

**UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO  
GRANDE DO SUL – UNIJUÍ**

**DIOGO WOECICHOSHI**

**MICRORREDES HÍBRIDAS - ESTRATÉGIA DE  
SUSTENTABILIDADE E RESILIÊNCIA ENERGÉTICA EM ZONAS  
RURAIS**

**Ijuí**

**2024**

**DIOGO WOECICHOSHI**

**MICRORREDES HÍBRIDAS - ESTRATÉGIA DE SUSTENTABILIDADE  
E RESILIÊNCIA ENERGÉTICA EM ZONAS RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**Orientador: Dr. Moises Machado Santos**

**Ijuí**

**2024**

**DIOGO WOECICHOSHI**

**MICRORREDES HÍBRIDAS - ESTRATÉGIA DE SUSTENTABILIDADE E  
RESILIÊNCIA ENERGÉTICA EM ZONAS RURAIS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do título de ENGENHEIRO ELETRICISTA e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo membro da banca examinadora.

Ijuí, 11 de novembro de 2024

Prof. Moises Machado Santos

Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina

Doutor pela Universidade Federal de Santa Maria

**Orientador**

Prof. Luís Fernando Sauthier

Mestre pela Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rs

**Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica/UNIJUÍ**

Prof. Sandro Alberto Bock

Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria

**Banca Examinadora**

Dedico este trabalho a minha família, cujo amor e apoio foram fundamentais em cada etapa desta jornada

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, meu sincero agradecimento ao Dr. Moisés Machado Santos, cuja orientação, paciência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho. Sua disponibilidade e apoio constantes foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios enfrentados ao longo desta jornada acadêmica.

Agradeço também a todos os membros da banca examinadora, cujos insights e sugestões enriqueceram significativamente este estudo. Sua dedicação e rigor no exame deste trabalho desenvolve imensamente para o seu aprimoramento.

Um agradecimento especial ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica, Luís Fernando Sauthier, cujo apoio e incentivo foram cruciais durante todo o meu percurso na instituição. Sua liderança e dedicação não apenas ao curso, mas também ao desenvolvimento de seus alunos, são verdadeiramente inspiradoras.

Não posso deixar de agradecer a todos os professores da instituição, cujas aulas e orientações foram exclusivas para minha formação e sucesso acadêmico. por terem compartilhado seu conhecimento e experiência com tanta generosidade e comprometimento.

Por fim, mas não menos importante, minha eterna gratidão à minha família, especialmente aos meus pais, por todo amor, incentivo e suporte incondicional. Sem sua compreensão e sem o ambiente de suporte que proporcionamos, nada disso teria sido possível. Este trabalho é também o resultado do sacrifício e dedicação de vocês, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A todos vocês, meu sincero obrigado.

Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse  
por elas, eu não teria saído do lugar.

*Chico Xavier*

## RESUMO

WOECICHOSHI, DIOGO. **Microrredes Híbridas - Estratégia de Sustentabilidade e Resiliência Energética em Zonas Rurais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

Este trabalho apresenta um estudo sobre as opções técnicas e econômicas de implantação de uma microrrede híbrida em uma propriedade rural no município de Coronel Barros, Rio Grande do Sul, composta por uma micro central hidrelétrica e um sistema fotovoltaico. A demanda crescente por soluções energéticas sustentáveis em áreas rurais, onde o acesso à eletricidade é desafiador, justifica a escolha deste tema. O estudo de caso detalhado busca identificar as tecnologias mais adequadas e os custos envolvidos na geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica para atender às demandas específicas da propriedade, considerando o contexto regional e as características do sistema elétrico local.

As microrredes híbridas representam uma alternativa promissora para aumentar a resiliência e a sustentabilidade energética em zonas rurais. A combinação de micro centrais hidrelétricas e sistemas fotovoltaicos pode fornecer uma fonte de energia confiável e renovável, reduzindo a dependência de fontes tradicionais de energia e minimizando os impactos ambientais. Este trabalho explora os princípios de funcionamento dessas tecnologias, bem como a regulamentação brasileira que permite a integração de sistemas de geração renovável com a rede elétrica principal.

Utilizando o software HOMER para simulações, o estudo analisa a eficiência, os custos e os benefícios socioeconômicos de diferentes configurações de microrrede. A metodologia inclui a coleta de dados de consumo de energia, características técnicas das tecnologias e a modelagem no HOMER para simulação de diferentes cenários de operação. Os resultados indicam que a implantação de uma microrrede híbrida é viável, oferecendo uma alternativa econômica e sustentável para a geração de energia em áreas remotas.

**Palavras-chave:** microrredes híbridas; micro centrais hidrelétricas; sistemas fotovoltaicos; sustentabilidade energética; resiliência energética.

## ABSTRACT

WOECICHOSHI, DIOGO. **Microrredes Híbridas - Estratégia de Sustentabilidade e Resiliência Energética em Zonas Rurais**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, 2024.

This work presents a study on the technical and economic options for implementing a hybrid microgrid in a rural property located in Coronel Barros, Rio Grande do Sul. The increasing demand for sustainable energy solutions in rural areas, where access to electricity is challenging, justifies the choice of this topic. The detailed case study aims to identify the most suitable technologies and the costs involved in the generation, storage, and distribution of electricity to meet the specific demands of the property, considering the regional context and the characteristics of the local electrical system.

Hybrid microgrids represent a promising alternative to enhance resilience and energy sustainability in rural areas. The combination of micro hydropower plants and photovoltaic systems can provide a reliable and renewable energy source, reducing dependence on traditional energy sources while minimizing environmental impacts. This work explores the operational principles of these technologies as well as Brazilian regulations that allow for the integration of renewable generation systems with the main electrical grid.

Using HOMER software for simulations, the study analyzes the efficiency, costs, and socioeconomic benefits of different microgrid configurations. The methodology includes data collection on energy consumption, technical characteristics of the technologies, and modeling in HOMER to simulate various operational scenarios. The results indicate that implementing a hybrid microgrid is feasible, offering an economic and sustainable alternative for energy generation in remote areas.

**Keywords:** hybrid microgrids; micro hydropower plants; photovoltaic systems; energy sustainability; energy resilience.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Típica de uma Microrrede.....	16
Figura 2 - Principais etapas da metodologia proposta.....	25
Figura 3 - Tela Inicial do HOMER.....	27
Figura 4 - Entradas de Recursos Solares .....	28
Figura 5 - Entrada Recursos Hídricos.....	29
Figura 6 - Detalhes da Rede Elétrica .....	30
Figura 7 - Detalhes da Carga .....	32
Figura 8 - Detalhes PV .....	33
Figura 9 - Detalhes MCH .....	34
Figura 10 - Detalhes do Inversor .....	36
Figura 11 - Detalhes da Bateria .....	37
Figura 12 - Localização da propriedade rural.....	39
Figura 13 - Local do córrego .....	41
Figura 14 - Trecho das medições.....	42
Figura 15 - Kit Roda D' Água.....	48
Figura 16 - Modelo da Bateria.....	50
Figura 17 - Resultados da Simulação no Software HOMER (on grid) .....	51
Figura 18 - Comparação Econômica Entre o Sistema Fotovoltaico e Cenário Base ...	52
Figura 19 - Resultados da Simulação no Software HOMER (off grid).....	53
Figura 20 - Comparação Econômica Entre o Sistema Hídrico e Híbrido .....	54
Figura 21 - Comportamento do Sistema.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das PCHs .....	21
Tabela 2 - Dados do Consumo de energia .....	40
Tabela 3 - Medições para cálculo da vazão .....	42
Tabela 4 - Dados de Irradiação Solar .....	44
Tabela 5 - Detalhes dos Kits Solares .....	46
Tabela 6 - Especificações Técnicas do Kit Roda D' Água .....	48
Tabela 7 - Desempenho esperado do Kit Roda D' Água .....	49

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

MCH - Micro Central Hidrelétrica

DER - Recurso de Energia Distribuída

NREL - Laboratório Nacional de Energia Renovável

DC - Corrente Contínua

AC - Corrente Alternada

LCOE - (Levelized Cost of Energy) Custo Nivelado de Energia

NPC - (Net Present Cost) Custo Presente Líquido

PCC - (Point of Common Coupling) Ponto de Acoplamento Comum

HOMER - (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) Otimização Híbrida de Múltiplos Recursos Energéticos

RES - (Renewable Energy Sources) Fontes de Energia Renovável

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Objetivo Geral .....	14
1.1.2 Objetivos Específicos .....	14
1.2 Organização do documento .....	14
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
2.1 Microrredes.....	16
2.1.1 Flexibilidade de uma Microrrede.....	18
2.1.2 Microrredes: Atributos Fundamentais .....	19
2.2 Micro centrais hidrelétricas; .....	20
2.3 Sistemas Fotovoltaicos. ....	22
2.4 Teorias sobre a viabilidade de cada uma dessas tecnologias.....	23
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
3.1 Definição do problema .....	25
3.2 Modelagem no HOMER.....	26
3.3 Análise de Cenários .....	38
3.4 Seleção de Alternativas.....	38
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
4.1 Descrição do estudo de caso .....	39
4.1.1 DEMANDA ENERGÉTICA.....	39
4.1.2 RECURSOS HÍDRICOS.....	40
4.1.2.1 <i>Medição da Velocidade da Água</i> .....	43
4.1.2.2 <i>Correção da Velocidade</i> .....	44
4.1.2.3 <i>Cálculo da Vazão</i> .....	44
4.1.3 RECURSOS SOLARES.....	44
4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO.....	45

4.2.1	DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	45
4.2.2	MICRO HIDRELÉTRICA .....	47
4.2.3	BATERIAS .....	49
4.3	RESULTADOS DA SIMULAÇÕES .....	50
4.3.1	Operação interligado ( <i>on grid</i> ) .....	50
4.3.2	Operação isolada ( <i>off grid</i> ) .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
5.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS futuros .....	57
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>59</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Em comunidades rurais, que muitas vezes estão distantes dos centros urbanos e enfrentam desafios no acesso à eletricidade confiável, as microrredes com geração local de energia a partir de fontes renováveis como solar, eólica, hidrelétrica de pequena escala ou biomassa oferece uma oportunidade de independência energética. Isso não apenas reduz a dependência de fontes tradicionais de energia, como também permite aos moradores gerenciarem seu próprio suprimento de eletricidade.

A Lei 14.300/22, sancionada em 6 de janeiro de 2022, institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída no Brasil, regulamentando o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Essa legislação permite que os excedentes de energia gerados por sistemas renováveis, quando não consumidos localmente, sejam injetados na rede elétrica das concessionárias. Essa energia excedente pode ser revertida em créditos na conta de eletricidade, reduzindo os custos para os geradores e incentivando a adoção de sistemas de energia sustentável.

Essa conexão entre microrredes e a rede elétrica das concessionárias não só viabiliza a redução dos custos, mas também contribui para a estabilidade do sistema elétrico. Em alguns casos, quando a geração local excede a demanda da comunidade, o excedente pode ser utilizado em outros lugares, contribuindo para a rede elétrica geral e promovendo uma abordagem mais resiliente e descentralizada para o fornecimento de energia.

Além dos benefícios econômicos diretos, essa prática também desempenha um papel crucial na sustentabilidade ambiental. Ao aproveitar fontes renováveis, as comunidades rurais reduzem a emissão de gás de efeito estufa e promovem a preservação do meio ambiente.

Em suma, a geração de energia sustentável em áreas rurais não só oferece autonomia energética, redução de custos e estabilidade do sistema elétrico, mas também desempenha um papel significativo na transição para um futuro mais sustentável. A possibilidade de conectar sistemas de energia renovável à rede das concessionárias permite que os moradores gerem sua própria

eletricidade e contribuam para a rede elétrica, transformando áreas rurais em impulsionadoras ativas da transição energética sustentável.

Nesse sentido, propõe-se neste trabalho o estudo de caso de viabilidade de uma microrrede formada por uma micro central hidroelétrica e sistemas fotovoltaicos em área rural, com foco em aspectos como eficiência, custos e benefícios socioeconômicos. A escolha desse tema é justificada pela crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis, especialmente em contextos rurais, onde o acesso à eletricidade ainda é um desafio. Portanto, este estudo busca responder à questão central: Qual a viabilidade técnica e econômica de estruturação de microrrede no cenário nacional, mais particularmente no interior do estado do Rio Grande do Sul? A resposta a esta pergunta será explorada por meio de um estudo de caso detalhado, buscando identificar as tecnologias mais adequadas e os custos envolvidos na geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica para atender às demandas específicas de uma propriedade, considerando o contexto regional e as características do sistema elétrico local

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica e econômica da implantação de uma microrrede em uma propriedade rural localizada no município de Coronel Barros, Rio Grande do Sul.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a eficiência de micro centrais hidrelétricas e sistemas fotovoltaicos em áreas rurais.
- Analisar os custos de implantação, operação e manutenção dessas tecnologias.
- Realizar uma análise comparativa abrangente para determinar a melhor opção energética em áreas rurais.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado de forma a abordar, de maneira clara e objetiva, todos os aspectos necessários a pesquisa. A seguir, descreve-se o conteúdo de cada capítulo:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresenta a contextualização do problema, os objetivos gerais e específicos da pesquisa, além da justificativa para a escolha do tema. Este capítulo fornece uma visão geral sobre a importância do estudo no contexto das propriedades rurais e da busca por soluções sustentáveis de geração de energia.
- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** Aborda os fundamentos teóricos e o estado da arte relacionados aos sistemas de geração de energia renovável, com foco nos sistemas fotovoltaicos, hidrelétricos e híbridos. Também discute conceitos como custo nivelado de energia (LCOE), custo presente total (NPC) e fração renovável, que são utilizados nas análises realizadas no trabalho.
- **Capítulo 3 - Metodologia:** Detalha os procedimentos adotados para a coleta de dados e as simulações realizadas no software HOMER. São descritos os parâmetros de entrada, como demanda energética, dados de irradiação solar e vazão do córrego, além dos critérios econômicos e técnicos utilizados para comparar as diferentes configurações.
- **Capítulo 4 - Resultados e Discussões:** Apresenta os resultados das simulações realizadas, comparando a operação da microrrede no modo operação isolado e interligado. São analisados aspectos como custos iniciais, operacionais, fração renovável, LCOE e NPC. Este capítulo também discute as implicações dos resultados para diferentes cenários de aplicação e destaca os fatores que influenciam a viabilidade de cada sistema.
- **Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros:** Sintetiza os resultados obtidos, relacionando-os com os objetivos propostos no início do trabalho. Também apresenta sugestões para estudos futuros que possam expandir ou complementar a pesquisa.

