

Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Faculdade de Tecnologia – FT
Departamento de Eletricidade
Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica – Eletrotécnica



JOSEKSON GONÇALVES DA SILVA – 21950075

Estudo de caso de viabilidade, projeto e simulação de solução de eletrificação rural
com fonte renovável para comunidade Ribeirinha do Amazonas

MANAUS – AM
2024



JOSEKSON GONÇALVES DA SILVA – 21950075

Estudo de caso de viabilidade, projeto e simulação de solução de eletrificação rural
com fonte renovável para comunidade Ribeirinha do Amazonas

Monografia apresentada à Coordenação
do Curso de Engenharia Elétrica –
Eletrotécnica da Universidade Federal do
Amazonas, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Bezerra Trindade

MANAUS – AM
2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Silva, Josekson Gonçalves
S586e Estudo de caso de viabilidade, projeto e simulação de solução de eletrificação rural com fonte renovável para comunidade Ribeirinha do Amazonas / Josekson Gonçalves Silva . 2024
 109 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Alessandro Bezerra Trindade
TCC de Graduação (Engenharia Elétrica - Eletrotécnica) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Eletrificação rural. 2. Energia renovável. 3. Homer Pro. 4.
Comunidades ribeirinhas. 5. Viabilidade econômica. I. Trindade,
Alessandro Bezerra. II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

Aos meus pais, Josekson e Nair Regina. À minha esposa, Yasmin Ibernon e ao meu filho, Dante Gonçalves.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e sabedoria que me guiaram ao longo dessa jornada acadêmica. Sem ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais, minha eterna gratidão por todo esforço, dedicação, tempo e apoio incondicional, que me permitiram focar nos estudos. Todo o sacrifício feito foi a base para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço de coração à minha esposa, que, com muito amor e compreensão, tardou sua própria graduação para que eu pudesse concluir primeiro a minha. Sua força e renúncia foram fundamentais para o sucesso desta etapa.

Aos amigos adquiridos ao longo da faculdade, por cada momento de companheirismo e aprendizado compartilhado. Foram essenciais para tornar essa caminhada mais leve e significativa.

Ao professor Alessandro Bezerra Trindade, expresso meu sincero agradecimento por aceitar ser meu orientador. Sua paciência e compreensão durante o período em que estive doente foram indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também à banca examinadora e a todos os professores que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional. Cada ensinamento e orientação foram fundamentais para minha formação. Cada ensinamento e orientação foram fundamentais para minha formação.

RESUMO

Este trabalho explora a praticidade e a relação custo-benefício da introdução de um sistema de eletrificação rural baseado em energia renovável para comunidades ribeirinhas na Amazônia. A análise, conduzida usando o software HOMER PRO, examinou várias configurações de sistemas híbridos incorporando energia solar, energia eólica e gerador a diesel. A comunidade de Santo Antônio, localizada na Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Negro, distante, aproximadamente 98,49 km em linha reta de Manaus, e contendo 11 famílias, foi escolhida como foco devido às suas necessidades energéticas e importância social significativa. A pesquisa avaliou a sustentabilidade, os custos e o impacto ambiental de cada configuração, individualmente e combinando gerações, visando identificar soluções que promovam a independência energética, minimizem as emissões de gases de efeito estufa e garantam a sustentabilidade econômica a longo prazo. Os resultados enfatizam que um sistema solar fotovoltaico se destaca como a escolha ideal, proporcionando o menor custo total, zero emissões e destacada eficiência energética. Como resultado, é recomendado como a opção mais adequada para a região-alvo do trabalho.

Palavras-chave: Eletrificação rural, energia renovável, comunidades ribeirinhas, energia solar, HOMER PRO, sustentabilidade, viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work explores the practicality and cost-effectiveness of introducing a renewable energy-based rural electrification system for riverine communities in the Amazon. The analysis, conducted using HOMER PRO software, examined several hybrid system configurations incorporating solar energy, wind energy, and a diesel generator. The community of Santo Antônio, located in the Environmental Protection Area (APA) of the Rio Negro, approximately 98.49 km as the crow flies from Manaus, and containing 11 families, was chosen as the focus due to its energy needs and significant social importance. The research assessed the sustainability, costs, and environmental impact of each configuration, individually and across generations, aiming to identify solutions that promote energy independence, minimize greenhouse gas emissions, and ensure long-term economic sustainability. The results emphasize that a solar PV system stands out as the ideal choice, providing the lowest total cost, zero emissions, and outstanding energy efficiency. As a result, it is recommended as the most suitable option for the target region of the work.

Keywords: *Rural electrification, renewable energy, riverside communities, solar power, HOMER PRO, sustainability, economic viability.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz elétrica mundial.....	16
Figura 2 - Matriz elétrica do Brasil.	17
Figura 3 - Matriz elétrica do Amazonas.	18
Figura 4 - População sem acesso à energia elétrica por estado.	19
Figura 5 - Áreas não eletrificadas no Rio Negro.	19
Figura 6 - Usina hidrelétrica.....	24
Figura 7 - Energia solar.	25
Figura 8 - Estrutura de uma turbina eólica.....	25
Figura 9 - Energia biomassa.....	26
Figura 10 - Vantagens e desvantagens de dez fontes de geração de energia elétrica.....	28
Figura 11 - Intensidade de CO ₂ na geração de eletricidade em regiões selecionadas, 2014-2026.	29
Figura 12 - Diagrama da metodologia.	40
Figura 13 - Área da comunidade Santo Antônio.	42
Figura 14 - Área da comunidade de Tiririca.....	45
Figura 15 - Área da comunidade de Marajá.....	48
Figura 16 - Características do local de aplicação do estudo de caso.	52
Figura 17 - Demanda de energia da comunidade de Santo Antônio.	53
Figura 18 - Curva de carga do HOMER PRO para Santo Antônio.	53
Figura 19 - Dados Mensais Médios de radiação Solar Global Horizontal.	55
Figura 20 - Dados Mensais Médios de Velocidade do Vento.	56
Figura 21 - Parâmetros para adicionar um equipamento na simulação.....	57
Figura 22 - Sistema solar off-grid.....	58
Figura 23 - Painel solar para simulação.....	59
Figura 24 - Painel solar no HOMER PRO.....	59
Figura 25 - Bateria solar para simulação.	60
Figura 26 - Bateria solar no HOMER PRO.	61
Figura 27 - Inversor para simulação.	61
Figura 28 - Inversor no HOMER PRO.....	62
Figura 29 - Controlador para simulação.....	62
Figura 30 - Controlador no HOMER PRO.....	63

