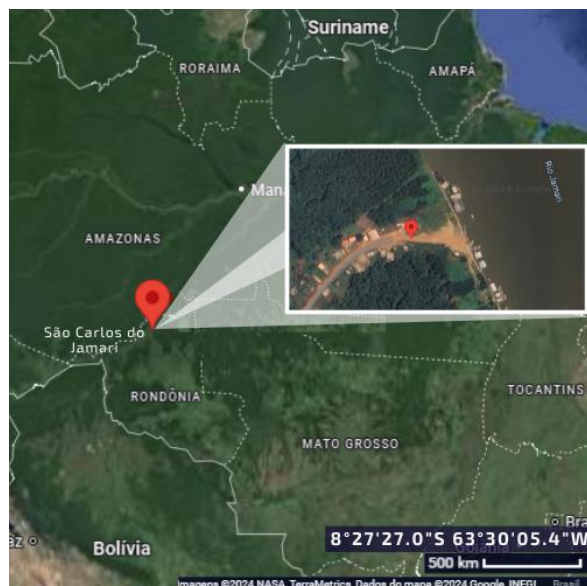


Figura 1. Localização da comunidade de São Carlos do Jamari no Brasil. Fonte: elaboração própria.

Ademais, as informações abrangentes relacionadas ao povoado proposto no documento do NAPRA, garantiu uma construção verossímil da demanda de energia elétrica local.

## 2.2. Definição da demanda elétrica local

No caso, sabe-se que o consumo de energia mensal residencial na região Norte estabelece-se em torno de 96,5kW no verão, representado 3,22kW gastos diariamente. Já no inverno, esses valores se alteram consideravelmente, representando um consumo mensal e diário de 81kW e 2,7kW, respectivamente [6].

Nesse sentido, associando as informações do NAPRA obtêm-se os hábitos de consumo de energia da comunidade como na Figura 2.



Figura 2. Disposição habitacional e hábitos de consumo propostos para a comunidade de São Carlos do Jamari [5], [7]. Fonte: elaboração própria.

O consumo de energia na comunidade é suprido por um conjunto de motogeradores abastecidos com combustível fóssil que em muitas situações apresentam mal funcionamento [5]. Essa informação reforça a importância de se implementar um sistema híbrido na região.

De uma outra perspectiva, também é necessário avaliar como esse consumo se dá ao longo do dia, uma vez que, essas variações, ao serem concatenadas com a disponibilidade das fontes renováveis podem convergir em diferentes tipos de SHER. Assim, a partir dos dados de consumo residencial horário para a região Norte disponibilizados no PPH 2019 Web da Procel, elabora-se a Figura 3.

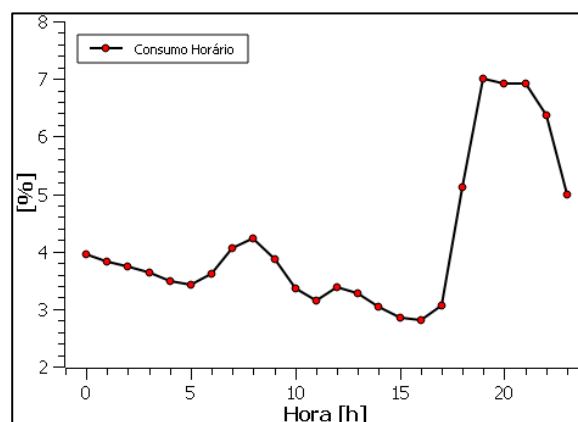


Figura 3. Relação percentual do consumo médio de energia elétrica por hora diariamente na região Norte do Brasil. Fonte: elaboração própria.

Logo, utilizando-se das informações percentuais da curva, realiza-se uma distribuição horária da demanda total estabelecida para a comunidade de São Carlos do Jamari.

### 2.3. Definição dos parâmetros técnicos de simulação e equipamentos

Ao todo são realizadas duas simulações, cujas, o software adotado foi o iHOGA e em um primeiro momento, verifica-se a possibilidade de implementação de geradores solares, eólicos e hidrocinéticos (avaliados apenas na primeira simulação), também considerando a suplementação da demanda através de motogeradores e eletrolisadores [8].

Todavia, os diferentes capitais energéticos estão disponíveis em diferentes dimensões, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Disponibilidades de recursos na localização da comunidade São Carlos do Jamari.