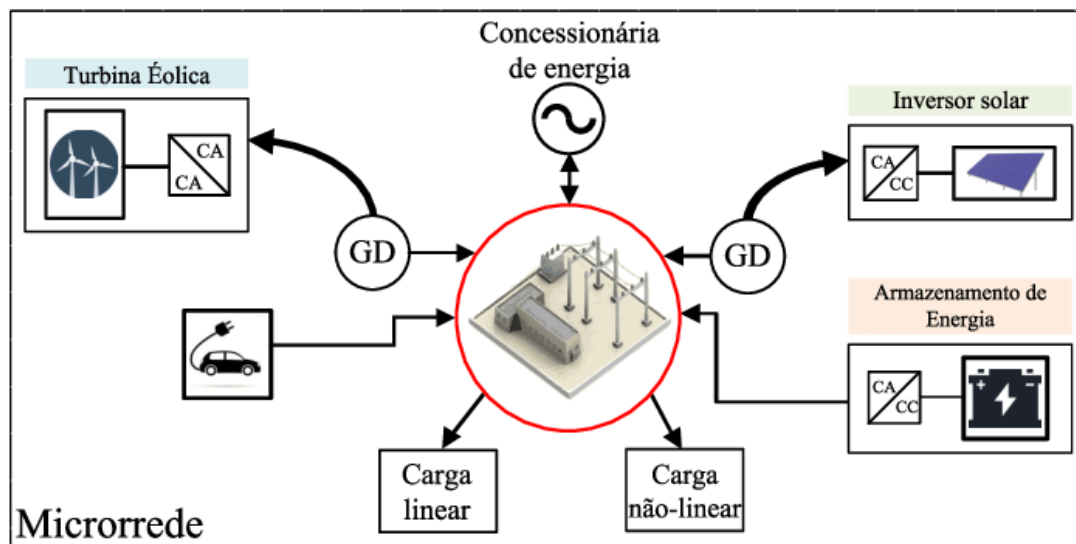


## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 MICRORREDES

Segundo Conrado uma microrrede é um conjunto de cargas com geração local que pode ser isolado da rede elétrica principal. Como visto na Figura 1, as microrredes podem ser soluções para um único cliente, podem servir vários clientes como uma microrrede de alimentador parcial ou podem abranger um alimentador ou subestação completo.

Figura 1 - Estrutura Típica de uma Microrrede



Fonte: Conrado

A operação básica de uma microrrede pode ser separada em três tipos principais com base em (SANDIA, 2019):

#### Tipo 1: Microrrede apenas para Backup

- Opera apenas quando a rede elétrica principal está desligada
- A geração é dimensionada para cobrir apenas cargas críticas

#### Tipo 2: Microrrede Sempre Isolada

- Nunca conectada à rede elétrica principal (por exemplo, um sistema remoto distante da rede principal)

- Possui geração local suficiente para cobrir toda a carga local

### Tipo 3: Microrrede Híbrida

- Opera conectada à rede parte do tempo e isolada parte do tempo
- Modo de operação determinado por fatores como custos, interrupções da rede principal, fornecimento de combustível etc.
- Possui geração local suficiente para cobrir todas as cargas locais críticas, pode ter geração suficiente para cobrir todas as cargas locais

As microrredes do Tipo 1 fornecem energia de backup para cargas críticas quando ocorre a indisponibilidade da rede elétrica principal, abrindo o disjuntor principal do ponto de acoplamento comum (PCC), isolando o sistema da rede principal. Após o isolamento, ocorre a inicialização e sincronização dos geradores com as cargas críticas servidas pela microrrede. Embora a microrredes Tipo 1 mais simples seja composta por um gerador e uma carga crítica, as microrredes Tipo 1 mais eficazes envolvem vários geradores e várias cargas críticas, pois geradores adicionais fornecem redundância e controles coordenados farão com que os geradores funcionem de maneira mais eficiente, resultando em uma energia de backup eficiente, confiável e resiliente (SANDIA, 2019).

As microrredes do Tipo 2 envolvem simplesmente geração local e carga e nunca são conectadas à rede principal. Esses sistemas podem ser chamados de "off-grid". Nas microrredes do Tipo 2, é essencial combinar adequadamente geração e carga para operação contínua. As microrredes do Tipo 2 exigirão maiores recursos de geração, suprimentos de combustível e sistemas de armazenamento de energia do que as microrredes do Tipo 1 ou Tipo 3, uma vez que devem operar constantemente de forma autônoma. Embora não seja necessário um seccionador para isolamento da rede elétrica principal, as microrredes do Tipo 2 podem ter interruptores de isolamento para separar cargas críticas de cargas não críticas durante períodos de baixa geração (por exemplo, devido à escassez de combustível ou falta de recurso eólico ou solar) (SANDIA, 2019).

As microrredes do Tipo 3 são a opção mais flexível. Essas microrredes podem operar conectadas à rede ou isoladas da rede elétrica principal. As microrredes do Tipo 3 terão pelo menos geração para cobrir suas cargas críticas e, muitas vezes, terão geração para cobrir todas as cargas.

O cenário posterior de geração para suprir todas as cargas fornece flexibilidade significativa para responder a sinais da rede, como preços de horário de uso, solicitações de resposta à demanda ou interrupções da rede, mantendo energia confiável para todas as cargas na microrrede. Durante períodos de alta carga da microrrede, a microrrede pode retirar energia da rede elétrica principal para complementar sua geração local. Durante períodos de baixa carga da microrrede, pode ser possível vender energia de volta para a rede principal. Injetar energia na rede principal pode ser particularmente valioso durante períodos de pico de carga da rede principal e durante eventos de resiliência que stressam a rede principal (SANDIA, 2019).

Os recursos de geração em microrredes são recursos de energia distribuída (*Distributed Energy Resources* - DERs). Os DERs podem incluir motores diesel e a gás, microturbinas, células de combustível, PV, eólica, biomassa e armazenamento de energia. Esses recursos de geração local aumentam a confiabilidade fornecendo energia as cargas críticas quando a microrrede está isolada. Quando não estiver isolada, o excesso de geração poderá ser vendido de volta à concessionária para compensar os custos de capital e operação dos DERs. Os DERs também podem ser usados como dispositivos de redução de pico, operando apenas quando as cargas da microrrede são grandes e é desejável reduzir o consumo líquido da concessionária (por exemplo, para minimizar um custo de capacidade).

Os requisitos do local impactarão quais recursos de geração são melhores e como os geradores podem funcionar. A energia renovável, incluindo energia solar e eólica, especialmente quando combinada com armazenamento de energia, é particularmente atraente para microrredes do Tipo 2 e Tipo 3, embora os recursos eólicos e solares variem de acordo com a localização e a estação. (SANDIA, 2019).

Em muitos casos, uma grande quantidade de necessidades de geração pode ser suprida pelos recursos renováveis e complementada conforme necessário por outra geração, como geradores diesel ou absorvendo energia da rede principal para as microrredes do Tipo 3.

### **2.1.1 Flexibilidade de uma Microrrede**

Uma microrrede deve ter capacidades projetadas para fazê-la operar com flexibilidade e eficiência. O armazenamento de energia com tempos de resposta rápidos pode ser usado para evitar

que cargas não interruptivas sofram curtas interrupções durante a transição de uma microrrede entre o modo conectado à rede e o modo isolado.

Sem armazenamento de energia, pode haver uma breve interrupção (por exemplo, 10 a 60 segundos) ao passar do modo conectado à rede para o modo isolado, à medida que os recursos de geração da microrrede são iniciados e sincronizados com uma frequência padrão. O armazenamento de energia tem benefícios adicionais de poder ajudar a controlar a variação na geração.

O sistema de armazenamento pode amortecer a variabilidade dos sistemas solares ou eólicos causada por variações na irradiação solar ou mudanças de velocidade do vento. Se for grande o suficiente, o armazenamento de energia também pode ajudar a lidar com a variabilidade diária, como picos de carga à noite e o ciclo diurno da energia fotovoltaica (ou seja, nenhuma irradiação solar à noite). Como regra geral, muitas vezes tem sido econômico instalar alguma quantidade de armazenamento de energia quando a geração variável excede cerca de 20% da geração total da microrrede para evitar o excesso de rampa de outros recursos de geração (geradores diesel ou a gás natural, microturbinas etc.). (SANDIA, 2019).

### **2.1.2 Microrredes: Atributos Fundamentais**

A microrrede avançada, de acordo com SANDIA (2019), deve atender a cinco atributos essenciais para garantir a segurança energética. O primeiro atributo, segurança integrada, garante que a energia seja fornecida ao usuário final de maneira segura e resiliente a ameaças cibernéticas e físicas, incluindo ataques terroristas. A microrrede deve ser desenvolvida com a segurança como preocupação principal, garantindo que não haja perigo mesmo durante interrupções não planejadas da rede principal ou das unidades geradoras locais. O projeto também deve incluir padrões de segurança cibernética robusta, como criptografia e firewalls, e considerar a localização física dos componentes para mitigar ameaças externas. Por exemplo, é essencial que a abertura do interruptor PCC seja bem executada para isolar o microrrede durante interrupções, evitando a injeção de energia de volta à rede principal, que é considerada desenergizada. Além disso, a topologia local e as ameaças climáticas devem ser consideradas para localização ativa de maneira segura.

O segundo atributo, confiabilidade, reflete a capacidade do sistema de energia de atender às demandas elétricas críticas. Embora a confiabilidade total possa não ser garantida, a instalação de microrredes pode melhorar significativamente a confiabilidade local. A presença de múltiplos geradores reduz tanto o número de pontos de falha associados à transmissão de energia de longa distância quanto os pontos únicos de falha no local.

O terceiro atributo, sustentabilidade, diz respeito à capacidade de operar o sistema de energia de maneira prolongada e sustentável, sem comprometer o futuro. A inclusão de fontes renováveis, como a solar, pode reduzir ou eliminar a dependência de combustíveis fósseis, sendo crucial uma análise de sustentabilidade que considere a disponibilidade de recursos e promova estratégias para minimizar a dependência de recursos esgotáveis e reduzir emissões de carbono.

O quarto atributo, eficiência de custo, avalia a capacidade de fornecer energia elétrica segura e confiável a um custo acessível. É importante analisar os custos de diferentes opções de infraestrutura de microrredes e os benefícios da maior confiabilidade em contraposição aos prejuízos causados por danos prolongados, onde a adição de energia renovável pode levar à redução de custos.

Finalmente, para abordar a resiliência, a microrrede deve se adaptar a ameaças ambientais e manufaturadas em grande escala, mantendo-se operacional, minimizando assim as consequências catastróficas que afetam a qualidade de vida, a atividade econômica, a segurança nacional e as operações de infraestrutura crítica quando ocorrem eventos de ameaça importantes. Uma abordagem de resiliência deve considerar a entrega de eletricidade não apenas como um fluxo de elétrons, mas como algo que presta serviços, interage e impacta pessoas e sociedades.

## 2.2 MICRO CENTRAIS HIDRELÉTRICAS;

Uma Micro Centrais Hidrelétrica (MCH) é uma instalação de geração de energia hidrelétrica de pequena escala, projetada para aproveitar a energia da água em cursos d'água menores, como riachos, córregos ou pequenos rios. Essas centrais são caracterizadas por sua capacidade de geração de energia relativamente baixa em comparação com usinas hidrelétricas de grande porte, conforme características descritas na Tabela 1. (ELETROBRAS, 2023).

Tabela 1 - Classificação das PCHs

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA DE PROJETO - H <sub>d</sub> (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	P < 100	H <sub>d</sub> < 15	15 < H <sub>d</sub> < 50	H <sub>d</sub> > 50
MINI	100 < P < 1.000	H <sub>d</sub> < 20	20 < H <sub>d</sub> < 100	H <sub>d</sub> > 100
PEQUENAS	1.000 < P < 30.000	H <sub>d</sub> < 25	25 < H <sub>d</sub> < 130	H <sub>d</sub> > 130

Fonte: ELETROBRAS, (2023)

A principal função de uma MCH é converter a energia cinética da água em eletricidade de forma limpa e renovável. O processo envolve a passagem da água através de uma turbina, que é conectada a um gerador elétrico. À medida que a água flui sobre a turbina, ela gira a turbina, que, por sua vez, gera eletricidade. A energia gerada pode ser usada localmente ou conectada a uma rede elétrica maior, fornecendo energia para áreas rurais ou comunidades remotas.

As MCHs são valorizadas por sua capacidade de produzir eletricidade de forma sustentável, com baixa emissão de carbono e impacto ambiental em comparação com outras fontes de energia. Elas são particularmente adequadas para áreas rurais, onde a topografia e a disponibilidade de recursos hídricos podem favorecer sua implantação, contribuindo para a geração de energia limpa e renovável em escala local.