Figura 31 - Custo inicial do dimensionamento de energia solar.	63
Figura 32 - Alocamento dos componentes da usina solar no HOMER PRO. .	65
Figura 33 - Configuração de um sistema eólico isolado.	66
Figura 34 - Turbina eólica para simulação.....	67
Figura 35 - Turbina eólica no HOMER PRO.....	68
Figura 36 - Gerador para simulação.	69
Figura 37 - Gerador no HOMER PRO.	71
Figura 38 - Esquemático gerado no HOMER PRO.....	72
Figura 39 - Resultado da simulação no HOMER PRO.	73
Figura 40 - Detalhes da simulação no HOMER PRO.	74
Figura 41 - Resumo de custo da simulação 1.....	75
Figura 42 - Fluxo de caixa da simulação 1.	75
Figura 43 – Elétrica da simulação 1.....	76
Figura 44 - Bateria da simulação 1.	77
Figura 45 - Painel solar da simulação 1.....	78
Figura 46 – Inversor da simulação 1.....	78
Figura 47 - Emissões da simulação 1.....	79
Figura 48 - Resumo de custo da simulação 2.....	80
Figura 49 - Fluxo de caixa da simulação 2.	81
Figura 50 - Elétrica da simulação 2.	82
Figura 51 - Baterias da simulação 2.	82
Figura 52 - Painel solar da simulação 2.....	83
Figura 53 - Aerogerador de simulação 2.....	84
Figura 54 - Inversor da simulação 2.	84
Figura 55 - Emissões da simulação 2.....	85
Figura 56 – Resumo de custo da simulação 3.....	86
Figura 57 - Fluxo de caixa da simulação 3.	87
Figura 58 - Elétrica da simulação 3.	88
Figura 59 - Bateria da simulação 3.	88
Figura 60 - Painel solar da simulação 3.....	89
Figura 61 - Inversor da simulação 3.	90
Figura 62 - Gerador a diesel da simulação 3.	90
Figura 63 - Resumo do custo com combustível da simulação 3.....	91
Figura 64 - Turbina eólica da simulação 3.....	92

Figura 65 - Emissões da simulação 3.....	92
Figura 66 - Resumo de custo da simulação 4.....	93
Figura 67 - Fluxo de caixa da simulação 4.	94
Figura 68 - Elétrica da simulação 4.	94
Figura 69 – Gerador da simulação 4.	95
Figura 70 - Análise do consumo de combustível da simulação 4.	96
Figura 71 - Emissões da simulação 4.....	96
Figura 72 - Comunidade escolhida	99
Figura 73 - Resultado final HOMER PRO.....	100

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Unidades consumidoras de Santo Antônio.....	42
Gráfico 2 - Locais com e sem motor ou compressor.....	43
Gráfico 3 - Curva de carga de Santo Antônio.....	44
Gráfico 4 - Unidades consumidoras de Tiririca.....	45
Gráfico 5 - Locais com e sem motor ou compressor.....	46
Gráfico 6 - Curva de carga de Tiririca.....	46
Gráfico 7 - Unidades consumidoras de Marajá.....	47
Gráfico 8 - Locais com e sem motor ou compressor.....	48
Gráfico 9 - Curva de carga de Marajá.....	49
Gráfico 10 - Contribuição de cada componente em relação ao custo total inicial.	
.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Custo de manutenção de cada equipamento da usina solar.	64
Tabela 2 - Custo da manutenção unitária de cada equipamento da usina solar.	
.....	65
Tabela 3 - Custo conforme empreiteira que executou serviço de engenharia em Santa Helena do Inglês.	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3 JUSTIFICATIVA	22
1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA.....	23
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL 24	
2.1.1 Conceito de energias renováveis.....	24
2.1.2 Vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica por fontes renováveis.....	26
2.1.3 Impacto das energias renováveis no desenvolvimento sustentável e nas metas globais de redução de emissões.....	28
2.1.4 Relacionamento entre acesso à energia e qualidade de vida	30
2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E DO ESTADO DO AMAZONAS 31	
2.2.1 Composição da matriz elétrica nacional e sua predominância de fontes renováveis.....	31
2.2.2 Matriz energética do Amazonas e sua dependência de termelétricas.....	31
2.3 DESAFIOS DE ELETRIFICAÇÃO EM REGIÕES REMOTAS.....	32
2.3.1 Problemas logísticos e técnicos enfrentados em áreas isoladas 32	
2.3.2 Estudo de exclusão elétrica na Amazônia e populações sem acesso à eletricidade	33
2.3.3 Dificuldades específicas da eletrificação do Baixo Rio Negro do Amazonas	34

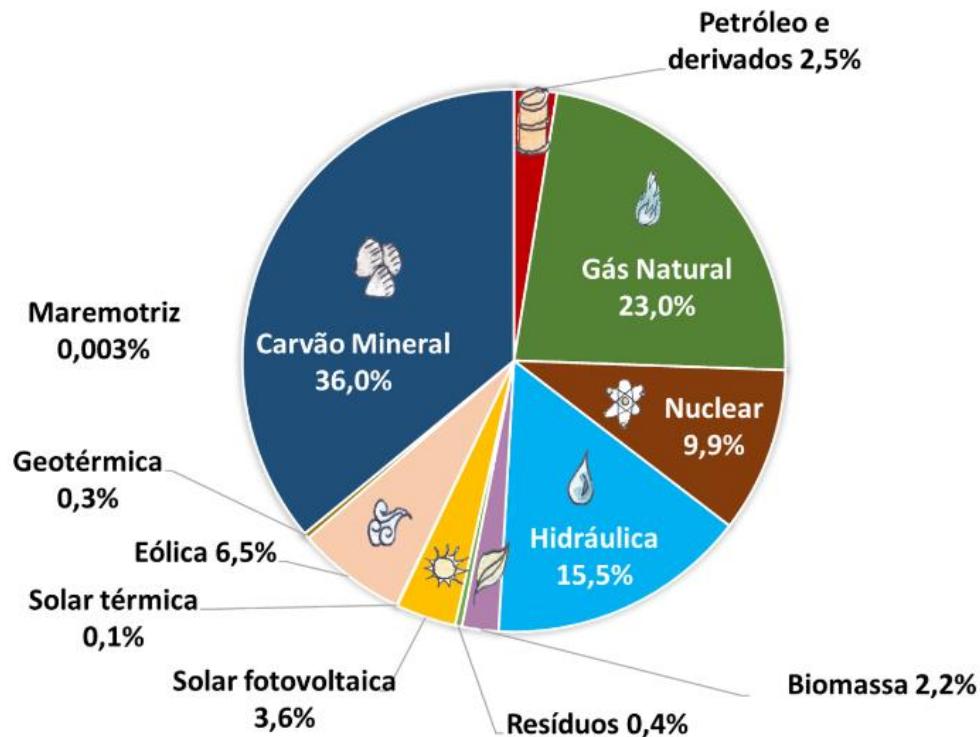
2.4 PROGRAMA LUZ PARA TODOS NO AMAZONAS: HISTÓRICO E LIMITAÇÕES	35
2.4.1 Histórico do programa e objetivos alcançados até 2023, no Amazonas	35
2.4.2 Limitações em termos de capacidade de fornecimento, especialmente em áreas isoladas.....	36
2.4.3 Comparação da energia fornecida com as necessidades energéticas reais das famílias beneficiadas.....	37
2.5 SOFTWARES PARA PLANEJAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMAS ENERGÉTICOS: PVSYST E HOMER PRO	38
2.5.1 Comparação entre PVsyst e HOMER PRO.....	38
3 METODOLOGIA.....	40
3.1 CURVA DE CARGA DE 3 COMUNIDADES DO BAIXO RIO NEGRO DO AMAZONAS: SANTO ANTÔNIO, MARAJÁ E TIRIRICA.....	41
3.1.1 Santo Antônio (coordenadas -2.7304648156349645, -60.82604860269413)	41
3.1.2 Tiririca (coordenadas -2.7159289377083335, -60.835646759489336)	44
3.1.3 Marajá (coordenadas -2.73344394,-60.81558108)	47
3.1.4 Razão da determinação da comunidade para realização do estudo de caso.....	49
3.2 FERRAMENTA DE ANÁLISE DO PROJETOS: SOFTWARE HOMER PRO	50
3.3 COLETA DE DADOS PARA SIMULAÇÃO.....	51
3.3.1 Características do local	51
3.3.2 Parâmetros para o dimensionamento de energia solar e eólica off-grid.	56
3.3.3 Gerador a diesel da própria comunidade Santo Antônio	68
4 RESULTADOS	72