Recurso Energético	Disponibilidade
Irradiação Solar Média Diária [9]	4,76kWh/m <sup>2</sup>
Velocidade Média Anual do Vento (50m de altitude) [9]	1,8m/s
Vazão média do Rio Jamari [10]	7,4m <sup>3</sup> /s (Estação Fluviométrica de Ariquemes)

Fonte: elaboração própria.

Ademais, devido a valores representativos de vazão do Rio Madeira, as necessidades hídricas dos eletrolisadores também são supridas, e consequentemente, a alimentação das células de combustível.

Por outro lado, o combustível considerado para abastecimento dos motogeradores foi o diesel, por ser de fácil acesso às comunidades isoladas.

Prosseguindo com a discussão, tomando como referência os diversos equipamentos disponibilizados pelo software iHOGA, opta-se por avaliar a construção do sistema a partir de um equipamento de maior, menor e potência intermediária, como apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Equipamentos potenciais para compor o SHER.

Equipamentos	Especificação
Painéis Solares	1kWp
	10kWp
	100kWp
Turbinas Eólicas	HWP-10
	HWP-30
	HWP-50
Baterias Li-íon	48kWh
	480kWh
	4800kWh
Inversores	5kVA
	50kVA
	500kVA
Motogeradores	10kW
	50kW
	200kW
Eletrolisador + Célula de Combustível	1kW
	5kW
	10kW

Fonte: elaboração própria.

Nesse sentido, a turbina hidrocinética, diferentemente dos demais equipamentos, foi adotada como um modelo voltado a quedas ultrabaixas, havendo o conhecimento das suas especificações e pelo motivo de ser mais abrangente quanto a suas limitações de implementação [11].

Enfim, as simulações são caracterizadas por determinar um sistema como menor custo presente líquido (CPL) através de uma otimização mono-objetiva e mais, a estratégia de controle de funcionamento do sistema acompanha a demanda.

### 2.4. Parâmetros econômicos utilizados

Os SHERs elaborados para a comunidade de São Carlos do Jamari contempla uma vida útil de 25 anos e a taxa de desconto real anual foi estabelecida em 7,54%, de acordo com a taxa nominal de desconto do Banco Central de 13,75% e uma inflação de 4,53%, segundo o IBGE [12], [13].

Enfim, o custo de instalação dos sistemas foi estabelecido em 25% do custo inicial do sistema e propõe-se o custeio do SHER pelo Pronaf (Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar) que possui juros de 5%, pago ao longo da vida útil do projeto [14].

### 3. Resultados

#### 3.1. SHER com a utilização da turbina de queda ultrabaixa

O SHER mais adequado representa uma combinação da energia proveniente, principalmente, da turbina hidrocinética e de painéis solares, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Equipamentos componentes do melhor sistema híbrido encontrado com a utilização da hidroturbina.

Equipamentos	Potência
2x Painéis Solares	100kWp
1x Bateria Li-íon	480kWh
1x Hidroturbina de Queda Ultrabaixa	11kW
1x Motogerador	200kW
1x Inversor	50kW

Fonte: elaboração própria.

Portanto, é importante destacar que os equipamentos atuariam de forma diferente para suprir a demanda elétrica da comunidade, sendo a participação de cada componente identificada na Figura 4.

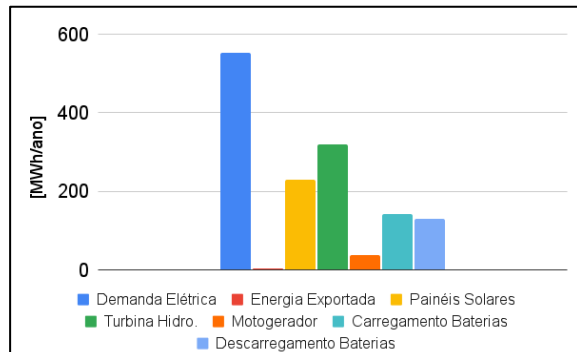


Figura 4. Participação dos equipamentos no suprimento da demanda. Fonte: elaboração própria.

Nesse caso, observa-se que os painéis solares e as turbinas hidrocinéticas tem as maiores participações no suprimento da demanda, todavia, a intermitência de ambos é solucionada com a utilização da bateria em um primeiro momento e em último caso, do motogerador. Além disso, identifica-se um total de 3,592MWh/ano em energia excedente que poderia ser vendida no caso de acesso à rede elétrica.

Da mesma maneira que na geração de energia, na relação de custos, apresentados na Figura 5, é identificada maior participação dos painéis solares e turbinas hidrocinéticas.