O estudo "HIDRELÉTRICA A FIO D'ÁGUA" realizado por Perszel Junior et al. (2019) apresenta uma análise do potencial energético de uma Micro Central Hidrelétrica (MCH) a fio d'água em um afluente localizado no norte do Rio Grande do Sul. A pesquisa teve como objetivo ampliar o conhecimento acerca da microgeração de energia, uma alternativa renovável com amplo campo de aplicação em território nacional. De acordo com este estudo, as MCHs a fio de água são uma alternativa viável e sustentável de produção de energia elétrica, apresentando vantagens tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Segundo Reis (2011), as MCHs não necessitam de grandes reservatórios de água, o que reduz o impacto ambiental e social da construção dessas centrais hidrelétricas. Além disso, as MCHs podem ser instaladas em rios ou córregos de pequeno

porte, o que minimiza o impacto ambiental e a necessidade de deslocamento de comunidades locais.

Do ponto de vista econômico, as MCHs apresentam uma viabilidade econômica interessante, especialmente em regiões remotas ou isoladas. Segundo Perszel Junior et al. (2019), as MCHs podem ser uma opção viável para a geração de energia elétrica em áreas remotas ou para a diversificação da matriz energética em regiões com recursos hídricos limitados. Além disso, as MCHs apresentam um menor investimento de capital em comparação com outras fontes de energia elétrica.

Como destacado por Perszel Junior et al. (2019), as MCHs são uma alternativa viável e sustentável de produção de energia elétrica que pode ser utilizada em diversas regiões do mundo, especialmente em áreas remotas ou isoladas.

### 2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Kruger, Zanella (2023) destacam que o consumo de energia elétrica está aumentando tanto no Brasil quanto no mundo, e devido à escassez de recursos naturais, é necessário buscar fontes renováveis de energia. Embora as usinas hidrelétricas sejam uma opção no Brasil, elas causam grande impacto ambiental. Portanto, a energia solar fotovoltaica é apontada como uma excelente alternativa, pois é uma fonte de energia renovável, inesgotável e não poluente.

Para analisar a viabilidade econômico-financeira desse projeto, o estudo utilizou diversos indicadores, como valor presente líquido, payback descontado, valor anual uniforme equivalente e taxa interna de retorno. Os resultados demonstraram que o projeto de implantação de energia solar fotovoltaica é viável, considerando os dados projetados, com um payback descontado de 5,4 anos. Além disso, o Brasil possui um grande potencial para a produção de energia solar devido à abundante radiação solar ao longo do ano.

A energia solar fotovoltaica pode reduzir os custos e diversificar a matriz energética em propriedades rurais, contribuindo para a sustentabilidade ambiental Kruger, Zanella (2023).

A revisão teórica do estudo abordou conceitos sobre energias renováveis, energia solar fotovoltaica e indicadores para análise de viabilidade econômico-financeira de projetos. A pesquisa

exploratória foi conduzida por meio de um estudo de caso na propriedade rural aviária, considerando fatores como tamanho dos aviários, tipo de telhado, tamanho do disjuntor e tipo de rede, que influenciam no modelo e material a ser utilizado para a geração de energia solar fotovoltaica.

Os resultados indicaram que o projeto de implantação de energia solar fotovoltaica é viável para o período analisado, considerando os dados projetados. Foi concluído que o projeto poderá gerar retorno a partir do sexto ano de implantação. A energia solar fotovoltaica é destacada como uma fonte de energia renovável com vantagens significativas, como a inesgotabilidade, baixo impacto ambiental e a redução de custos ao longo dos anos.

Em resumo, o estudo evidenciou a viabilidade econômico-financeira da implantação de energia solar fotovoltaica em uma propriedade rural de Santa Catarina, considerando os indicadores analisados. A energia solar fotovoltaica pode contribuir para a redução de custos e diversificação da matriz energética em propriedades rurais, colaborando para a sustentabilidade ambiental. Esse estudo foi realizado em uma propriedade rural aviária no oeste de Santa Catarina e analisou fatores técnicos, econômicos e financeiros para a implementação desse tipo de energia renovável.

#### 2.4 TEORIAS SOBRE A VIABILIDADE DE CADA UMA DESSAS TECNOLOGIAS.

A análise da viabilidade econômica e ambiental de tecnologias de geração de energia renovável, como sistemas fotovoltaicos e micro centrais hidrelétricas, é fundamental para entender seu papel na matriz energética. Essa avaliação é frequentemente realizada com base em indicadores como o Custo Nivelado de Energia (LCOE), o Custo Presente Total (NPC) e a Fração Renovável. Os sistemas fotovoltaicos, que convertem a luz solar em eletricidade, têm se tornado cada vez mais populares devido à sua capacidade de gerar energia limpa e sustentável. Um dos principais benefícios dessa tecnologia é a sua modularidade, permitindo a instalação em diferentes escalas, desde pequenas residências até grandes usinas solares. A utilização de micro inversores em sistemas fotovoltaicos oferece vantagens significativas em termos de eficiência e segurança, pois cada módulo opera independentemente, mitigando os efeitos do sombreamento e aumentando a



produção total de energia. Como afirmam Silva et al. (2020), essa característica contribui para uma maior eficiência na geração.

O LCOE é uma métrica crucial que permite comparar o custo da energia gerada por diferentes fontes. Ele é calculado dividindo-se o custo total do sistema, incluindo instalação, operação e manutenção, pela quantidade total de energia que se espera gerar ao longo da vida útil do sistema. Para sistemas fotovoltaicos, o LCOE tem diminuído significativamente nos últimos anos devido à redução dos custos dos painéis solares e à eficiência crescente das tecnologias. Martins e Pereira (2021) destacam que essa queda nos custos torna os sistemas fotovoltaicos cada vez mais competitivos no mercado energético.

O NPC considera todos os custos associados ao projeto ao longo do tempo, descontados para o presente, incluindo custos iniciais, despesas operacionais e receitas esperadas. Essa métrica é essencial para investidores que buscam entender a viabilidade financeira de um projeto fotovoltaico em comparação com outras opções energéticas. Oliveira e Souza (2022) enfatizam que essa análise permite uma visão mais abrangente sobre a sustentabilidade financeira dos projetos.

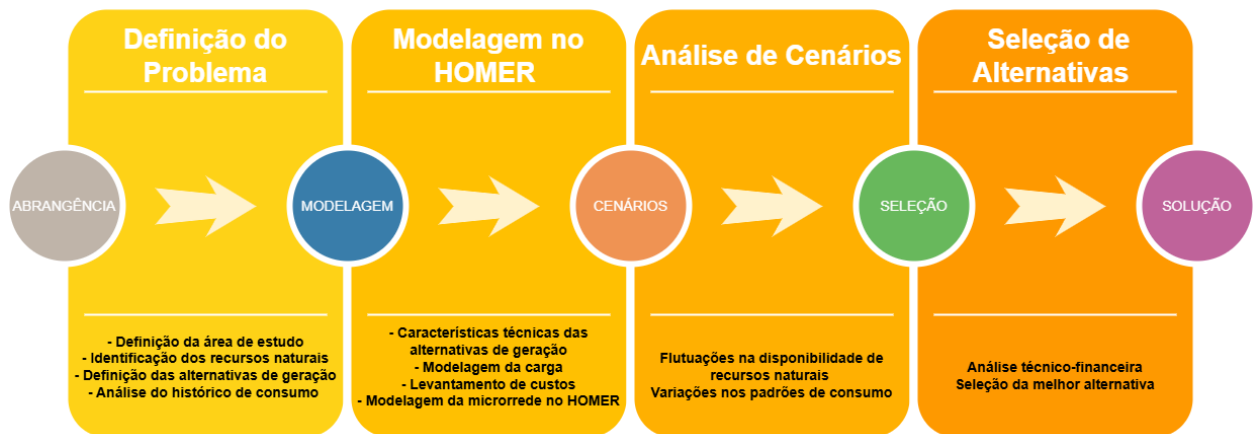
As MCHs representam uma alternativa eficiente para a geração de energia em locais com disponibilidade hídrica. Elas são projetadas para operar com baixas quedas d'água e têm um impacto ambiental reduzido quando comparadas às grandes hidrelétricas. As MCHs podem ser instaladas em córregos ou rios pequenos, aproveitando a energia da água corrente sem necessidade de grandes represamentos. Costa e Almeida (2023) afirmam que essa característica torna as MCHs uma solução viável em regiões onde a infraestrutura elétrica é limitada.

A viabilidade econômica das MCHs é frequentemente avaliada através do LCOE e do NPC. O LCOE para micro centrais hidrelétricas pode ser competitivo em relação a outras fontes renováveis, especialmente em regiões onde a infraestrutura elétrica é limitada. Além disso, as MCHs podem gerar receita através da venda de energia excedente para a rede elétrica, conforme observado por Santos e Lima (2022).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada inclui uma abordagem experimental e comparativa para definir a melhor combinação de fontes renováveis de geração distribuída de energia elétrica para a microrrede, bem como fornecer subsídios para potencializar a autonomia energética de zonas rurais. As principais etapas metodologia são ilustradas na Figura 2.

Figura 2 - Principais etapas da metodologia proposta



Fonte: Próprio Ator.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A etapa de definição do problema consiste em um levantamento detalhado da área de estudo, incluindo a identificação precisa dos recursos naturais disponíveis. Paralelamente, avalia-se a demanda energética da localidade, considerando o perfil de consumo. A análise dos valores das tarifas de energia elétrica vigentes permite avaliar a viabilidade econômica das alternativas de geração. Com base nesses dados, são definidas as características técnicas das diferentes opções de geração, como a capacidade instalada, o tipo de tecnologia e os impactos ambientais. Por fim, uma pesquisa de mercado minuciosa é realizada para estimar os custos de investimento e operação de cada alternativa, considerando os preços dos equipamentos, materiais e mão de obra.

### 3.2 MODELAGEM NO HOMER

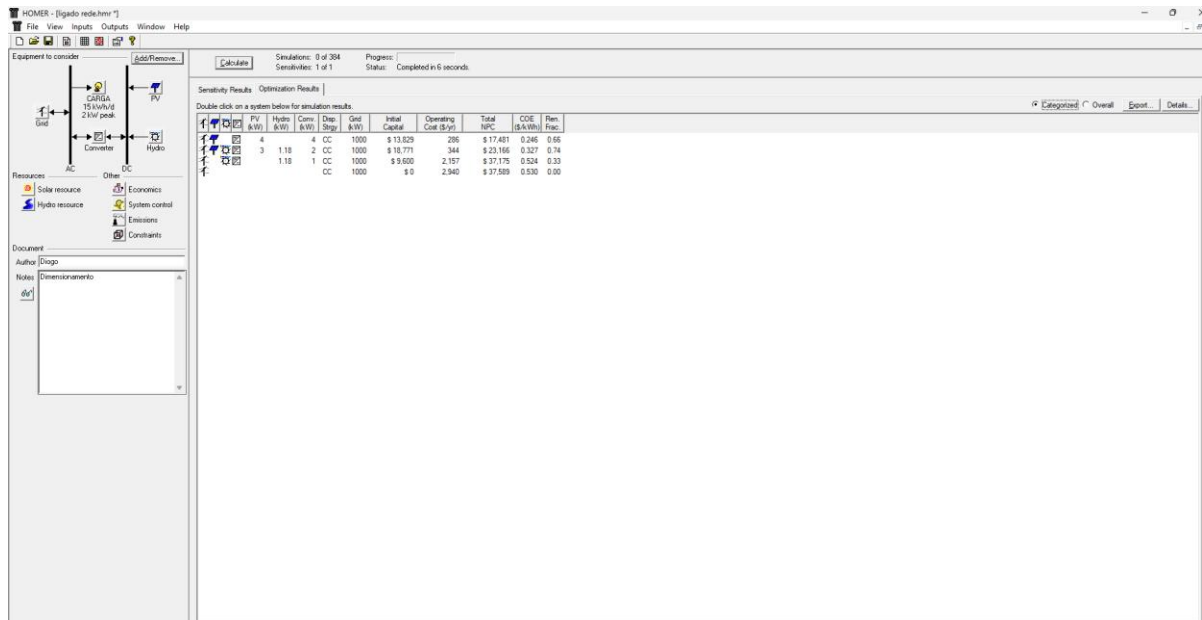
A partir da definição e caracterização do problema, realiza-se a modelagem da microrrede no software HOMER (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dos Estados Unidos. A decisão de utilizar o HOMER se baseia em sua capacidade de simular diferentes configurações e cenários, permitindo obter resultados técnicos e financeiros precisos de forma ágil. Essa facilidade de uso, aliada a um histórico robusto e atualizações frequentes, torna o HOMER uma ferramenta confiável e, amplamente, utilizada tanto no meio acadêmico quanto na prática profissional (SILVA; COSTA; ORTIZ, 2018). Como mencionado por Silva et al. (2018), “o uso do HOMER é amplamente reconhecido no meio acadêmico devido à sua confiabilidade e às frequentes atualizações que garantem sua eficácia na modelagem de sistemas híbridos”

O HOMER se destaca por sua habilidade em realizar uma otimização combinatória, que identifica a solução mais vantajosa em termos de custo-benefício, considerando os recursos energéticos disponíveis. Essa funcionalidade é crucial para a análise da viabilidade da MCH em conjunto com a geração fotovoltaica, pois possibilita a comparação de múltiplas configurações e a avaliação de como essas fontes de energia podem interagir para atender à demanda energética. Informações como histórico de consumo, características do local, disponibilidade de recursos hídricos e dados sobre a instalação do sistema fotovoltaico são essenciais para essa análise.