4.1 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO APENAS SISTEMA SOLAR.....	74
4.2 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO UMA COMBINAÇÃO DE DUAS FONTES DE ENERGIA: SOLAR E EÓLICA	79
4.3 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO A PARTIR DE SISTEMA SOLAR EM CONJUNTO COM TURBINA EÓLICA E O GERADOR A DIESEL EXISTENTE NA COMUNIDADE.....	85
4.4 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO GERADOR A DIESEL DE 15 KVA	93
4.5 OUTROS CUSTOS	97
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	99
5.1 TRABALHOS FUTUROS	101
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

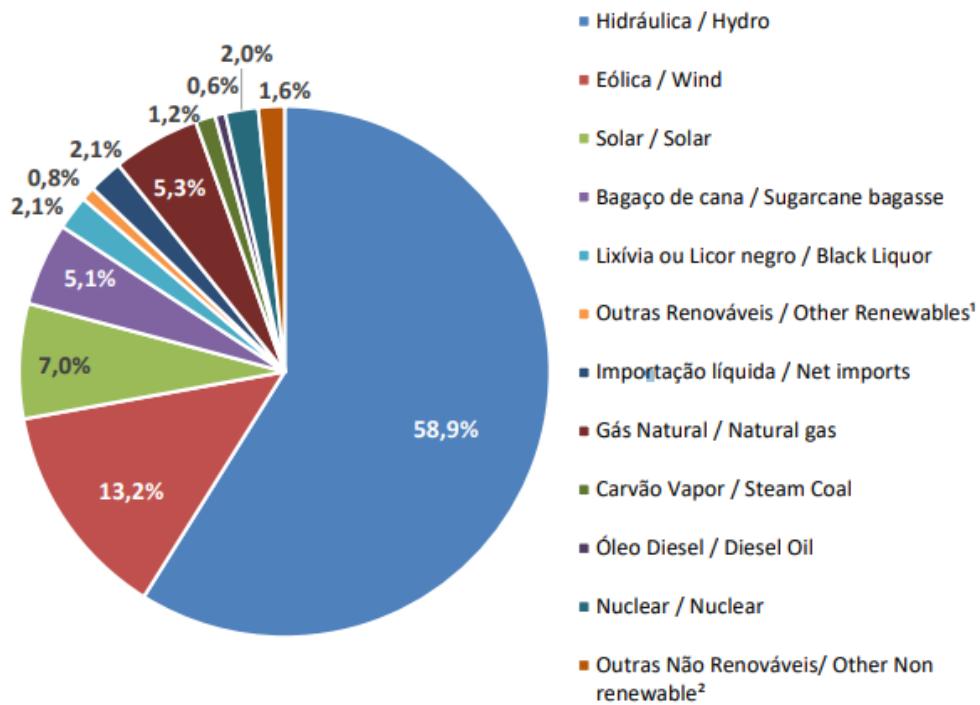
A energia renovável, que engloba fontes como hidrelétrica, solar, eólica e biomassa, tem se consolidado como uma alternativa viável ao modelo tradicional baseado em combustíveis fósseis. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), a adoção dessas tecnologias, reconhecidas pelo baixo impacto ambiental, tem sido impulsionada pela crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de fontes energéticas mais sustentáveis. Embora a Figura 1 evidencie que os combustíveis fósseis ainda representam uma parcela significativa da produção global de energia, o que é alarmante devido ao seu alto impacto ambiental, a situação no Brasil apresenta um panorama mais favorável. Conforme ilustrado na Figura 2, a matriz energética brasileira é predominantemente renovável, respondendo por 89% do fornecimento interno de eletricidade, com destaque para a hidroeletricidade, que corresponde a 58,9% da geração total (EPE, 2024).

Figura 1 - Matriz elétrica mundial.



Fonte: IEA, 2023.

Figura 2 - Matriz elétrica do Brasil.



Fonte: BEN, 2024.

Apesar do destaque positivo da matriz energética nacional, o cenário no estado do Amazonas revela uma realidade distinta e desafiadora. Enquanto o Brasil conta com uma predominância de fontes renováveis em sua geração de eletricidade, a matriz energética amazonense ainda depende majoritariamente de usinas termelétricas, que respondem por cerca de 87% da energia fornecida na região (Figura 3). A situação é ainda mais crítica nos sistemas isolados da Amazônia, onde as termelétricas são responsáveis por 97% da geração energética, conforme aponta o estudo do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2021). Esse quadro reflete as dificuldades de implementação de fontes renováveis em áreas remotas, agravadas pelas limitações logísticas e pela falta de infraestrutura adequada.

Figura 3 - Matriz elétrica do Amazonas.



Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	% (Pot. Fiscalizada)
UTE	138	2.909.377,80	1.812.405,80	86,77%
UHE	2	274.170,00	274.710,00	13,15%
UFV	17	1.576,04	1.576,04	0,08%
Total	157	3.185.663,84	2.088.691,84	100%

Fonte: ANEEL, 2024.

Embora o Amazonas possua 138 usinas termelétricas, de acordo com a Figura 3, a situação se atenua em regiões onde o acesso à eletricidade ainda é inexistente. De acordo com o relatório do IEMA (2021), cerca de 990 mil pessoas na Amazônia não possuem acesso à eletricidade, sendo que aproximadamente 159.915 residem no estado do Amazonas, o que corresponde a 3,9% da população local. Esse cenário evidencia os desafios enfrentados na implementação de energias renováveis em áreas remotas, principalmente devido aos altos custos de instalação e à intermitência de fontes como a solar e a eólica, que dependem de condições climáticas favoráveis. A vastidão territorial da região amazônica, somada à dispersão das populações, especialmente em margens de rios e locais de difícil acesso, intensifica as barreiras logísticas. Assim, a eletrificação tradicional, baseada na expansão de linhas de transmissão, torna-se inviável em grande parte dos municípios rurais devido aos elevados custos de infraestrutura e às dificuldades geográficas.

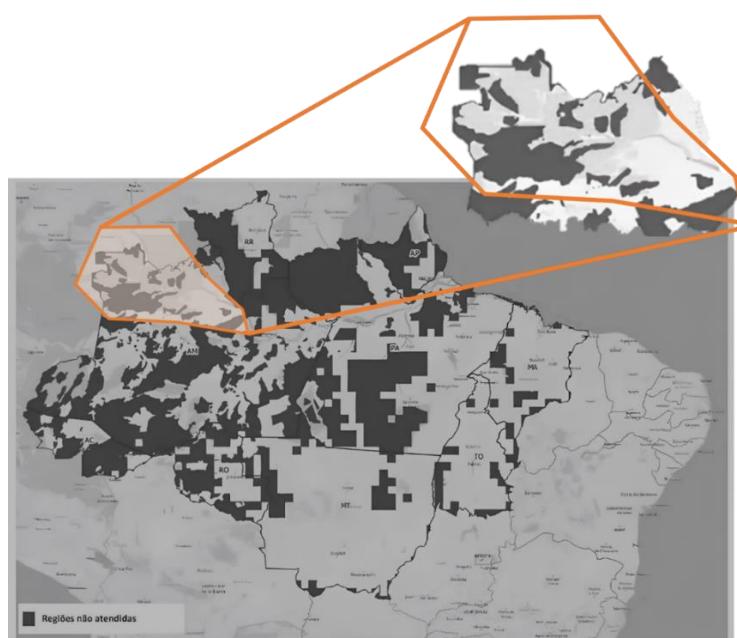
Figura 4 - População sem acesso à energia elétrica por estado.