Dessa maneira, identifica-se que o custo dos painéis solares representa mais da metade do custo total do sistema que se estabelece em 65,68k\$, sendo esse impacto expressivo justificado pela utilização de dois painéis ao invés de um único equipamento, como ocorre com os demais, a fim de aproveitar a alta irradiação solar do Brasil.

Por outro lado, mesmo considerando atuações pontuais do motogerador, percebe-se que o gasto com combustíveis extrapola o custeio dos inversores, baterias e do próprio gerador a diesel juntos, demonstrando o quão desvantajoso é utilizar a combustão de derivados do petróleo para gerar energia elétrica.

Enquanto isso, a turbina hidrocinética de queda ultrabaixa, representando apenas 18,5% dos custos totais do SHER, se destaca por ser o elemento que mais gerou energia e, portanto, estabelece-se como fundamental para viabilizar o sistema híbrido proposto.

Ademais, mantendo-se a perspectiva econômica, o SHER desenvolvido possui um CNE (Custo Nivelado de Energia, do inglês, *Levelized Cost of Energy*) de 0,012\$/kWh, muito menor que o CNE para hidrelétricas, principais geradoras de energia no Brasil, que apresenta o valor de 0,047\$/kWh [15].

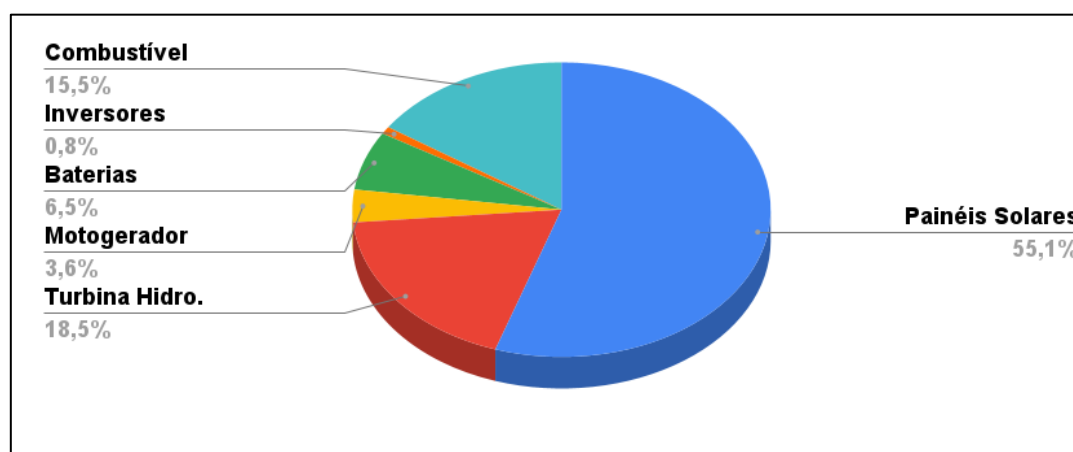


Figura 5. Distribuição dos custos para o SHER adequado à comunidade São Carlos do Jamari. Fonte: elaboração própria.

Enfim, de uma perspectiva ambiental, o sistema híbrido desenvolvido utilizando a turbina hidrocinética apresenta uma renovabilidade de 93,19%, pela participação do motogerador, emitindo 80,27tCO<sub>2</sub>/ano.

Nessa situação, o valor de emissão do dióxido de carbono anual, poderia ser melhorado substituindo o diesel convencional por um biocombustível proveniente de recursos da região, aumentando também a renovabilidade do sistema e provendo empregos e desenvolvimento econômico para a região.

### 3.2. SHER desconsiderando a utilização da turbina de queda ultrabaixa

Quando se retira a possibilidade de se utilizar turbinas hidrocinéticas, converge-se para um sistema, cujo conjunto é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Equipamentos componentes do melhor sistema híbrido encontrado sem utilizar a hidroturbina.

Equipamentos	Potência
5x Painéis Solares	100kWp
1x Bateria Li-íon	480kWh
1x Motogerador	200kW
1x Inversor	500kW

Fonte: elaboração própria.

Nesse caso, identifica-se que o sistema é majoritariamente solar, conservando o sistema de backup, como no primeiro SHER, todavia, utilizando um inversor com maior potência.

Dessa forma, toda a demanda elétrica da comunidade é suprida pelos painéis fotovoltaicos, utilizando-se da bateria e motogerador nos momentos de intermitência. Portanto, esses elementos se traduzem na Figura 6.