O processo de análise no HOMER é dividido em três etapas principais: simulação, otimização e análise de sensibilidade. Na fase de simulação, avalia-se o desempenho do sistema ao longo do ano, considerando as variações na geração de energia e na demanda. O HOMER considera a operação de uma microrrede híbrida para horizontes anuais, com intervalos que variam de um minuto a uma hora” (HOMER ENERGY, 2023). Em seguida, na etapa de otimização, avalia-se diferentes combinações dos componentes do sistema para determinar a configuração que minimiza os custos totais ao longo do ciclo de vida. Por último, a análise de sensibilidade permite que os usuários explorem como mudanças em fatores externos, como preços de energia ou condições climáticas, afetam os resultados econômicos.

A interface do HOMER é intuitiva e facilita a modelagem, bem como a visualização dos resultados resumidos. A tela inicial do HOMER está ilustrada na Figura 3, demonstrando a simplicidade e a eficiência da interface para os usuários.

**Figura 3 - Tela Inicial do HOMER**




**Fonte: HOMER ENERGY.**

Na aba "Entradas de Recursos Solares" do software HOMER que é ilustrada através da Figura 4, os recursos solares podem ser configurados através da inserção manual de latitude e longitude, o que permite obter automaticamente as variações na irradiação solar com base na localização geográfica. Além disso, os usuários têm a opção de inserir manualmente os dados de irradiação solar, como o Índice de clareza e o diário de radiação, para ajustar a simulação às condições específicas do local. Essa flexibilidade facilita a modelagem precisa do desempenho esperado para sistemas fotovoltaicos sob diferentes condições climáticas e geográficas. A visualização desses dados gráficos facilita a compreensão das variações sazonais de irradiação solar, crucial para melhorar e planejar a implementação de projetos de energia solar.

Figura 4 - Entradas de Recursos Solares

Solar Resource Inputs

File Edit Help

 HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Location

Latitude  °  '  North  South Time zone

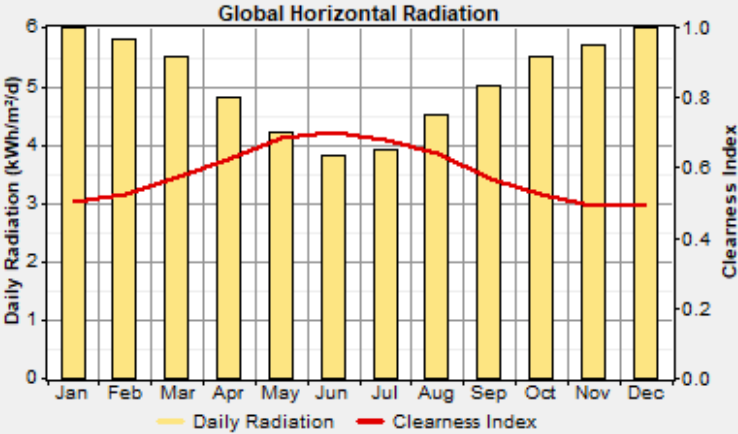
Longitude  °  '  East  West

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /d)
January	0.504	6.000
February	0.525	5.800
March	0.575	5.500
April	0.622	4.800
May	0.683	4.200
June	0.703	3.800
July	0.682	3.900
August	0.642	4.500
September	0.568	5.000
October	0.524	5.500
November	0.490	5.700
December	0.495	6.000
Average:	0.565	5.055

Global Horizontal Radiation



Plot... Export... Help Cancel OK

Scaled annual average (kWh/m<sup>2</sup>/d)  {..}


Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba "*Hydro Resource Inputs*", indicada na Figura 5, os recursos hídricos são configurados inserindo manualmente os valores mensais do fluxo do rio ou córrego, em litros por segundo (L/s). Esses valores podem ser ajustados para coincidir com a média anual desejada através do recurso de escala de média anual. Esta funcionalidade é essencial para simular e otimizar a produção de energia de turbinas hidrelétricas, pois utiliza esses dados para calcular a energia que pode ser produzida, com base na disponibilidade de água

Figura 5 - Entrada Recursos Hídricos

Hydro Resource Inputs

File Edit Help

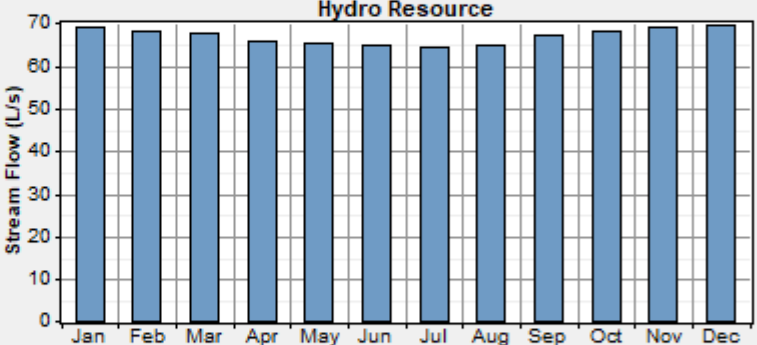
 HOMER uses hydro resource inputs to calculate the power produced by the hydro turbine each hour of the year. Enter the average stream flow available to the hydro turbine each month. For calculations, HOMER uses scaled data: baseline data scaled up or down to the scaled annual average value.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

Month	Stream Flow (L/s)
January	69.0
February	68.3
March	67.8
April	65.9
May	65.4
June	64.7
July	64.2
August	64.7
September	67.1
October	68.3
November	69.0
December	69.5
Annual average:	67.0



Residual flow (L/s)

Scaled annual average (L/s)

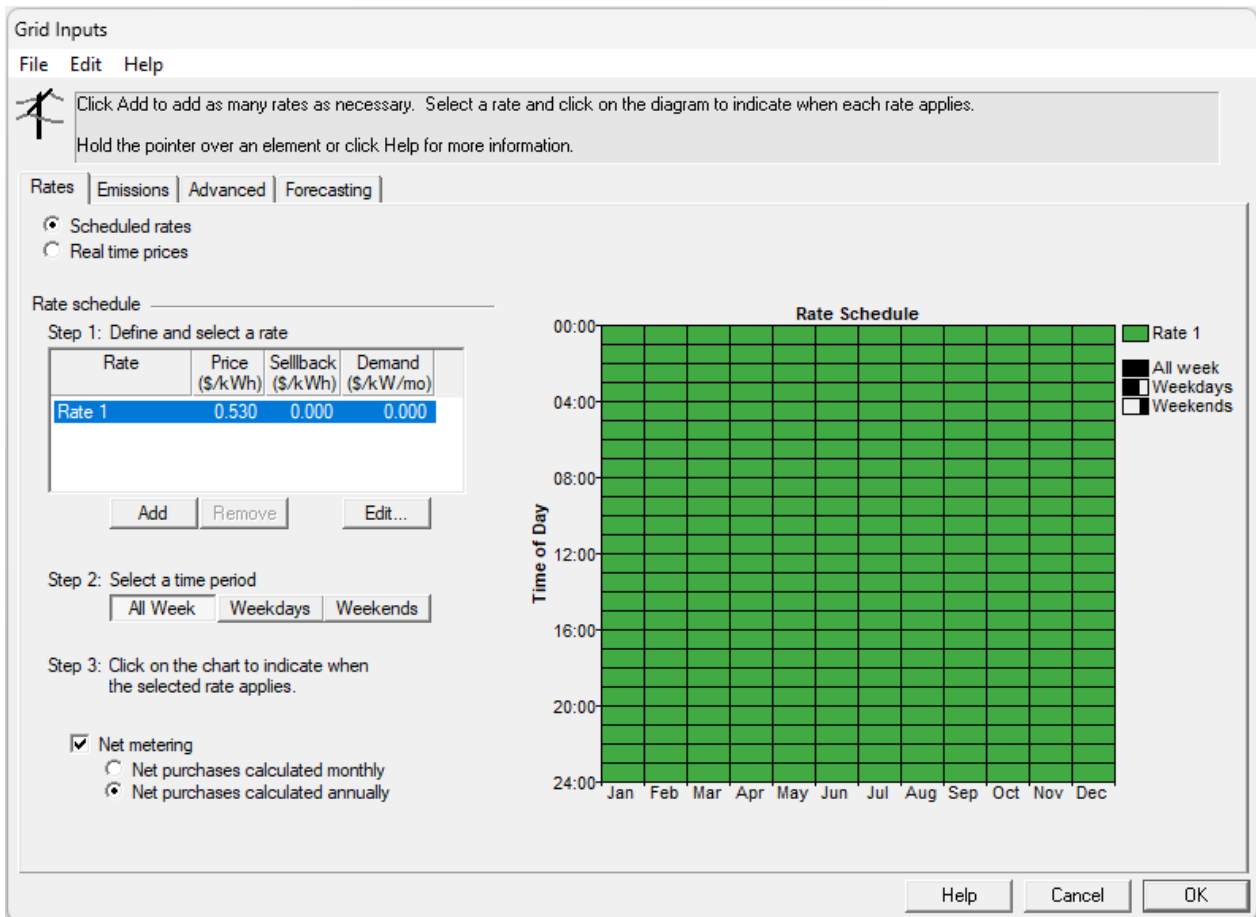
Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba “*Grid Inputs*”, apresentada na Figura 6, configuram-se os detalhes da rede elétrica que alimenta o local, incluindo as tarifas de compra e venda de energia e, se necessário, as taxas de demanda. Os usuários podem definir o preço por kWh de energia comprada da rede e o preço por kWh de energia vendida de volta à rede, o que é essencial para sistemas que geram excedentes. Além disso, uma tarifa de demanda pode ser ajustada para refletir o custo associado à capacidade máxima de energia utilizada ou reservada, comum em contextos próximos.

A programação das tarifas pode ser adaptada para diferentes períodos, permitindo que o software simule condições de tarifação diferenciadas para dias úteis, finais de semana ou durante todo o período semanal. Isso ajuda a refletir sobre as variações no custo da energia durante os horários de pico e fora de pico, conforme as práticas tarifárias.

Além disso, podem ser ajustados bandeiras tarifárias que alteram os custos de energia com base nas condições de geração e demanda da rede elétrica. Essa funcionalidade é útil para analisar o impacto financeiro.

**Figura 6 - Detalhes da Rede Elétrica**



Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba "Primary Load Inputs" do software HOMER, presente na Figura 7, a configuração da demanda de carga do sistema é essencial para modelar com precisão o consumo de energia ao longo do tempo. Esta aba permite aos usuários detalhar o perfil de carga de várias maneiras, refletindo variações horárias diárias e sazonais ao longo do ano.

Os usuários podem inserir valores específicos de carga (em kW) para cada hora do dia, conforme mostrado no gráfico "*Daily Profile*". Esses valores são fundamentais para entender os padrões de consumo energético e para projetar sistemas que atendam às necessidades de energia durante diferentes períodos do dia.

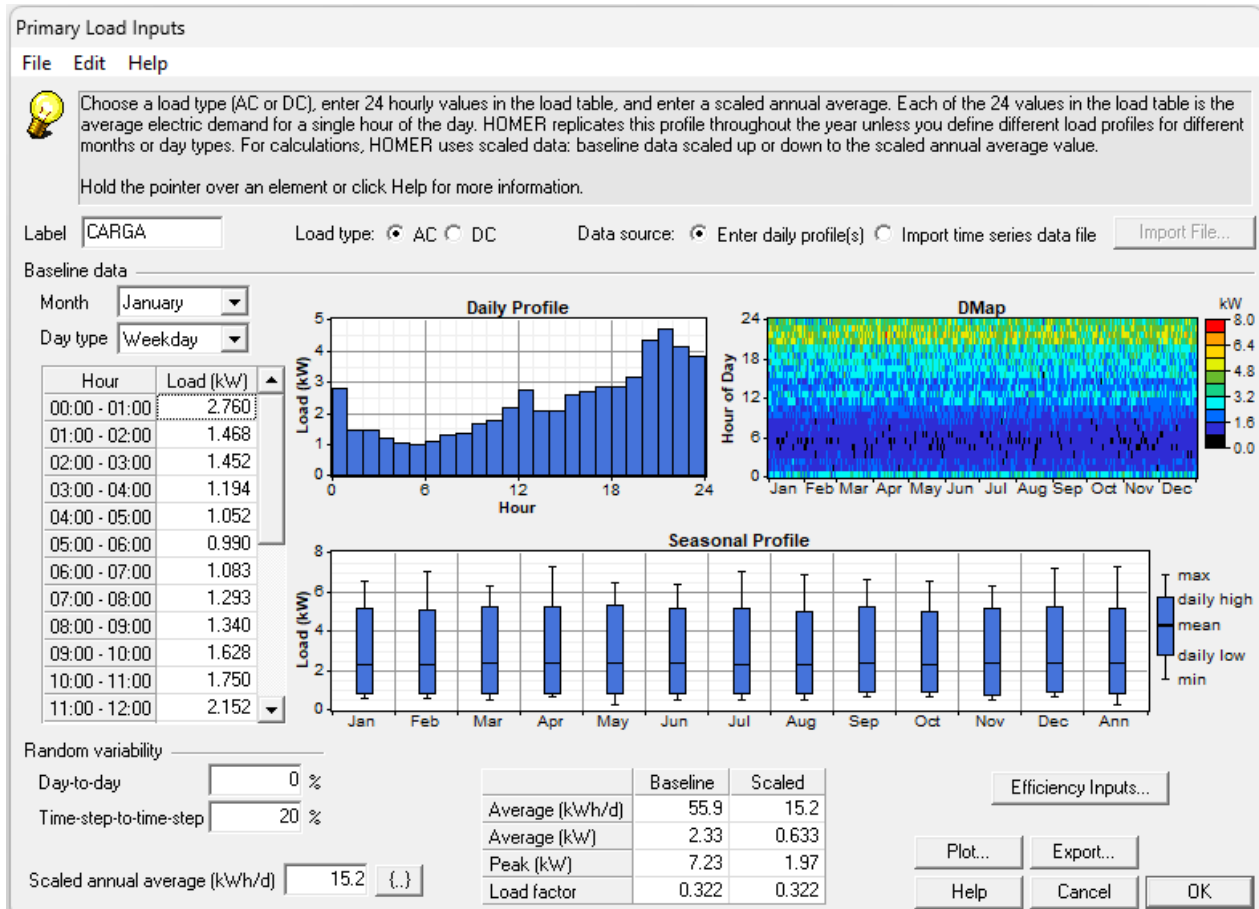
Além disso, é possível configurar diferentes perfis de carga para dias úteis e finais de semana. Isso é útil em cenários onde o consumo de energia varia significativamente entre dias de trabalho e descanso, possibilitando ajustes mais precisos na análise da demanda energética.