UF	População sem acesso à energia elétrica	Percentual em relação à população do estado
AC	87.074	10,0%
AM	159.915	3,9%
AP	25.593	3,1%
MA	121.326	1,7%
MT	21.655	0,6%
PA	409.593	4,8%
RO	107.749	6,1%
RR	22.848	4,0%
TO	34.350	2,2%
Total	990.103	3,5%

Fonte: IEMA, 2021.

Observa-se, na Figura 5, que regiões como o Baixo Rio Negro, embora próximas ao município de Manaus, capital do Amazonas, ainda abrigam diversas comunidades que não possuem acesso à eletricidade. Essa proximidade geográfica contrasta com a realidade de exclusão energética enfrentada por essas populações, evidenciando que fatores como infraestrutura limitada e dificuldades logísticas persistem mesmo em áreas relativamente próximas aos centros urbanos.

Figura 5 - Áreas não eletrificadas no Rio Negro.



Fonte: IEMA, 2021.

Com o objetivo de eletrificar áreas remotas, o Programa Luz para Todos, implementado pelo governo federal em 2003, foi um marco na tentativa de expandir o acesso à eletricidade em áreas rurais e remotas. Apesar de ter beneficiado cerca de 10 milhões de brasileiros até 2023, o programa enfrenta limitações em termos de capacidade de fornecimento. Em média, a energia fornecida em sistemas solares instalados nas comunidades é projetada para 80 kWh/mês (TRINDADE, 2024). Entretanto, de acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024, o consumo médio de energia elétrica nas residências brasileiras em 2023 variou entre 131,1 kWh/mês, na região nordeste, e 204,5 kWh/mês na região norte (IBGE; SIMPLES, 2024). Ou seja, a energia fornecida pelo Programa Luz para Todos é insuficiente para atender as necessidades dos moradores da comunidade.

No que compete o acesso à eletricidade, há uma ligação direta entre a melhoria da qualidade de vida, ao aumento da produtividade econômica e ao fortalecimento de setores essenciais, como saúde e educação, em razão de possibilitar, por exemplo, o funcionamento de hospitais, escolas e pequenas indústrias. Dessa forma, a disponibilidade de eletricidade contribui para a criação de novas oportunidades econômicas, como o desenvolvimento de pequenos negócios e a geração de empregos. Para mais, segundo a IEA (2024), o acesso confiável e suficiente à energia elétrica é um dos pilares fundamentais para o aumento do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), pois permite que as comunidades avancem em áreas essenciais como educação e saúde.

Nesse contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) reconhece a energia como um direito essencial para o desenvolvimento humano, como expresso no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, que visa garantir acesso universal, confiável e moderno à energia até 2030. Isso demonstra que a eletrificação é mais do que um simples fornecimento de energia; ela é a base para o progresso social e econômico de comunidades vulneráveis (ONU, s.d.).

O Brasil, ao assinar o Acordo de Paris em 2015, comprometeu-se a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, além de promover o uso de energias renováveis e restaurar 12 milhões de hectares de florestas até 2030. A transição para um modelo energético mais sustentável é de suma importância para melhorar a qualidade de vida de milhões de brasileiros, especialmente em áreas rurais e comunidades isoladas, contribuindo para a redução da pobreza energética e a melhoria da qualidade do ar (UNFCCC, 2015; MMA, s.d.).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo fornecer uma compreensão sobre a viabilidade da implementação de energias renováveis em comunidades ribeirinhas do Amazonas, através de um estudo de caso, identificando os principais desafios dessa transição e propondo soluções para a execução eficaz da eletrificação rural nessas regiões.

1.1 OBJETIVO GERAL

Através do *software* HOMER PRO, busca-se analisar, por meio de simulações, a viabilidade financeira e técnica da implantação de energia elétrica com uma ou mais fontes renováveis para uma comunidade ribeirinha do Amazonas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obter dados reais de comunidades ribeirinhas do Baixo Rio Negro;
- b) Obter e analisar a curva de carga das comunidades não eletrificadas do Baixo Rio Negro: Marajá, Santo Antônio e Tiririca;
- c) Escolher uma comunidade;
- d) Avaliar o Programa Luz para Todos da região escolhida;
- e) Utilizar o *software* HOMER PRO para realizar dimensionamentos de implantação de energia elétrica;
- f) Realizar estudo de viabilidade técnica de mais de uma fonte de energia renovável para o mesmo local;
- g) Avaliar o custo da implantação do sistema.

1.3 JUSTIFICATIVA

- a) Disponibilidade de energia e inclusão social: Em comunidades ribeirinhas, a eletrificação rural pode dar aos moradores acesso a necessidades básicas, como energia elétrica, bem estar e comunicação. Ao modelar e desenvolver soluções viáveis que servirão como base para projetos em andamento no futuro, o trabalho avança a conversa sobre inclusão social e elevação do padrão de vida dessas pessoas;
- b) Sustentabilidade ambiental: Usar fontes de energia renováveis, mais especificamente a energia solar e eólica usadas neste trabalho, pode diminuir os efeitos ambientais da produção de eletricidade em áreas rurais. Além disso, aumenta a consciência em relação à sustentabilidade, ressaltando a importância de proteger os recursos naturais e diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE);
- c) Segurança energética e autossuficiência: Ao instalar sistemas de energia renovável, as comunidades ribeirinhas podem se tornar autossuficientes em energia. A análise de viabilidade coloca uma forte ênfase na redução da dependência de combustíveis fósseis e no aumento da resiliência energética em áreas remotas;
- d) Viabilidade econômica: simulações sugerem que os custos de colocar sistemas de energia renovável em prática em áreas rurais podem apontar para a possibilidade de a energia renovável ser uma alternativa econômica sustentável;
- e) Educação ambiental: por meio da análise e desenvolvimento de sistemas sustentáveis, o esforço conscientiza sobre os benefícios da energia limpa e estimula profissionais, pesquisadores e estudantes envolvidos na criação de soluções energéticas a adotarem práticas sustentáveis;
- f) Adesão às políticas públicas e obrigações relacionadas à sustentabilidade internacional: o estudo está alinhado tanto às políticas públicas quanto às obrigações internacionais de sustentabilidade.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

- a) Capítulo 1 (este capítulo): Expõe sobre as mais recentes informações sobre a matriz elétrica no mundo e no Brasil, matriz elétrica na região norte, dados de aumento de demanda de energia, locais que não eletrificados no Amazonas com foco no Baixo Rio Negro, a relação da energia elétrica com o meio ambiente, o Programa Luz para Todos e o desenvolvimento humano ligado ao acesso de energia elétrica. Além destes, este capítulo apresenta os objetivos (geral e específico) assim como a justificativa do tema desta monografia.
- b) Capítulo 2: discorre sobre o Conceito de energias renováveis, Vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica por fontes renováveis, Relacionamento entre acesso à energia e qualidade de vida, Matriz Energética Brasileira e do Estado do Amazonas, Composição da matriz elétrica nacional e sua predominância de fontes renováveis, Matriz energética do Amazonas e sua dependência de termelétricas, Desafios de Eletrificação em Regiões Remotas, Problemas logísticos e técnicos enfrentados em áreas isoladas, Estudo de exclusão elétrica na Amazônia e populações sem acesso à eletricidade, Dificuldades específicas da eletrificação do Baixo Rio Negro do Amazonas, Programa Luz para Todos no amazonas: Histórico e Limitações, Histórico do programa e objetivos alcançados até 2023, no Amazonas, Comparação da energia fornecida com as necessidades energéticas reais das famílias beneficiadas do Programa Luz para Todos e Comparação entre PVsyst e HOMER PRO.
- c) Capítulo 3: Demonstra o processo de entrada de dados, no software HOMER PRO, necessários para simulação, modelagem e otimização da eletrificação da comunidade escolhida.
- d) Capítulo 4: Avalia as simulações obtidas a partir do dimensionamento da comunidade escolhida.
- e) Capítulo 5: Considerações finais sobre o tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