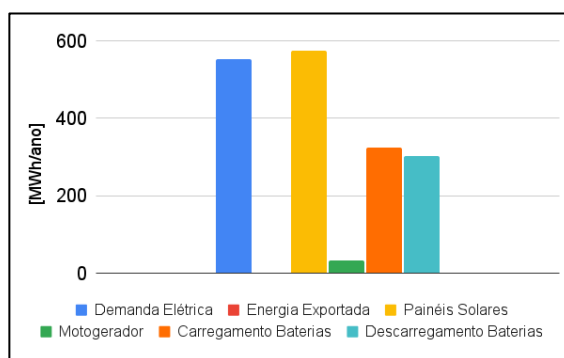


Figura 6. Participação dos equipamentos no suprimento da demanda sem hidroturbina. Fonte: elaboração própria.

Observando a Figura 5, verifica-se que a energia exportada pelo sistema é ainda menos significativa em relação ao sistema com a hidroturbina. Por outro lado, a geração de energia solar aumenta em 150%, aproximadamente, sendo que, a participação das baterias também cresce em relação a demanda, por suprirem a intermitência do sistema durante o período noturno.

Concomitantemente, sabe-se que com o aumento da potência dos painéis fotovoltaicos, também ocorre um aumento no custo associado a esses equipamentos. Por isso, elabora-se a Figura 7, a fim de apresentar as alterações sofridas no SHER com a inviabilização das turbinas de queda ultra baixa.

Para o segundo sistema elaborado, a participação dos painéis fotovoltaicos sobe para 65,2% do custo total de 131,49k\$, que é 100% maior que os gastos monetários com o primeiro SHER, destacando a importância de se implementar as turbinas hidrocinéticas quando houver a possibilidade.

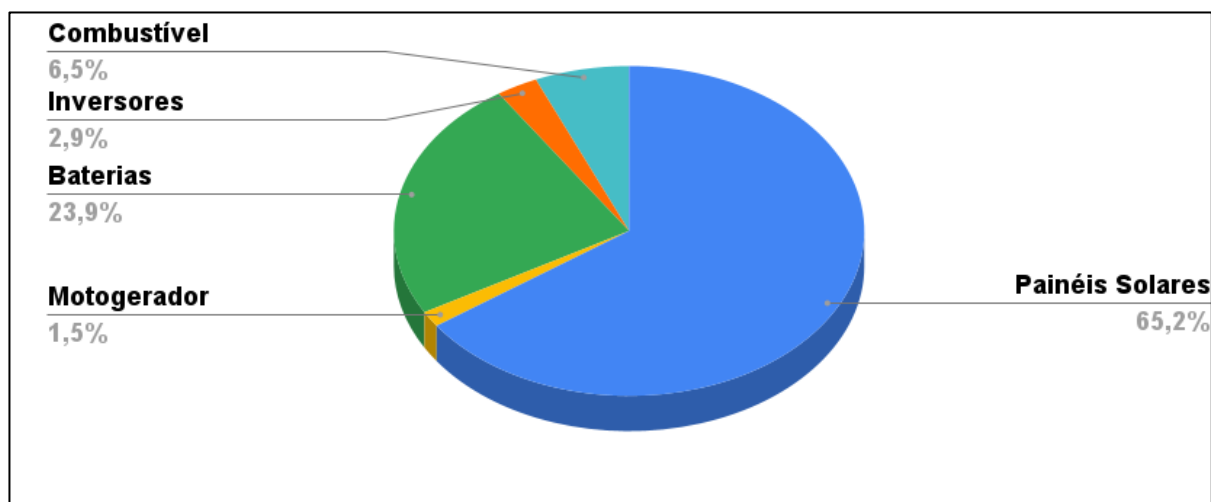


Figura 7. Distribuição dos custos para o segundo SHER adequado à comunidade São Carlos do Jamari. Fonte: elaboração própria.



Também, em relação ao CNE, o melhor valor obtido foi de 0,025\$/kWh que apesar de se manter inferior aos custos de gerações convencionais no país, ainda é 100% maior que o CNE quando incluída a hidroturbina de queda ultra baixa no sistema.

Positivamente, um breve aumento acontece em relação a renovabilidade, assumindo 94% para o novo sistema. Em contrapartida, há uma emissão 18,5% maior no SHER simulado desconsiderando turbinas hidrocinéticas.

### 3.3. Considerações adicionais

Há grandes diferenças em relação aos sistemas abordados, compreendendo ser mais benéfica a utilização de hidroturbinas de queda ultra baixa, tanto por questões econômicas, quanto ambientais.