O HOMER também dispõe da função "*Perfil Sazonal*", um gráfico de caixa que mostra as variações de carga máxima, alta diária, média, baixa diária e mínima para cada mês, permitindo visualizar as flutuações sazonais na demanda de energia. Essas variações são importantes para a simulação de sistemas de energia, especialmente em locais com diferenças climáticas acentuadas ao longo do ano.

Além disso, a aba inclui um "*DMap*" (Mapa de Densidade), que ilustra a intensidade de uso de energia a cada hora do dia ao longo de cada mês do ano, fornecendo uma representação visual do consumo de energia ao longo do tempo. Esta visualização ajuda a identificar padrões e picos de carga que podem influenciar o dimensionamento e a eficiência dos sistemas de energia específicos.



Figura 7 - Detalhes da Carga



Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba "PV Inputs", exibida na Figura 8, os usuários têm a oportunidade de configurar todos os aspectos essenciais de um sistema fotovoltaico. Este módulo permite inserir detalhes sobre os custos associados à instalação, manutenção e substituição dos componentes do sistema fotovoltaico. O usuário pode definir vários tamanhos do sistema em quilowatts (kW), que vão desde pequenas instalações residenciais até grandes configurações comerciais, e associar a cada um desses tamanhos os custos de capital inicial, os custos anuais de operação e manutenção, e os custos esperados para substituição de componentes ao longo da vida útil do sistema.

Além dos custos, várias propriedades técnicas do sistema também são configuráveis. Isso inclui a escolha entre corrente alternada (AC) ou corrente contínua (DC) para a corrente de saída, o que depende da integração do sistema com outros equipamentos e da infraestrutura elétrica existente. A vida útil esperada do sistema pode ser especificada, adicionalmente com um fator que

ajusta a eficiência nominal baseada em condições operacionais reais. A direção e o azimute dos painéis solares são parâmetros críticos que afetam diretamente a quantidade de energia solar captada, e, portanto, a eficiência do sistema.

Figura 8 - Detalhes PV

**PV Inputs**  
File Edit Help

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the PV (photovoltaic) system, including modules, mounting hardware, and installation. As it searches for the optimal system, HOMER considers each PV array capacity in the Sizes to Consider table.

Note that by default, HOMER sets the slope value equal to the latitude from the Solar Resource Inputs window.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

**Costs**

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
7.000	14385	14385	500

{ } { } { }

**Sizes to consider**

Size (kW)
0.000
2.000
3.000
4.000
5.000
6.000
7.000

**Cost Curve**

**Properties**

Output current  AC  DC

Lifetime (years)  { }

Derating factor (%)  { }

Slope (degrees)  { }

Azimuth (degrees W of S)  { }

Ground reflectance (%)  { }

**Advanced**

Tracking system  ▾

Consider effect of temperature

Temperature coeff. of power (%/°C)  { }

Nominal operating cell temp. (°C)  { }

Efficiency at std. test conditions (%)  { }

Help Cancel OK

Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba "Hydro Inputs", mostrada na Figura 9, modelam-se os parâmetros das MCH. Esta seção permite detalhar tanto os aspectos econômicos quanto técnicos de uma instalação hidráulica, essenciais para avaliar a viabilidade e eficácia do projeto.

Figura 9 - Detalhes MCH

Hydro Inputs

File Edit Help

HOMER models run-of-river hydro installations. Enter the capital cost, available head, and turbine design flow rate. For Economics values, include the civil works and all costs associated with the hydro system. HOMER calculates the nominal power from the available head, design flow rate, and efficiency.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Economics

Capital cost (\$) 11988 (.)

Replacement cost (\$) 11988 (.)

O&M cost (\$/yr) 500 (.)

Lifetime (years) 20 (.)

Turbine

Available head (m) 5 (.) Nominal power: 1.18 kW

Design flow rate (L/s) 40 (.)

Minimum flow ratio (%) 50 (.) Generator type  AC

Maximum flow ratio (%) 80 (.)  DC

Efficiency (%) 60 (.)

Intake pipe

Pipe head loss (%) 3.25 (.) Pipe Head Loss Calculator...

Systems to consider

Simulate systems both with and without the hydro turbine

Include the hydro turbine in all simulated systems

Help Cancel OK

Fonte: HOMER ENERGY.

Os parâmetros econômicos incluem o custo de capital inicial, que é o investimento necessário para construir e instalar uma hidrelétrica, bem como o custo de substituição, que contempla as despesas previstas para substituir componentes ao longo da vida útil do sistema. Além disso, os custos operacionais e de manutenção anual são especificados, junto com a vida útil esperada do sistema. Como resultado, tem-se a base de cálculos de retorno sobre investimento e outros indicadores financeiros.

Tecnicamente, a configuração da turbina envolve a definição da altura disponível (*Available Head*), que influencia diretamente a capacidade de geração de energia ao determinar a quantidade de energia potencial que pode ser convertida em elétrica. Uma vazão de projeto define quantos litros, por segundo, a turbina pode processar, crucial para entender a produção de energia esperada. As configurações de fluxo mínimas e máximas garantem que o sistema possa operar

eficientemente sob diferentes condições de fluxo de água. A eficiência determina o desempenho do conjunto turbina-gerador no processo de conversão da energia hidráulica em energia elétrica. Um componente adicional importante é o cálculo das perdas de carga no tubo de adução (*Pipe Head Loss*), que pode afetar significativamente a eficiência geral do sistema. O software oferece ferramentas para calcular essas perdas, ajudando na otimização do design da infraestrutura.

Na aba "*Converter Inputs*", ilustrada na Figura 10, são modelados os conversores essenciais para sistemas que interagem com componentes de corrente contínua (DC) e alternada (AC), como inversores e retificadores. Essa funcionalidade é vital para integrar diversas fontes de energia de forma eficiente. Os custos de capital, opções e operações de cada conversor são especificados. A vida útil e a eficiência de conversão do equipamento consideradas, facilitando a otimização do sistema para eficácia energética e sustentabilidade. Opções como a operação simultânea de inversores com geradores AC e ajustes de capacidade e eficiência dos retificadores permitem a modelagem precisa para sistemas híbridos.

A interface também exibe uma "Curva de Custo", que visualiza as variações de custos com diferentes tamanhos de conversores, auxiliando na decisão sobre as configurações mais econômicas e eficazes para o projeto. Essas configurações garantem que o sistema de energia não seja apenas eficiente, mas também economicamente viável, maximizando a produção de energia e minimizando perdas.

Figura 10 - Detalhes do Inversor

Converter Inputs

File Edit Help

A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Costs

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
5.000	3000	3000	0

(.) (.) (.)

Sizes to consider

Size (kW)
0.000
1.000
2.000
4.000
5.000
10.000
20.000

Cost Curve

Cost (000 \$)

Size (kW)

— Capital — Replacement

Inverter inputs

Lifetime (years)  (.)

Efficiency (%)  (.)

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

Rectifier inputs

Capacity relative to inverter (%)  (.)

Efficiency (%)  (.)

Help Cancel OK

Fonte: HOMER ENERGY.

Na aba “Battery Inputs” mostrado na Figura 11, os usuários têm a capacidade de ajustar uma variedade de parâmetros que são fundamentais para a simulação de sistemas de armazenamento de energia usando baterias. Esse ajuste é crucial para o planejamento e a otimização eficaz dos sistemas de energia.

Além de permitir um manual de configuração das propriedades das baterias, como tensão nominal e capacidade nominal, que determina a quantidade de energia que uma bateria pode armazenar e liberar, o HOMER também oferece uma vantagem significativa: a existência de modelos de baterias pré-cadastrados. Esses modelos facilitam o processo de seleção e configuração para os usuários, pois já incluem especificações técnicas detalhadas que podem ser utilizadas como ponto de partida ou referência para simulações específicas.


Esses modelos pré-cadastrados abrangem uma ampla gama de tipos e marcas de baterias, fornecendo informações sobre o fabricante e permitindo acesso rápido ao site do fabricante para consultas mais feitas. Essa funcionalidade não apenas economiza tempo durante a fase de modelagem, mas também ajuda a garantir a precisão dos dados utilizados nas simulações.

Os custos associados, como capital, substituição e manutenção operacional, também são parte dos parâmetros incluídos, fornecendo uma base sólida para análise econômica do projeto. Isso é essencial para estimar o investimento inicial e os custos de longo prazo.

**Figura 11 - Detalhes da Bateria**

**Battery Inputs**

File Edit Help

 Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: **Vision 6FM200D** Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: Vision Battery	Nominal voltage: 12 V
Website: <a href="http://www.vision-batt.com">www.vision-batt.com</a>	Nominal capacity: 200 Ah (2.4 kWh)
	Lifetime throughput: 917 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	1480	1480	0.00

Sizes to consider

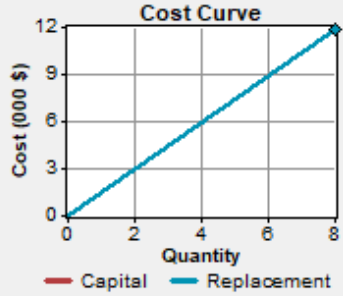
Strings
2

Advanced

Batteries per string:  (48 V bus)

Minimum battery life (yr):

**Cost Curve**



Cost (000 \$)

Quantity

— Capital — Replacement

Help Cancel OK

Fonte: HOMER ENERGY.

### 3.3 ANÁLISE DE CENÁRIOS

Nesta etapa é realizada uma análise de cenários de operação *on-grid* e *off-grid*, considerando um conjunto de variáveis e incertezas atreladas a geração renovável, de modo a obter subsídios para decisões mais estratégicas e resilientes.

### 3.4 SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

Esta etapa consiste em uma avaliação detalhada de diferentes alternativas, considerando tanto aspectos técnicos quanto econômicos. O objetivo principal é identificar a opção que oferece o melhor custo-benefício, alinhando as necessidades do projeto com as restrições financeira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso proposto tem como objetivo avaliar a viabilidade de estruturação de uma microrrede em uma propriedade rural da região Sul do Brasil, localizada no interior do município de Coronel Barros, denominada localidade da Linha Bussler, cuja localização é indicada na Figura 12.

**Figura 12 - Localização da propriedade rural**



**Fonte: Google Maps.**

A propriedade apresenta uma demanda energética contínua, resultante das atividades agrícolas e residenciais. A localização oferece recursos naturais, como água e radiação solar, que possibilitam a análise de diferentes opções de geração de energia, adaptando-se ao perfil de consumo e às condições ambientais da região. Esses fatores tornam este estudo de caso relevante para avaliar a variedade de sistemas de microgeração de energia, com o objetivo de promover a sustentabilidade e a autossuficiência energética.

#### 4.1.1 DEMANDA ENERGÉTICA



Os dados de consumo de energia elétrica por mês, obtidos a partir das faturas de consumo de energia elétrica da propriedade estão detalhados na Tabela 2. Além disso, apresenta-se o consumo médio diário para cada mês, calculando ao dividir o consumo mensal por número de dias entre cada leitura, permitindo uma análise mais detalhada das variações diárias ao longo do ano.

**Tabela 2 - Dados do Consumo de energia**

Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dias	32	33	28	30	31	30	30	31	31	28	30	27
Consumo (kWh)	381	357	267	363	342	344	362	363	369	350	409	324
Consumo Diário (kWh/d)	11,9	10,8	9,5	12,1	11,0	11,4	12,0	11,7	11,9	12,5	13,6	12,0

Fonte: Próprio Autor.

Além do consumo, coletaram-se informações das tarifas de energia elétrica (R\$0.530/kWh) praticados atualmente pela cooperativa local, responsável pelos serviços de distribuição de energia elétrica. Essa informação é fundamental para estimar os custos operacionais da propriedade e avaliar a previsão econômica dos sistemas alternativos de geração de energia. Tais dados são fundamentais para análise econômica no software HOMER.

#### 4.1.2 RECURSOS HÍDRICOS

A propriedade rural conta com córrego, cuja registro fotográfico é apresentado na Figura 13.

**Figura 13 - Local do córrego**



**Fonte: Próprio Autor.**

No intuito de avaliar a viabilidade de instalação de uma MCH, realizou o levantamento de dados de vazão e alturas das quedas de água. A altura de queda foi medida no ponto, onde uma MCH poderia ser instalada, proporcionando o dado necessário para calcular a potência do sistema hidrelétrico. Para determinar a vazão, utilizou-se o método do flutuador, usualmente utilizada para medir a vazão de pequenos cursos d'água (SANTOS et al., 2001).

Um trecho reto do córrego foi selecionado para garantir condições de largura e profundidade relativamente constantes, facilitando uma medição precisa, conforme a Figura 14. A largura da seção foi medida em vários pontos ao longo do trecho escolhido, resultando em uma média de 1,4 metros. Para a medição da velocidade, uma distância conhecida de 5 metros foi marcada ao longo do córrego, proporcionando um percurso adequado para o flutuador.