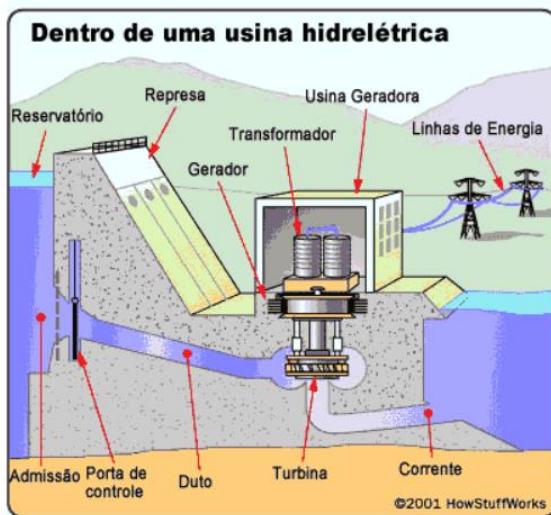
2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2.1.1 Conceito de energias renováveis

A eletrificação rural requer energia renovável, particularmente em áreas remotas onde a expansão da infraestrutura elétrica é impraticável ou não é financeiramente possível. Conforme ilustrado na Figura 2, energia hidrelétrica, solar, eólica e de biomassa são as fontes de energia renovável mais proeminentes no Brasil.

O Brasil faz uso extensivo de energia hidrelétrica, que é produzida usando o potencial hidráulico dos rios e é considerada uma fonte confiável e acessível. Mas colocá-la em prática pode ter sérios efeitos negativos no ecossistema, como inundações e perda de biodiversidade (ANEEL, 2020).

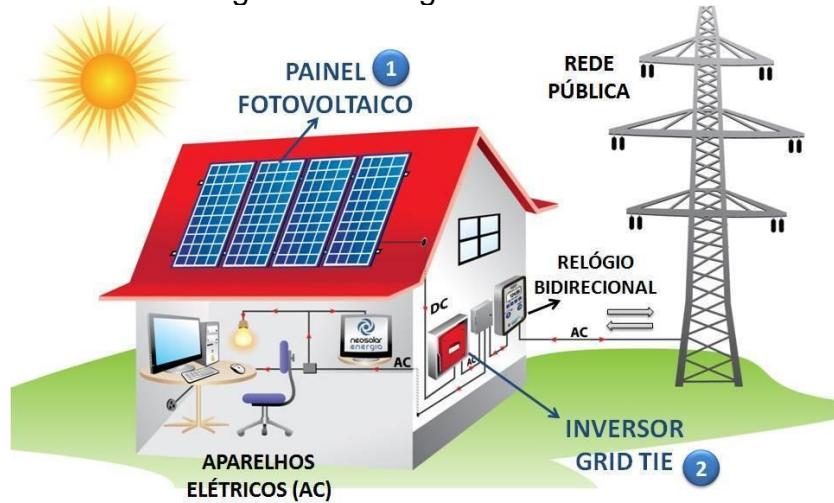
Figura 6 - Usina hidrelétrica.



FONTE: *HowStuffWorks*, 2001.

Entretanto, a energia solar, que utiliza a radiação solar para gerar eletricidade, tem ganhado relevância devido à abundância de luz solar em diversas regiões brasileiras e à nossa posse de painéis fotovoltaicos (SAMPAIO; GONZÁLEZ, 2017).

Figura 7 - Energia solar.



FONTE: Neosolar, 2023.

Por sua vez, a energia eólica é aproveitada pela força dos ventos e tem se destacado como uma das mais promissoras, principalmente no Nordeste brasileiro, onde ventos fortes e consistentes garantem grande eficiência (GWEC, 2021).

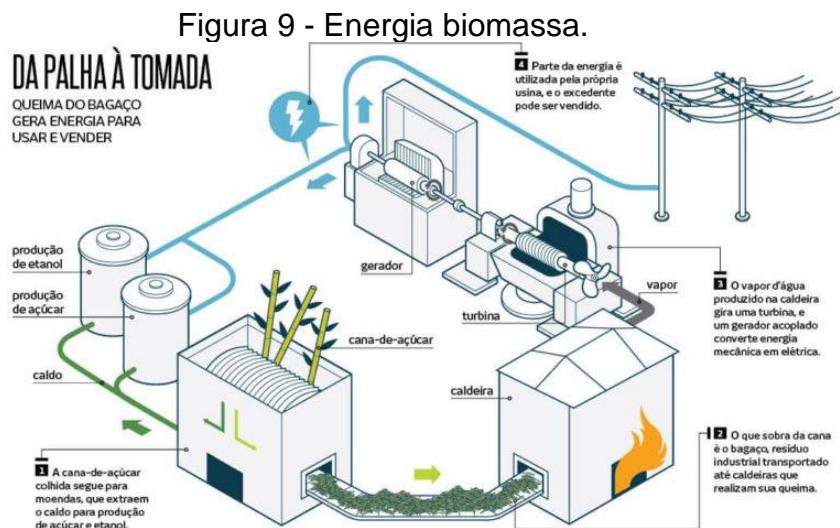
Figura 8 - Estrutura de uma turbina eólica.



Fonte: VIVA DECORA PRO, 2024.

Por último, mas não menos importante, a biomassa — uma fonte de energia que utiliza materiais orgânicos — oferece-se como um substituto viável em áreas

rurais, onde é possível transformar resíduos agrícolas em eletricidade e, ao mesmo tempo, reduzir o desperdício e as emissões de gases nocivos (BENTSEN; FELBY, 2012).



FONTE: Energês, 2022.

Segundo Oliveira et al. (2019), que ressaltam a importância de uma matriz energética diversificada em projetos de eletrificação rural, a combinação dessas fontes renováveis de energia pode oferecer às comunidades rurais soluções sustentáveis e financeiramente viáveis que apoiem o desenvolvimento local, a segurança energética e a mitigação dos impactos ambientais.

2.1.2 Vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica por fontes renováveis

A geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis apresenta vantagens significativas, como a sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais em comparação com fontes fósseis. No caso da energia solar, por exemplo, sua utilização no Brasil é favorecida devido à alta incidência de radiação solar, o que faz com que essa fonte seja considerada uma das mais promissoras, com baixos custos de operação e manutenção após a instalação (LANA et al., 2020).

Similarmente, a energia eólica tem se consolidado como uma alternativa viável, destacando-se por sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa e o combate ao aquecimento global (BRAZ; RODRIGUES; SIQUEIRA, 2017). No entanto, uma das limitações dessas fontes é a intermitência, que depende das condições climáticas e pode resultar em oscilações na geração de energia, requerendo investimentos em tecnologias de armazenamento ou em sistemas de apoio que garantam a confiabilidade do fornecimento (SANTOS et al., 2015; SILVA et al., 2017).