No entanto, as simulações também apresentaram semelhanças principalmente associadas a não utilização de eletrolisadores e células de combustível, em parte pelo fato de os equipamentos encarecerem o sistema, mas também, por haver maior disponibilidade de recursos para gerar energia de maneira mais barata e com recursos já difundidos na atualidade, como a utilização dos painéis fotovoltaicos.

Por fim, é interessante verificar que os SHERs elaborados foram capazes de suprir 100% da demanda energética da comunidade, indicando que tais sistemas são tão bons quanto, ou até melhores, que o conjunto de motogeradores utilizados na comunidade.

### 4. Conclusão

A utilização de sistemas híbridos de energia renovável permite disponibilizar energia elétrica limpa e sustentável mesmo em locais onde seria inviável implementar redes elétricas do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Todavia, com o crescimento da relevância e utilização de diversas fontes renováveis para geração conjunta de energia, surge a necessidade de otimizar sistemas existentes e propor melhores formas de se diversificar os meios de produção de eletricidade, seja através da aplicação de hidroturbinas em SHER, ou na utilização de softwares direcionados a avaliação dos sistemas, como é o caso do iHOGA.

Portanto, as turbinas hidrocinéticas são ferramentas importantes para se realizar o aproveitamento direto dos recursos hídricos disponíveis na região Norte do Brasil, em adição ao fato dos estudos ampliarem cada vez mais a faixa de aplicação desse tipo de equipamento, como é o caso das turbinas de queda ultra baixa.

Da mesma maneira, o desenvolvimento e utilização de softwares como o iHOGA indicam uma democratização da elaboração de sistemas híbridos, permitindo encontrar os sistemas mais adequados e refiná-los para entender suas minúcias.

### 5. Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto intitulado "Simulação e otimização de sistemas híbridos isolados de geração de energia elétrica com base em energias renováveis [PROCESSO APQ-01932-21]" realizado na Universidade Federal de Itajubá sob o edital 001/2021 - Demanda Universal, registro DPI UNIFEI No: PVDI208-2021. Agradecimentos especiais são estendidos ao PPGEEN (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia) e à Universidade Federal de Itajubá.

### 6. Referências

- [1] WWF-Brasil, *Potencial Produtivo De Comunidades Remotas na Amazônia A Partir Do Acesso À Energia Elétrica Brasil 2021*, Bem Comunicar, 2021.
- [2] P. A. M. & S. S. Malik, "A techno-economic investigation of grid integrated hybrid renewable energy systems.," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022.
- [3] D. K. Tran Q, "Isolation microgrid design for remote areas with the integration of renewable energy: A case study of Con Dao Island in Vietnam.," *Clean Technol* 2021;3(4):804–20..
- [4] O. P. A. B. C. P. J. Carmo Gonçalves, "Metodologias para a implantação de turbinas hidrocinéticas na Amazônia," em *XX SNTPEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Recife, 2009.
- [5] Núcleo de Apoio a População Ribeirinha da Amazônia (NAPRA), "São Carlos do Jamari - NAPRA," NAPRA, [Online]. Available: <https://napra.org.br/territorios-de-atuacao/rondonia/sao-carlos-do-jamari/>. [Acesso em 29 Maio 2024].
- [6] N. S. Fedrigo, G. Gonçalves, P. F. Lucas e E. Ghisi, *Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial*, Florianópolis, 2009.
- [7] PROCEL, *Pesquisa de Posse e Hábitos (PPH) WEB*, 2019.
- [8] iHOGA, <https://ihoga.unizar.es/en/>, 2024.
- [9] NASA, *Prediction Of Worldwide Energy Resources*, <https://power.larc.nasa.gov/>, 2024.

- [10] F. R. R. Silva, *Regionalização das vazões de referência aplicadas nas bacias hidrográficas dos rios Jamari, Guaporé e Machado para definição das vazões de outorga*, Ji-Paraná: FUFR, 2022.
- [11] A. Botan, R. Ramiro e G. e. a. Tiago Filho, *Comparative analysis for distributed generation using ultra-low head hydro, solar and wind energies*, *International Journal of Energy Research*, (2021), 16310-16328, 45(11), 2021.
- [12] B. C. Brasileiro, *Taxa de juros base*, <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicootaxasjuros>, 2024.
- [13] IBGE, *Inflação*, <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>, 2024.
- [14] BNDES, *Pronaf ABC+ Bioeconomia*, <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>, 2024.
- [15] S. H. Oku, *Relação entre o preço do petróleo e das energias renováveis*, Santos, 2020.