**Figura 14 - Trecho das medições**



**Fonte: Próprio Autor.**

Além disso, foram realizadas medições de tempo e profundidade ao longo dessa seção. O tempo foi registrado para cada percurso do flutuador, e a profundidade foi medida em pontos regulares da largura do córrego para obter a média da seção transversal. Os dados específicos de tempo e profundidade encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3 - Medições para cálculo da vazão**

	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Profundidade	10cm	12cm	20cm	31cm	20cm
Tempo	17,7s	18,3s	18,7s	12,8s	13,2s

**Fonte: Autor**

Para o cálculo do potencial de potência do sistema hidrelétrico, foi considerada uma altura de queda de 5 metros, considerando a topologia da propriedade. Esse valor foi estimado, pois a altura real pode variar conforme o ponto exato de captação da água e o local onde ocorrerá a geração de energia.

Para calcular a área da seção transversal do córrego, realizaram-se medições da profundidade em vários pontos ao longo da largura da seção escolhida, com intervalos de 20 cm entre cada medição.

A profundidade média ( $P_m$ ) foi calculada somando todas as medições de profundidade e dividindo pelo número total de medições realizadas. Em seguida, essa profundidade média foi multiplicada pela largura da seção para obter a área transversal ( $A$ ), expressa em metros quadrados ( $m^2$ ).

$$\text{Profundidade media} = \frac{10+12+20+31+20}{5} \quad (1)$$

$$\text{Profundidade media} = 18,6\text{cm} \quad (2)$$

$$\text{Area} = P_m * L \quad (3)$$

$$\text{Area} = 0,186 * 1,4 \quad (4)$$

$$\text{Area} = 0,26\text{m}^2 \quad (5)$$

#### 4.1.2.1 Medição da Velocidade da Água

Para medir a velocidade da água, utilizando-se um objeto que foi solto no início da seção marcada. Um cronômetro foi usado para medir o tempo que o flutuador levou para percorrer a distância de 5 metros. A medição foi repetida cinco vezes para garantir precisão, e o tempo médio foi calculado a partir dos valores obtidos. A velocidade média da água foi determinada dividindo-se a distância percorrida pelo tempo médio:

$$\text{Tempo médio} = \frac{17,7+18,3+18,7+12,8+13,2}{5} \quad (6)$$

$$\text{Tempo médio} = 16,14\text{s} \quad (7)$$

$$\text{Velocidade média} = \frac{5}{16,14} \quad (8)$$

$$\text{Velocidade média} = 0,30\text{m/s} \quad (9)$$



#### 4.1.2.2 Correção da Velocidade

Como a velocidade obtida é a da superfície da água, foi aplicada uma correção, uma vez que a velocidade média do fluxo é geralmente menor do que a da superfície. Utilizou-se um fator de correção de 0,85 para ajustar a velocidade média.

$$\text{Velocidade média corrigida} = 0,30 * 0,85 \quad (10)$$

$$\text{Velocidade média corrigida} = 0,26\text{m/s} \quad (11)$$

#### 4.1.2.3 Cálculo da Vazão

A vazão do córrego foi calculada multiplicando-se a área da seção transversal (A) pela velocidade corrigida (Vmc).

Este cálculo resultou na vazão em metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s).

$$\text{Vazão} = 0,26 * 0,26 \quad (12)$$

$$\text{Vazão} = 0,0676\text{m}^3/\text{s} \quad (13)$$

$$\text{Vazão} = 67,6\text{L/s} \quad (14)$$

### 4.1.3 RECURSOS SOLARES

Para a configuração do software HOMER e a simulação do desempenho de sistemas fotovoltaicos, optou pela utilização do site *Atlas Solar RS* ([www.atlassolarrs.com](http://www.atlassolarrs.com)), que fornece informações previstas sobre a irradiação solar de diversas localidades no estado do Rio Grande do Sul. Os dados utilizados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados de Irradiação Solar

<b>Município</b>	Santa Maria
<b>Latitude (°)</b>	-29,70000
<b>Longitude (°)</b>	-53,70000
<b>Altitude (m)</b>	95
	<b>Janeiro</b>
	6.424

<b>Irradiação Media (kWh/m<sup>2</sup>) dia</b>	<b>Fevereiro</b>	5.587
	<b>Março</b>	4.867
	<b>Abril</b>	3.988
	<b>Mai</b>	2.895
	<b>Junho</b>	2.320
	<b>Julho</b>	2.586
	<b>Agosto</b>	3.026
	<b>Setembro</b>	3.884
	<b>Outubro</b>	4.884
	<b>Novembro</b>	6.125
	<b>Dezembro</b>	6.858

Fonte: Atlas Solar RS

A irradiação solar média mensal permitirá ao HOMER realizar cálculos precisos quanto ao potencial de geração de energia, contribuindo para uma análise mais realista e detalhada das condições de geração solar na localidade.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS ALTERNATIVAS DE GERAÇÃO

A partir análise dos recursos naturais disponíveis, constatou-se que as alternativas de geração renováveis mais promissoras para a propriedade são a geração hidrelétrica e solar. A seguir são detalhadas as características técnicas e econômicas dessas alternativas de geração.

##### 4.2.1 DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Como base nos dados de irradiação solar e demanda energética da propriedade, buscou-se dimensionar a potência do sistema de geração fotovoltaica. Nesse caso, adotou-se a metodologia proposta em Almeida (2023), baseado no equacionamento a seguir:

$$\text{Potência fotovoltaica necessária kWp} = \frac{\text{Consumo médio mensal kWh}}{30 \cdot \text{Irradiação solar kWh m}^2 \text{ dia}} \quad (15)$$

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = \frac{352,58}{30 * 4,44} \quad (16)$$

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = 2,64 \text{ kWp} \quad (17)$$

É importante considerar as perdas do sistema, que podem ocorrer devido a fatores como a orientação dos módulos e perdas elétricas em cabos e inversores. Segundo Costa (2023), “as perdas típicas em sistemas fotovoltaicos podem variar entre 15% e 25%, dependendo das condições de instalação”. Assim, considerando as perdas, tem-se:

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = 2,64 + 2,64 * 25\% \quad (18)$$

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = 3,30 \text{ kWp} \quad (19)$$

Após calcular a necessidade de energia, deve-se levar em conta o tipo de entrada de energia seja monofásica ou trifásica. As normas regulamentadoras estipulam valores mínimos de consumo: 30 kWh para sistemas monofásicos, 50 kWh para bifásicos e 100 kWh para trifásicos (ALMEIDA, 2023). Além disso, recomenda-se adicionar uma margem de segurança ao consumo histórico, geralmente entre 10% e 20%, para ajustes possíveis incrementos futuros de carga.

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = 3,30 + 3,30 * 20\% \quad (20)$$

$$\text{Potência fotovoltaica necessária} = 3,97 \text{ kWp} \quad (21)$$

Definida a potência necessária definida, selecionou-se módulos fotovoltaicos padronizados disponíveis no mercado. Em geral, os módulos fotovoltaicos variam em potência, geralmente entre 335 Wp e 590 Wp. Definida as características dos módulos fotovoltaicos, analisou-se 3 três kits solares disponíveis no mercado, cujos valores estão apresentados nas Tabelas 5.

**Tabela 5 - Detalhes dos Kits Solares**

Número de módulos	Potência por modulo	Eficiência	Potência total (kWp)	Inversor	Valor	Site
9	560 W	21,7%	5,04	Solis 6 kW	R\$ 11.860,00	Buyers Solar

10	585 W	22,65%	5,85	Growatt 6 kW	R\$ 11.265,67	Meu Gerador
10	550 W	21,13%	5,5	WEG 6 kW	R\$ 12.838,00	Automatize

Fonte: Próprio Autor

Os preços dos kits são R\$ 11.860,00, R\$ 11.265,67 e R\$ 12.838,00, respectivamente. A média desses valores resulta em R\$ 11.987,89, que será utilizado como base para simular o custo de implementação do sistema fotovoltaico. Esse custo inclui mão de obra especializada, materiais auxiliares e possíveis adequações elétricas na propriedade. De acordo com o Portal Solar (2023), “o custo de instalação de um sistema fotovoltaico pode variar entre 12% e 20% do valor total do sistema”. Com base nessa informação, estima-se que os custos de instalação podem acrescentar aproximadamente 20% ao valor do sistema, totalizando um investimento de cerca de R\$ 14.385,47. Este valor revisado é utilizado nas simulações do HOMER para refletir de forma mais precisa os custos reais de implementação do sistema fotovoltaico, garantindo que uma análise de especificação seja abrangente e alinhada às condições reais de mercado.

#### 4.2.2 MICRO HIDRELÉTRICA

Para o aproveitamento do recurso hídrico disponível na propriedade, optou-se por conjunto turbina-gerador “kit Roda D'Água Enersud”, ilustrado na Figura 15. Esse sistema se destaca por sua capacidade de operar eficientemente em quedas de água reduzidas, operando adequadamente a quedas de apenas 5 metros e uma vazão de 67 litros.



**Figura 15 - Kit Roda D' Água**



**Fonte: Enersud.**

Segundo informações da Enersud (2024), os alternadores podem ser usados em operação “on grid” e “off grid” com plataformas construtivas que vão de 240 W até 10 kW com tensões que vão de 12 V até 600 V”. O alternador de ímã permanente e fluxo axial permite a instalação de muitos magnetos de neodímio, possibilitando o funcionamento eficiente mesmo em baixa rotação. O arranjo em duplo conjunto de magnetos funciona como duas máquinas elétricas com um único estator compacto, aumentando a eficiência do sistema.

As especificações técnicas do Kit Roda D' Água são fundamentais para entender sua capacidade de geração de energia. A Tabela 6 resume as principais características do sistema:

**Tabela 6 - Especificações Técnicas do Kit Roda D' Água**

Diâmetro da Roda	De 80 a 110cm
------------------	---------------

Potência	Até 1000W
Tensão de Trabalho	12/24v e 220 on grid
Altura mínima no manancial	1m
Altura máxima do manancial	6m
Diâmetro do tubo de adução	De 100 a 200 mm <sup>2</sup>
Largura da roda	De 170 a 250 mm
Vida útil prevista	2 Anos
Acabamento	Galvanizado
Ajuste de tensão da correia	Esticador roscado

Fonte: Enersud.

Além das especificações técnicas, o desempenho do sistema é igualmente importante para avaliar sua eficácia na geração de energia. A Tabela 7 apresenta dados sobre o desempenho esperado do Kit:

**Tabela 7 - Desempenho esperado do Kit Roda D' Água**

Ht (m)	Vazão (l/s)	Potência (W)	Geração (KW.h/mês)	Rpm
1,5	28	150	108	50
2	36	230	166	63
2,5	42	250	180	73
3	48	300	216	83

Fonte: Enersud.

Atualmente, o valor do Kit Roda D'Água Enersud é de R\$ 9.990,00. Este valor serve como base nas simulações realizadas pelo software HOMER para representar o custo de implementação do sistema hidráulico. Além disso, um acréscimo de 20% sobre o preço inicial está previsto para abranger os custos de instalação, que englobam mão de obra especializada, materiais auxiliares e permissão de adaptações elétricas, resultando em um investimento total de cerca de R\$ 11.988,00.

### 4.2.3 BATERIAS

Para o armazenamento da energia excedente produzida em um sistema isolado é prevista a instalação de baterias estacionárias. Para a simulação o software HOMER já possui alguns modelos pré-cadastrados sendo apenas necessário a inserção do custo destas baterias.

Para a pesquisa de preços do sistema de armazenamento de energia, foram buscados modelos equivalentes aos que já existem no software, o modelo escolhido é mostrado na figura 16, **Freedom DF4100 12V 220Ah**, o qual se trata de uma bateria 12V com capacidade de 220 amperes, e possui um valor médio de R\$1.234,05.

**Figura 16 - Modelo da Bateria**



**Fonte: Atacadão de Baterias**

Para as baterias também foi considerado um acréscimo de 20% no valor inicial resultando assim em um valor de R\$1.480.

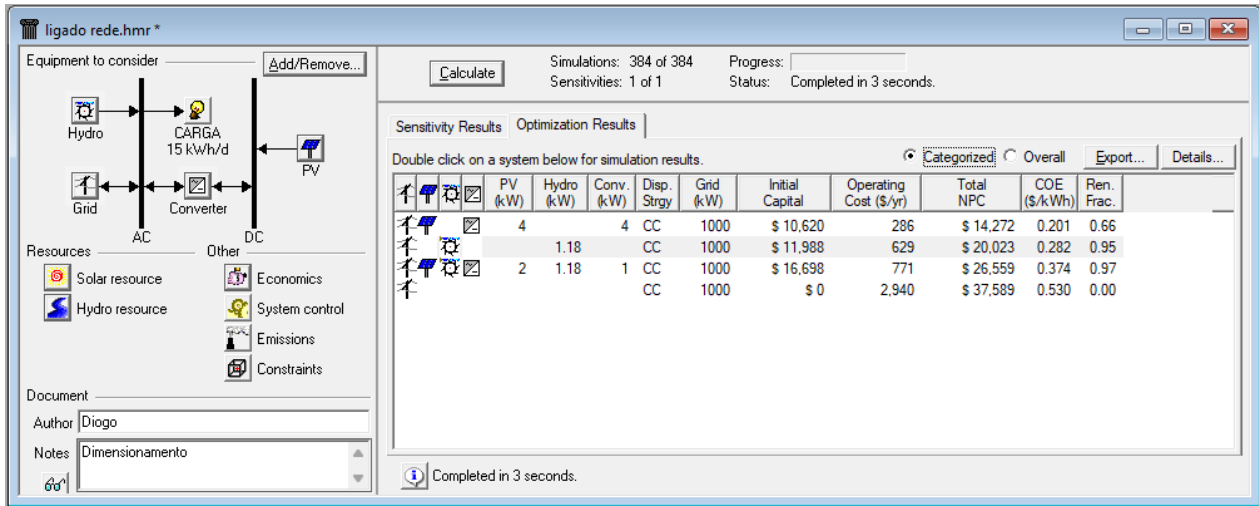
### 4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÕES

A seguir são apresentados os resultados das simulações no software, considerando a operação da microrrede em modo interligado (*on grid*) e isolado (*off grid*).