Por outro lado, a energia hidrelétrica, predominante na matriz energética brasileira devido ao vasto potencial hídrico do país, também apresenta suas complexidades. Apesar de ser renovável e economicamente competitiva, pode causar impactos significativos no meio ambiente e nas comunidades locais, como a alteração de ecossistemas aquáticos e o deslocamento de populações (MARI JÚNIOR et al., 2013). Dessa forma, a diversificação da matriz energética com o uso de fontes renováveis é uma estratégia essencial para enfrentar desafios como a variabilidade hídrica e o aumento da demanda por energia, promovendo um desenvolvimento sustentável e resiliente (SANTOS et al., 2015). Além do mais, é fundamental uma análise criteriosa das condições geográficas e econômicas para maximizar os benefícios e mitigar os impactos de cada tipo de fonte (LANA et al., 2020; BRAZ; RODRIGUES; SIQUEIRA, 2017). Por fim, a Figura 10 relata um resumo comparativo das vantagens e desvantagens socioeconômicas e ambientais de algumas fontes renováveis geradoras de energia elétrica, tais como hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, lixo e maré.

Figura 10 - Vantagens e desvantagens de dez fontes de geração de energia elétrica.

Tipo de fonte	Hidrelétrica	Eólica	Solar	Geotérmica	Biomassa sustentável	Lixo (Waste Energy)	Maré
Reno-vável?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Vantagens	A lagoa proporciona água para irrigação; Facilita o transporte fluvial.	Inesgotável; Não emite gases poluentes; Baixo custo de manutenção.	Inesgotável; Não emite gases poluentes; Baixo custo de manutenção.	Ocupa pouco espaço geográfico; Alta eficiência energética.	Baixo risco ambiental; Termelétrica a sem emissão de dióxido de enxofre (SO_2); Baixo custo de aquisição.	Promove ciclo sócio-econômico fechado; Reduz a emissão de gás metano (CH_4); Reduz lixões; Produz biogás.	Inesgotável; Não requer material sofisticado; Independente, parcialmente, das condições climáticas.
Desvantagens	Destruíção da vegetação ciliar e cultura local com a barragem; Assoreamento dos rios; Deslocamento da população ribeirinha.	Considerável impacto visual; É uma fonte intermitente; Causa impacto sonoro; Pode causar morte da avifauna.	Depende das condições climáticas; Baixa eficiência de armazenage; Intermitente.	Depende das condições climáticas; Baixa eficiência de armazenage; Intermitente.	Manutenção cara; Poluição sonora; Depende de um local geográfico específico.	Emite dióxido de carbono (CO_2); Baixa eficiência de armazenagem.	Necessita do compromisso da população e empresas para coleta; Alto custo na implantação do sistema.

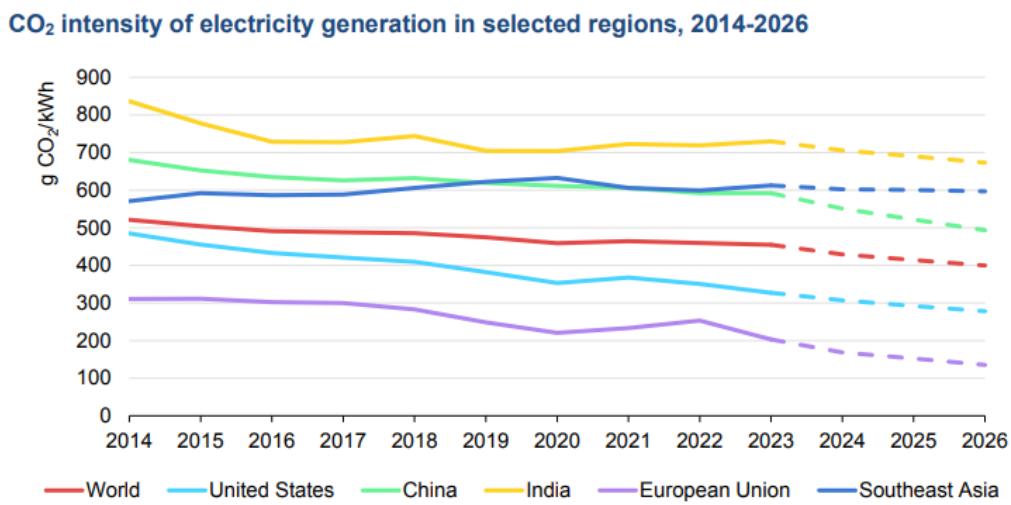
Fonte: (SANTOS et al., 2015, p. 3).

2.1.3 Impacto das energias renováveis no desenvolvimento sustentável e nas metas globais de redução de emissões.

As energias renováveis, como a solar, eólica e hidráulica, têm ganhado destaque como alternativas viáveis para diminuir a dependência de combustíveis fósseis, cujas emissões de gases de efeito estufa são responsáveis pelo aquecimento global e pelos impactos ambientais adversos (PORTOCARRERO, 2011). O Relatório *Brundtland* já destacava que o desenvolvimento sustentável deveria atender às necessidades presentes sem comprometer as futuras gerações, reforçando a importância de uma matriz energética que privilegie fontes menos poluentes (ONU, 1988). Nesse sentido, a Agenda 2030 da ONU estabelece o ODS 7, que visa assegurar o acesso a uma energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos, enfatizando a importância da transição energética para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e garantir um futuro mais sustentável (RIBEIRO, 2022).

No Brasil, os esforços em direção a uma matriz energética mais limpa se alinham aos compromissos assumidos em fóruns internacionais, como a COP21, onde foi assinado o Acordo de Paris com o objetivo de limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (FERNANDES; MAZZOLA, 2016). No entanto, para que a transição energética seja bem-sucedida, é essencial superar desafios econômicos e tecnológicos, bem como assegurar políticas públicas que incentivem o investimento em tecnologias de armazenamento e infraestrutura (RIBEIRO, 2022; PORTOCARRERO, 2011). Além disso, o desenvolvimento sustentável e a expansão de fontes renováveis devem ser realizados de forma que respeitem as necessidades sociais, evitando impactos negativos em comunidades e ecossistemas, garantindo uma abordagem holística que considere aspectos econômicos, sociais e ambientais (ONU, 2015; PORTOCARRERO, 2011). Segundo a Agência Internacional de Energia, desde 2014 a emissão de CO₂ por geração de eletricidade vem diminuindo significativamente com o uso de fontes renováveis, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Intensidade de CO₂ na geração de eletricidade em regiões selecionadas, 2014-2026.



Fonte: IEA, 2024.

2.1.4 Relacionamento entre acesso à energia e qualidade de vida

O fornecimento de energia elétrica contribui para a garantia de condições básicas, como iluminação, refrigeração e acesso a tecnologias que facilitam o cotidiano e promovem a inclusão social e econômica (AZEVEDO; VARELLA, 2023). O impacto positivo da eletrificação pode ser observado na ampliação do acesso a serviços de saúde de qualidade, no suporte à educação por meio da possibilidade de estudo noturno e na melhoria das condições sanitárias, essenciais para a promoção da saúde pública (MINAYO et al., 2000). Além disso, a disponibilidade de energia elétrica está associada à redução da pobreza energética, um fenômeno que limita o acesso a serviços energéticos de qualidade e afeta desproporcionalmente famílias em situação de vulnerabilidade (AZEVEDO; VARELLA, 2023).