#### 4.3.1 Operação interligado (*on grid*)

Os resultados na operação interligado (*on grid*) são apresentados na Figura 17, que resultou em 384 cenários e arranjos possíveis de geração de energia híbrida.

**Figura 17 - Resultados da Simulação no Software HOMER (on grid)**

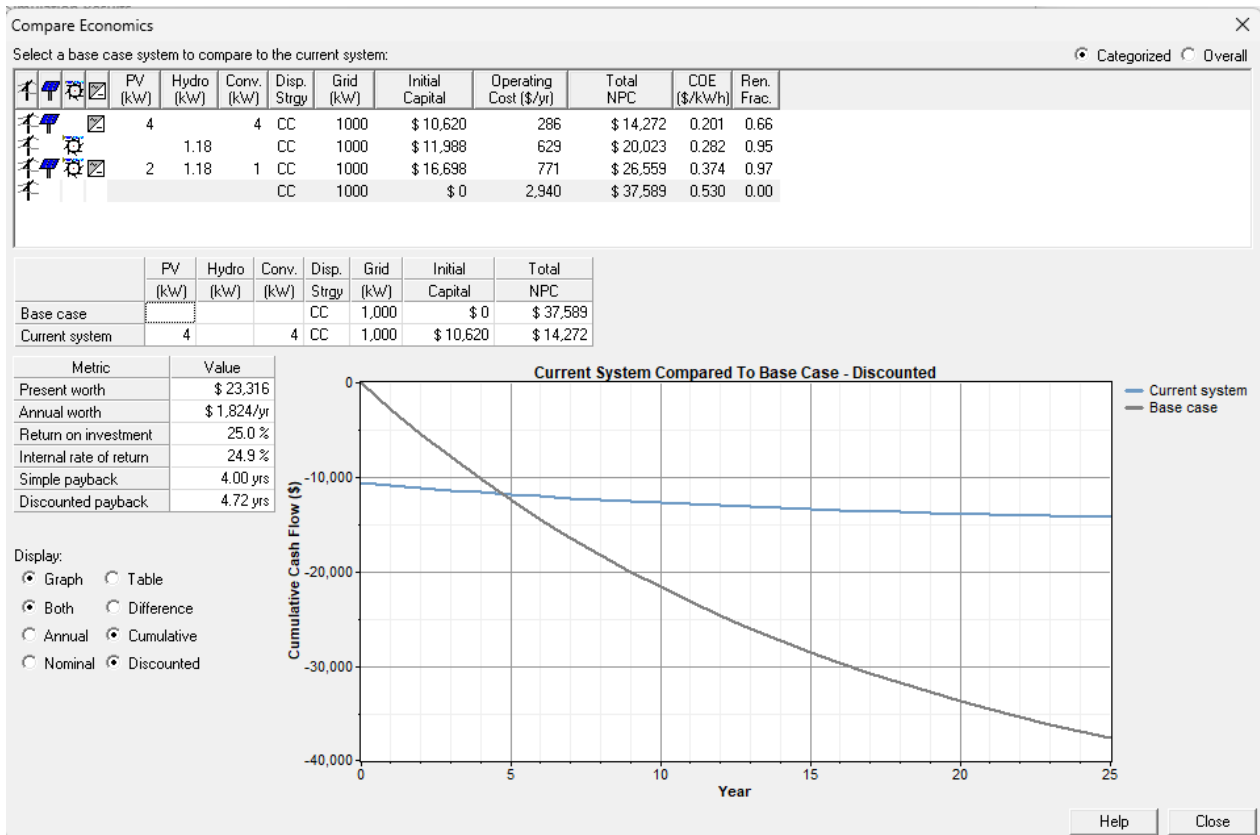


Fonte: HOMER ENERGY.

As melhores alternativas de cada categoria estão organizadas em ordem de eficiência e viabilidade econômica. Esses resultados foram avaliados com base em critérios como o custo nivelado de energia (LCOE), o custo presente total (NPC) e a capacidade de atender à demanda energética da propriedade rural.

Na Figura 18, apresenta-se comparação econômica entre o sistema fotovoltaico e cenário base (condições atuais de suprimento da propriedade) rural.

**Figura 18 - Comparação Econômica Entre o Sistema Fotovoltaico e Cenário Base**



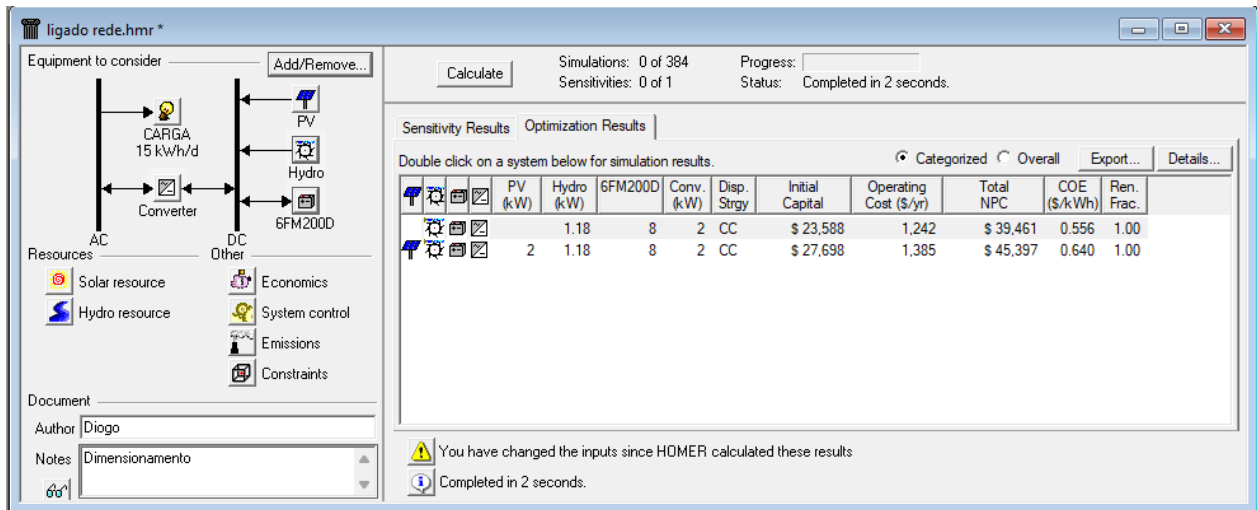
Fonte: HOMER ENERGY.

Neste caso, o sistema fotovoltaico de 4 kW foi a configuração mais eficiente e economicamente viável, apresentando o menor LCOE, de \$0.201/kWh, e um NPC de \$14,272, o mais baixo entre todas as opções avaliadas, com tempo de retorno do investimento (*payback*) de 4,72 anos. Além disso, o custo operacional anual dessa configuração foi de apenas \$286.

#### 4.3.2 Operação isolada (*off grid*)

Os resultados na operação isolada (*off grid*) são apresentados na Figura 19, que resultou em 384 cenários e arranjos possíveis de geração de energia híbrida. Os dois melhores cenários categorizados de geração foram, geração hídrica e geração híbrida composta por fotovoltaica e hídrica.

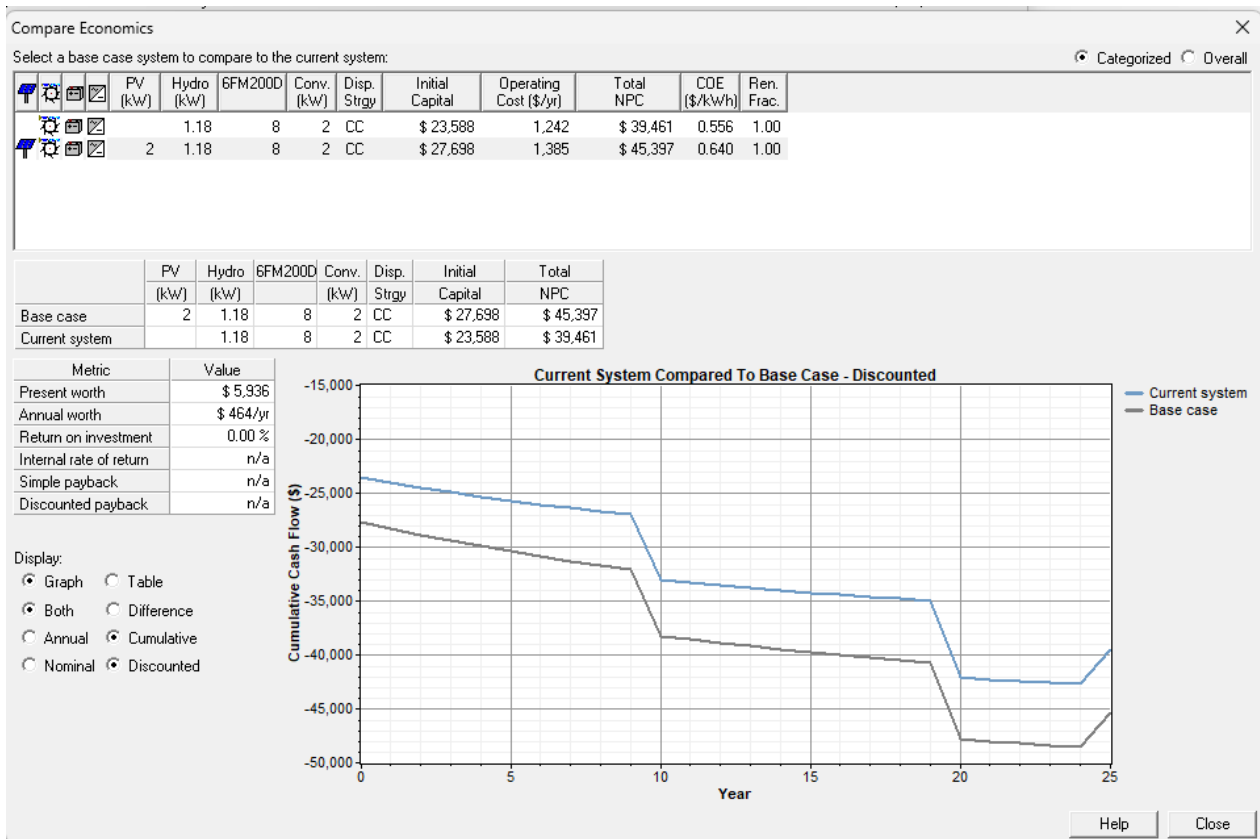
**Figura 19 - Resultados da Simulação no Software HOMER (off grid)**



**Fonte: HOMER ENERGY.**

Na Figura 20, apresenta-se comparação econômica entre o sistema hídrico e o sistema híbrido, neste caso não foi considerado o cenário base como anteriormente pois se trata de um sistema isolado da rede elétrica.

**Figura 20 - Comparação Econômica Entre o Sistema Hídrico e Híbrido**

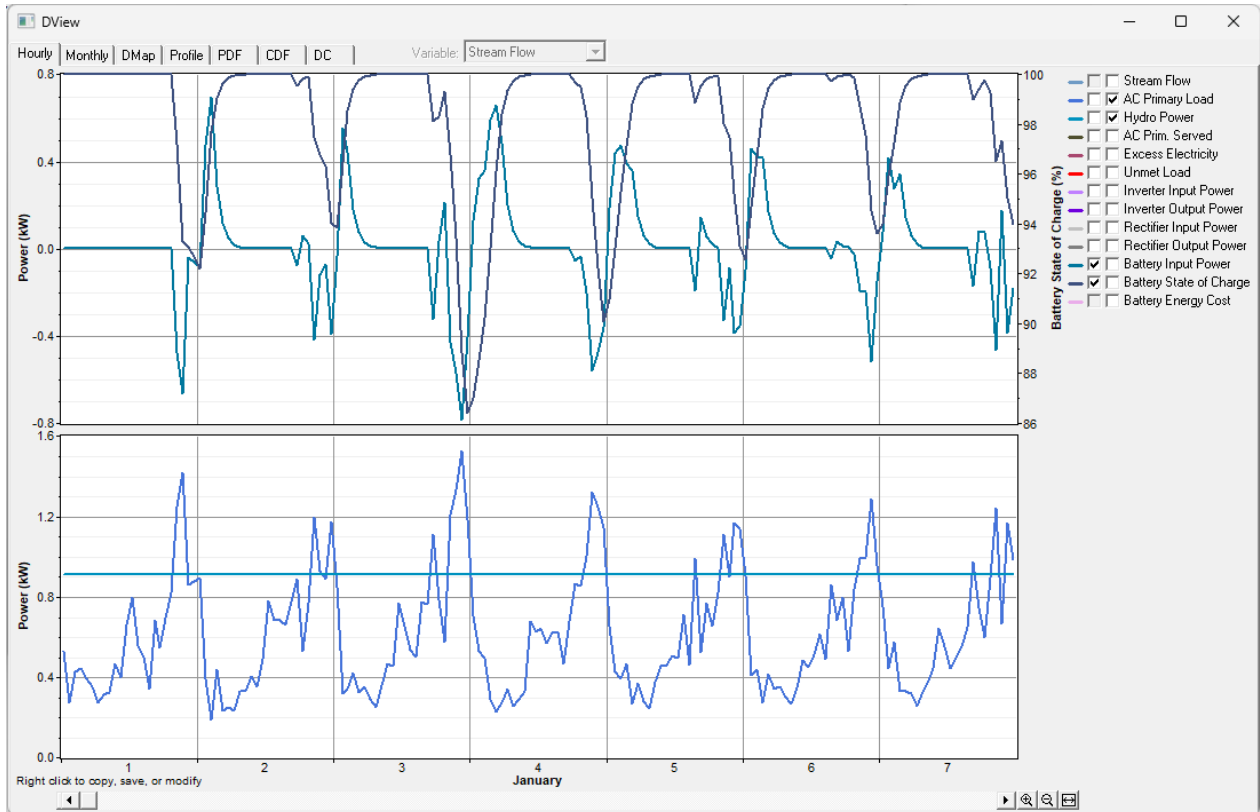


Fonte: HOMER ENERGY.

Neste caso, o sistema hídrico de 1.18 kW foi a configuração mais eficiente e economicamente viável, apresentando o menor LCOE, de \$0.556/kWh, e um NPC de \$39,461, o mais baixo entre todas as opções avaliadas, além disso, o custo operacional anual dessa configuração foi de \$1,242.

Na figura 21, é possível visualizar as curvas de carga e descarga das baterias, o consumo e a geração de energia. No gráfico superior estão expostas as curvas do estado de carga da bateria e a potência aplicada nas baterias, sendo de carga e descarga, é possível visualizar que as baterias se mantem todo o tempo com a carga superior a 80%. No gráfico inferior pode-se ver as curvas de geração e consumo de energia ficando claro os momentos em que há aceso de energia e falta.

**Figura 21 - Comportamento do Sistema**



**Fonte: HOMER ENERGY.**



## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa sobre a sustentabilidade energética em zonas rurais, com foco em microrredes, revela a importância de avaliar as vantagens e desvantagens de cada sistema para determinar sua viabilidade em diferentes contextos. As MCHs se destacam por sua capacidade de fornecer energia de forma contínua e eficiente, aproveitando pequenos cursos d'água. Essa produção estável é uma vantagem significativa, especialmente em regiões onde a demanda por eletricidade é constante. Além disso, as MCHs têm um impacto ambiental reduzido em comparação com grandes hidrelétricas, pois não requerem represamentos extensivos ou desmatamento significativo. A instalação dessas centrais pode também gerar empregos locais e promover o desenvolvimento econômico nas comunidades rurais, oferecendo uma fonte de energia acessível.

Entretanto, as MCHs enfrentam desafios importantes. Sua eficiência depende da disponibilidade hídrica, o que pode ser problemático em períodos de seca ou variações climáticas. Embora os custos operacionais sejam geralmente baixos, a instalação inicial pode ser elevada, exigindo investimentos significativos. Além disso, a localização deve ter um curso d'água adequado, o que limita a viabilidade em algumas regiões.

Por outro lado, os sistemas fotovoltaicos têm se destacado pela facilidade de instalação e pela redução contínua dos custos dos painéis solares. Esses sistemas podem ser adaptados a diferentes escalas, desde residências até grandes usinas solares. A independência da proximidade a fontes hídricas é uma vantagem significativa, tornando-os uma opção viável para áreas onde a disponibilidade de água é limitada. Embora a produção de energia solar seja intermitente e dependa da incidência solar resultando em períodos sem geração durante a noite ou em dias nublados o avanço nas tecnologias de armazenamento tem permitido mitigar esses desafios.

A escolha entre MCHs e sistema fotovoltaicos deve ser fundamentada em uma análise detalhada das condições locais e das necessidades específicas das comunidades rurais. Enquanto as MCHs são uma excelente opção onde há abundância hídrica e necessidade de energia contínua, os sistemas fotovoltaicos se destacam por sua versatilidade e menor dependência de recursos naturais específicos. Em muitos casos, os sistemas fotovoltaicos são mais indicados devido à sua

facilidade de instalação e à possibilidade de serem utilizados em áreas onde a disponibilidade hídrica é limitada.

O sistema fotovoltaico se revela como a opção mais interessante para a operação interligado (*on grid*), especialmente quando consideramos os dados financeiros apresentados na análise comparativa. O sistema fotovoltaico integrado à rede elétrica, apresenta um custo inicial de \$10,620 e um custo operacional anual de apenas \$286. Isso resulta em um custo presente total (NPC) de \$14,272 e um custo nivelado de energia (LCOE) de \$0.201/kWh, evidenciando sua viabilidade econômica ao longo da vida útil do sistema. O payback descontado é alcançado em aproximadamente 4.72 anos, permitindo que o investimento inicial seja recuperado rapidamente. Em contraste, o sistema hidrelétrico de pequeno porte, que possui um custo inicial de \$11,988 e custos operacionais anuais de \$629, apresenta um NPC total de \$20,023 e um COE de \$0.282/kWh.

Embora o sistema hidrelétrico também ofereça benefícios em termos de sustentabilidade, seu payback é mais longo, atingindo cerca de 5.99 anos. Além disso, ao longo de 25 anos, o sistema fotovoltaico acumula uma economia total de \$23,316 em comparação ao cenário base da rede elétrica, enquanto o sistema hidrelétrico gera uma economia acumulada de \$17,566.

Já para a operação isolada (*off grid*), o sistema hidrelétrico se mostra mais eficiente perante o sistema híbrido, principalmente do ponto de vista financeiro. O sistema hídrico apresenta um custo inicial de \$23,588, isso resulta em um valor presente total (NPC) de \$39,461 e um custo nivelado de energia (LCOE) \$0.556/kWh. Enquanto o sistema híbrido apresenta um valor presente total (NPC) de \$45,397 e um custo nivelado de energia (LCOE) \$0.640/kWh. Esses dados demonstram que o sistema hídrico não apenas oferece um retorno financeiro mais rápido e eficiente, mas também se configura como uma solução econômica superior para comunidades isoladas que buscam alternativas sustentáveis para suprir suas necessidades energéticas.

## 5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

No intuito de instigar a continuidade desta pesquisa, elencam-se como sugestões de trabalhos futuros:

- **Exploração de novas tecnologias de armazenamento de energia:** Estudos futuros podem investigar o impacto e as previsões de tecnologias emergentes de armazenamento de energia, como baterias de fluxo ou supercapacitores, para melhorar a resiliência e a eficiência das microrredes.
- **Desenvolvimento de modelos de negócios sustentáveis:** Investigar diferentes modelos de negócios e estratégias de financiamento que possam facilitar a adoção de microrredes pelas comunidades rurais, considerando diferentes cenários econômicos e políticos.
- **Otimização de sistemas de microrredes com inteligência artificial:** Explorar o uso de algoritmos de inteligência artificial para melhorar a gestão e operação de microrredes, melhorando a eficiência e adaptabilidade dos sistemas às mudanças nas condições de uso e clima.
- **Avaliação da resiliência das microrredes a condições climáticas extremas:** Estudar como as microrredes podem ser projetadas e geridas para resistir a eventos climáticos extremos, contribuindo para a segurança energética em áreas vulneráveis.

## REFERÊNCIAS

CONRADO, Bruna RP et al. Classificação de Cargas em Microrredes Utilizando a Análise Relacional Grey e Fatores de Desempenho da Carga. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1, 2020.

NATIONAL TECHNOLOGY & ENGINEERING SOLUTIONS OF SANDIA, LLC. *Fundamentals of Advanced Microgrid Design Coursebook for Advancing Caribbean Energy Resilience Workshop*. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2019.

ELETROBRAS. *Micro Centrais Hidrelétricas: Definição e Classificação*. Brasília: ELETROBRAS, 2023.

MME. Ministério de Minas e Energia. *Compromisso do Brasil em reduzir suas emissões sob o Acordo de Paris até 2025: Oportunidades para energias limpas no Brasil*. Brasília, 2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Dispõe sobre a microgeração e a minigeração distribuída. Brasília, 2014. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br> . Acesso em: 28 out. 2024.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Informações sobre energia solar fotovoltaica*. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br> . Acesso em: 28 out. 2024.

Perszel Junior, A.; et al. *HIDRELÉTRICA A FIO D'ÁGUA: Análise do potencial energético de uma Micro Central Hidrelétrica em um afluente no norte do Rio Grande do Sul*. *Ano de publicação*. 2019.

KRUGER, Zanella. *O consumo de energia elétrica e a busca por fontes renováveis*. *Ano de publicação*. 2023.

SILVA, L.; COSTA, P.; ALMEIDA, J. Eficiência Energética em Sistemas Fotovoltaicos: Uma Análise Comparativa. *Journal of Renewable Energy*, v. 9, n. 4, p. 112-130, 2020.

MARTINS, F.; PEREIRA, T. Análise Econômica de Sistemas Fotovoltaicos: Uma Revisão Crítica. *Energia & Ambiente*, v. 15, n. 2, p. 87-102, 2021.

OLIVEIRA, A.; SOUZA, M. Custo Presente Total em Projetos Energéticos: Uma Abordagem Prática. *Revista de Gestão Energética*, v. 8, n. 1, p. 23-35, 2022.

COSTA, J.; ALMEIDA, R. Microcentrais Hidrelétricas: Uma Alternativa Sustentável. *Revista Brasileira de Energia*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2023.

BALARIN, M.; DANTAS, A.; GONÇALVES, F. Microgeração e Minigeração Hidrelétrica: Uma Alternativa para o Desenvolvimento Sustentável. In: Anais do Congresso Brasileiro de Energias Renováveis, 2004.

SANTOS, R.; LIMA, V. Viabilidade Econômica das Microcentrais Hidrelétricas: Estudo de Caso no Brasil. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 10, n. 1, p. 15-30, 2022.

SILVA, F.; e outros. Implantação de Microcentrais Hidrelétricas na Região de Cianorte/PR. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2020.

SILVA, E. M.; COSTA, R. S.; ORTIZ, J. A. *Análise econômica da integração de sistemas híbridos de energia*. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2018.

HOMER ENERGY. *HOMER software – the trusted global standard in hybrid power system modeling*. Disponível em: <https://homerenergy.com>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SANTOS, JKP; PALHARES, JC; FREIRE, RM O método flutuante para medição da vazão de pequenos cursos d'água: uma abordagem prática e acessível para profundidade hidrológica em áreas rurais. 2001.

PALHARES, JC; SANTOS, JKP; FREIRE, RM Estudo da vazão de água utilizando o método do flutuador. Universidade Federal do Amazonas, 2007.

BRAGA, C. de C.; CABRAL, JBP; GENTIL, WB; OLIVEIRA, SF; BATISTA, DF; QUEIROZ JÚNIOR, VS; ROCHA, IR da; BARCELOS, AA de. Avaliação de determinações de vazão com o método do flutuador. 2014.

ATLAS SOLAR RS. Dados de irradiação solar do município de Santa Maria/RS. Disponível em: <https://atlassolarrs.com/dados-de-irradia%C3%A7%C3%A3o-solar> .

ALMEIDA, JR Análise da irradiação solar e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. 2023.

COSTA, MT Perdas em sistemas fotovoltaicos: análise e considerações práticas. 2023.

SILVA, RFA Sistemas fotovoltaicos e sua eficiência na geração de energia renovável: uma revisão das tecnologias disponíveis no mercado brasileiro. 2023.

PORTAL SOLAR. Custo de instalação de sistemas fotovoltaicos: uma análise detalhada dos preços no Brasil. 2023.

BUYERS ENERGY. Kit solar 5,04 kWp - inversor Solis, 9 módulos de 560 Wp. Disponível em: <https://www.buyersenergy.com.br/produtos/kit-solar-504-kwp-inversor-solis-9-modulos-de-560wp/?variant=781045616&pf=mc>. Acesso em: 6 nov. 2024.

MEU GERADOR. Kit energia solar 800 kWh/mês, 585 kWp, 10 painel Sunova 585 W, inversor Growatt 6 kW. Disponível em: [https://meugerador.com.br/kit-energia-solar-800kwh-mes-585kwp-10-painel-sunova-585w-inversor-growatt-6kw-220v-2mppt-p3604?gad\\_source=4&gclid=Cj0KCQiAoa5BhCNARIsADVLzZfuew0tIjNvYMRbxxsoJJk6QiZn3nCA7LuOb9vDm-9EbqCefmOBpIaAv2oEALw\\_wcB](https://meugerador.com.br/kit-energia-solar-800kwh-mes-585kwp-10-painel-sunova-585w-inversor-growatt-6kw-220v-2mppt-p3604?gad_source=4&gclid=Cj0KCQiAoa5BhCNARIsADVLzZfuew0tIjNvYMRbxxsoJJk6QiZn3nCA7LuOb9vDm-9EbqCefmOBpIaAv2oEALw_wcB). Acesso em: 6 nov. 2024.

AUTOMATIZE. Kit gerador energia solar 5,5 kWp, inversor SIW200 WEG. Disponível em: [https://www.ecommerce.automatize.eng.br/MLB-3866777259-kit-gerador-energia-solar-55kwp-inversor-siw200-weg-JM?variation=181827080948&gad\\_source=4&gclid=Cj0KCQiA57G5BhDUARIsACgCYnyy18bmudaon1n92dqVEPXYWgAW4N7BqajIYGWutCFLaC-lu3wXUMoaArd3EALw\\_wcB](https://www.ecommerce.automatize.eng.br/MLB-3866777259-kit-gerador-energia-solar-55kwp-inversor-siw200-weg-JM?variation=181827080948&gad_source=4&gclid=Cj0KCQiA57G5BhDUARIsACgCYnyy18bmudaon1n92dqVEPXYWgAW4N7BqajIYGWutCFLaC-lu3wXUMoaArd3EALw_wcB). Acesso em: 6 nov. 2024.

ENERSUD. Kit Roda D' Água: Sua Fonte Inesgotável de Energia Limpa. Disponível em: <https://www.enersud.com.br/kit-roda-d-agua-ren01/>. Acesso em: 09 dez. 2024

ATACADÃO DE BATERIAS. Bateria Estacionária Freedom DF4100 12V 220Ah. Disponível em: <https://www.atacadaobaterias.com.br/produto/bateria-estacionaria-freedom-df4100-200ah-240ah-com-sucata>. Acesso em: 09 dez. 2024.