Iniciativas como o Programa Luz para Todos e o Programa Mais Luz para a Amazônia visam a universalização do acesso à energia, reconhecendo a energia elétrica como um direito constitucional e um pilar para a dignidade humana e o desenvolvimento sustentável (AZEVEDO; VARELLA, 2023). Esses programas não só aumentam a oferta de energia em áreas rurais e isoladas, como também estimulam atividades econômicas e a geração de renda, promovendo uma melhoria nas condições de vida das comunidades atendidas. O acesso à energia impacta diretamente indicadores de qualidade de vida, como o IDH, que leva em consideração fatores como renda, saúde e educação, mostrando que a energia é um elemento central para a redução de desigualdades e para o desenvolvimento humano pleno (MINAYO et al., 2000; AZEVEDO; VARELLA, 2023).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E DO ESTADO DO AMAZONAS

2.2.1 Composição da matriz elétrica nacional e sua predominância de fontes renováveis

Conforme visto na Figura 2, a matriz elétrica brasileira é composta em sua grande parte por energia hidrelétrica, aproveitando o vasto potencial hídrico do país. Essa característica proporciona uma vantagem em termos de emissões de gases de efeito estufa, posicionando o Brasil entre os países com menores índices de emissões no setor de energia (TOLMASQUIM, 2012). No entanto, a dependência excessiva da energia hidrelétrica traz desafios, especialmente em períodos de seca prolongada, o que ressalta a necessidade de diversificação com outras fontes renováveis, como a energia eólica e a solar, que têm crescido de forma notável na última década (REVISTA ESPACIOS, 2015).

A energia eólica, por exemplo, tem se consolidado como uma alternativa complementar relevante, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, onde os regimes de vento são mais intensos e estáveis (CÂNDIDO, 2015). Já a energia solar, apesar de ainda em fase de expansão, demonstra grande potencial devido à alta incidência solar em quase todo o território brasileiro, fator que impulsiona sua integração na matriz (PEPITONE, 2016). Essa diversificação não apenas fortalece a segurança energética, mas também contribui para uma operação mais estável do sistema, minimizando a dependência de uma única fonte e potencializando a complementaridade entre elas (PEPITONE, 2016).

2.2.2 Matriz energética do Amazonas e sua dependência de termelétricas

Historicamente, o Amazonas tem se apoiado predominantemente em usinas termelétricas movidas a óleo combustível e, mais recentemente, em gás natural, especialmente após a implementação do gasoduto Urucu-Coari-Manaus em 2009

(NASCIMENTO, 2017). A introdução do gás natural trouxe uma redução nas emissões de dióxido de carbono em comparação com o óleo combustível, o que representou um avanço ambiental importante para a região (COSTA, 2013). No entanto, apesar dessa mudança, as termelétricas ainda representam cerca de 80% da capacidade instalada, evidenciando a contínua dependência de combustíveis fósseis e os desafios relacionados às emissões de gases de efeito estufa e à poluição local (ROCHA, 2012).

Apesar da integração do Amazonas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2013 ter possibilitado um alívio na dependência de fontes locais de geração, a realidade ainda mostra que as termelétricas continuam a desempenhar um papel crítico para suprir a demanda energética, especialmente em períodos de instabilidade na geração hidráulica (NASCIMENTO, 2017; COSTA, 2013). Este cenário reflete a necessidade de políticas públicas que promovam a diversificação da matriz com fontes renováveis, como solar e eólica, aproveitando o potencial natural da região para reduzir a dependência de fontes poluentes e fortalecer a segurança energética de forma sustentável (COSTA, 2013; ROCHA, 2012).

2.3 DESAFIOS DE ELETRIFICAÇÃO EM REGIÕES REMOTAS

2.3.1 Problemas logísticos e técnicos enfrentados em áreas isoladas

O fornecimento de energia em áreas isoladas, particularmente na região amazônica, apresenta desafios logísticos e técnicos complexos, que vão desde a vasta extensão territorial e os obstáculos naturais, como rios de grande largura e a densa cobertura florestal, até a baixa densidade populacional e dificuldades de acesso (VIEIRA, 2022; LACERDA et al., 2023). Essas características tornam inviável a extensão das redes convencionais de distribuição de energia, obrigando muitas comunidades a dependerem de geradores movidos a diesel. Embora esses geradores sejam relativamente acessíveis, seu uso implica em altos custos de operação e manutenção, além de estarem sujeitos às flutuações nos preços dos combustíveis, o

que afeta o orçamento das famílias e o desenvolvimento econômico local (SALAS et al., 2017).

Ademais, a dependência de combustíveis fósseis nessas regiões contribui para o aumento das emissões de gases de efeito estufa e para a poluição do ar, agravando os impactos ambientais (SANTOS, 2023). Para superar esses desafios, a implementação de soluções inovadoras como sistemas fotovoltaicos e outras fontes de energia renovável tem sido explorada. Projetos como os desenvolvidos em Terra Santa - PA demonstram que a inserção da geração solar, mesmo em sistemas híbridos com geradores a diesel, pode reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e as emissões de CO₂, além de melhorar a viabilidade econômica a longo prazo (VIEIRA, 2022). O uso de fontes locais, como biomassa e pequenos aproveitamentos hidrelétricos, também pode ser uma alternativa sustentável e viável para atender a essas comunidades, minimizando os custos logísticos e fortalecendo a autossuficiência energética (SALAS et al., 2008).

2.3.2 Estudo de exclusão elétrica na Amazônia e populações sem acesso à eletricidade

De acordo com a Figura 4, estudos indicam que cerca de 990 mil pessoas na Amazônia Legal permanecem sem acesso à energia elétrica. Essa situação é agravada por fatores como a baixa densidade populacional e as restrições ambientais, que tornam a extensão das redes de distribuição economicamente inviável e tecnicamente desafiadora. Apesar do estado do Amazonas ter apenas 3,9% da população sem acesso à energia elétrica, isso representa aproximadamente um total de 159 mil habitantes. Visto isso, a quantidade de habitantes do Amazonas sem acesso à energia fica em segundo lugar, perdendo apenas para o estado do Pará.

Essa realidade limita severamente o desenvolvimento socioeconômico e agrava a desigualdade social na região. No Amazonas, programas como o Luz para Todos e o Mais Luz para a Amazônia, foram instituídos com a finalidade de mitigar essa exclusão. Contudo, a implementação enfrenta entraves que vão desde dificuldades logísticas e operacionais até a insuficiência de recursos financeiros e

políticas públicas que atendam às particularidades locais (MATIELLO et al., 2018; FERREIRA et al., 2021).

Ainda mais, a geografia do Amazonas, com comunidades espalhadas ao longo de rios e áreas de difícil acesso, segundo a Figura 5, torna a extensão das redes de distribuição de energia inviável em muitas regiões. Por isso, a geração descentralizada, através de sistemas fotovoltaicos e outras tecnologias renováveis, tem se mostrado uma alternativa promissora e necessária para atender essas populações (MATIELLO et al., 2018). Apesar dos esforços, ainda é evidente a necessidade de um maior investimento em soluções inovadoras e sustentáveis, que possam alcançar áreas remotas e garantir um fornecimento de energia eficiente e adaptado às condições locais, promovendo, assim, um avanço real no desenvolvimento social e econômico do estado (AZEVEDO; VARELLA, 2023).

2.3.3 Dificuldades específicas da eletrificação do Baixo Rio Negro do Amazonas

A geografia da região do estado do Amazonas, marcada por rios extensos e densas florestas tropicais, impõe barreiras significativas ao acesso e eleva consideravelmente os custos logísticos de transporte de materiais e equipamentos essenciais para a construção e manutenção de infraestrutura elétrica (FILHO et al., 2008). Essa realidade se complica ainda mais devido à dispersão das comunidades ribeirinhas, que são pequenas e distantesumas das outras, fazendo com que a extensão das redes de distribuição seja economicamente inviável (ANDRADE et al., 2010). Além disso, a baixa densidade populacional contribui para um alto custo unitário de instalação, o que desestimula investimentos em soluções de eletrificação convencional (ARAÚJO, 2014).

Para mais, o alto custo operacional também se estende ao uso de geradores a diesel, uma solução comum, mas onerosa, que exige esforço logístico para o transporte do combustível, frequentemente realizado por vias fluviais que podem demorar semanas (ANDRADE et al., 2010). Essa dependência de combustíveis fósseis não só acarreta impactos financeiros, mas também ambientais, um paradoxo em uma das regiões mais biodiversas do mundo (FILHO et al., 2008). O resultado

disso é uma eletrificação precária, com interrupções frequentes e acesso limitado, perpetuando uma situação de exclusão social e estagnação econômica nas comunidades isoladas do Baixo Rio Negro (ARAÚJO, 2014).

2.4 PROGRAMA LUZ PARA TODOS NO AMAZONAS: HISTÓRICO E LIMITAÇÕES

2.4.1 Histórico do programa e objetivos alcançados até 2023, no Amazonas

O Programa Luz para Todos, iniciado em 2003, com o objetivo de erradicar a exclusão elétrica em áreas rurais, enfrentou desafios imensos para sua execução no estado do Amazonas, uma das regiões mais complexas em termos de acesso e logística. Até 2023, o programa beneficiou aproximadamente 43.335 pessoas em 174 comunidades distribuídas por 30 municípios do estado, destacando avanços significativos, mas ainda insuficientes diante das demandas locais (CAVALCANTE, 2008). O investimento total na região foi de cerca de R\$ 42.801.269,43, que possibilitou a implementação de 8.667 pontos de atendimento elétrico, incluindo a expansão de 1.219,24 km de redes de distribuição, a instalação de 15.866 postes e 3.255 transformadores, além da construção de 14 novos grupos geradores a diesel, que somam uma potência de 3,220 MW (ARAÚJO, 2014).

Apesar desses avanços, o programa enfrenta desafios persistentes e substanciais. A densa malha hidrográfica do Amazonas, junto com áreas alagadas e a dispersão das comunidades, impôs barreiras significativas para a logística e a execução das obras, dificultando a entrega de materiais e a instalação de infraestrutura (CAVALCANTE, 2008). Em particular, as condições climáticas adversas, caracterizadas por chuvas intensas durante a estação chuvosa, entre novembro e abril, complicam o transporte e geram atrasos frequentes nos cronogramas de execução (ARAÚJO, 2014). Essa realidade evidencia a necessidade de adaptações contínuas para enfrentar os desafios técnicos e financeiros que limitam a expansão eficiente do programa, em uma região onde a baixa densidade

populacional e as dificuldades de acesso tornam a eletrificação um desafio logístico e econômico colossal (CAVALCANTE, 2008; ARAÚJO, 2014).

2.4.2 Limitações em termos de capacidade de fornecimento, especialmente em áreas isoladas.

Ainda que o Programa Luz para Todos beneficiou muitas famílias em áreas rurais, em regiões isoladas, como as comunidades ribeirinhas do Baixo Rio Negro, a execução do programa encontra severas limitações. Muitas dessas localidades continuam dependendo de sistemas isolados, como geradores a diesel, que operam em média 3 horas por dia em pequenas comunidades (10 a 15 kVA) e entre 6 a 12 horas em comunidades maiores (50 a 75 kVA), sendo insuficientes para atender à demanda energética de forma constante e eficiente (TRINDADE, 2024).

Ademais, o cenário atual aponta que, no estado do Amazonas, 56 municípios permanecem desconectados da rede elétrica nacional, o que os obriga a depender de 130 termelétricas a diesel e de pequenos sistemas de geração distribuída. Esses sistemas, embora representem uma solução temporária, são limitados em potência e caros de manter. Como dito na introdução, em média, a energia fornecida em sistemas solares instalados nas comunidades é projetada para 80 kWh/mês. Essa capacidade atende apenas às necessidades residenciais básicas, sendo inadequada para pequenos negócios ou atividades produtivas, que exigem maior consumo energético (TRINDADE, 2024).

O impacto dessas limitações é agravado pelo custo elevado de manutenção e pelo fornecimento intermitente, que não permite a operação contínua de escolas, postos de saúde ou equipamentos que promovem desenvolvimento socioeconômico. Tais restrições perpetuam a desigualdade no acesso a serviços essenciais e à melhoria da qualidade de vida, evidenciando a lacuna entre as metas do programa e a realidade enfrentada nas áreas isoladas da Amazônia.

2.4.3 Comparação da energia fornecida com as necessidades energéticas reais das famílias beneficiadas

Em razão do estado do Amazonas possuir uma complexa geografia, o Programa Luz para Todos possui grandes limitações em termos de fornecimento adequado de energia elétrica em áreas remotas, como o Baixo Rio Negro. A potência média fornecida às residências, muitas vezes limitada a conexões monofásicas com até 5 kW, é suficiente para atender apenas às necessidades básicas de iluminação e funcionamento de pequenos eletrodomésticos, deixando um déficit considerável em relação à demanda real das famílias, especialmente aquelas que dependem de atividades produtivas para sua sobrevivência (ELETROBRAS, 2010).

A realidade das comunidades ribeirinhas no Baixo Rio Negro exemplifica essa disparidade. Nessas áreas, o consumo energético pode variar consideravelmente, com famílias necessitando de potências superiores a 5 kW para manter equipamentos como bombas d'água, sistemas de refrigeração e ferramentas agrícolas (DI LASCIO; BARRETO, 2009). Esse tipo de consumo é essencial para a manutenção de atividades econômicas que promovem a autonomia e o desenvolvimento sustentável das comunidades. Entretanto, a limitação da potência fornecida pelo programa faz com que muitas dessas necessidades fiquem sem atendimento, perpetuando um ciclo de dependência de fontes alternativas, como geradores a diesel, que além de serem mais caros, apresentam impactos ambientais negativos (LIMA et al., 2010).

2.5 SOFTWARES PARA PLANEJAMENTO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMAS ENERGÉTICOS: PVSYST E HOMER PRO

2.5.1 Comparação entre PVsyst e HOMER PRO

O planejamento, a simulação e a análise de sistemas energéticos são etapas cruciais para garantir a eficiência e viabilidade de projetos de eletrificação rural por meio de fontes renováveis. Entre os softwares amplamente utilizados para essas finalidades, destacam-se o PVsyst e o HOMER PRO, cada um com suas funcionalidades específicas e aplicabilidades distintas. O PVsyst, é um software desenvolvido com o intuito de atender engenheiros e pesquisadores envolvidos no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Ele possibilita a análise detalhada da produção de energia solar, abrangendo variáveis como condições climáticas, sombreamento, perdas sistêmicas e características dos módulos e inversores. Com simulações precisas, o PVsyst permite a criação de relatórios completos e gráficos que auxiliam na compreensão do desempenho anual dos sistemas projetados, contribuindo para a otimização dos recursos e a viabilidade econômica dos projetos (PVSYST, 2024).

Por outro lado, o HOMER PRO se destaca por ser uma ferramenta robusta para a modelagem e otimização de sistemas híbridos de energia. Desenvolvido pelo *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* e comercializado pela *HOMER Energy*, o software é projetado para avaliar sistemas que combinam diferentes fontes energéticas, como solar, eólica, geradores a diesel e armazenamento em baterias. Sua capacidade de simular e otimizar milhares de combinações de sistemas permite que engenheiros e tomadores de decisão encontrem a configuração mais eficiente e econômica para atender às necessidades energéticas de comunidades rurais, especialmente em regiões isoladas. O HOMER PRO analisa custos de capital, operação, manutenção e a variabilidade da demanda ao longo do tempo, fornecendo insights valiosos para o desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis e confiáveis (HOMER ENERGY, 2024).

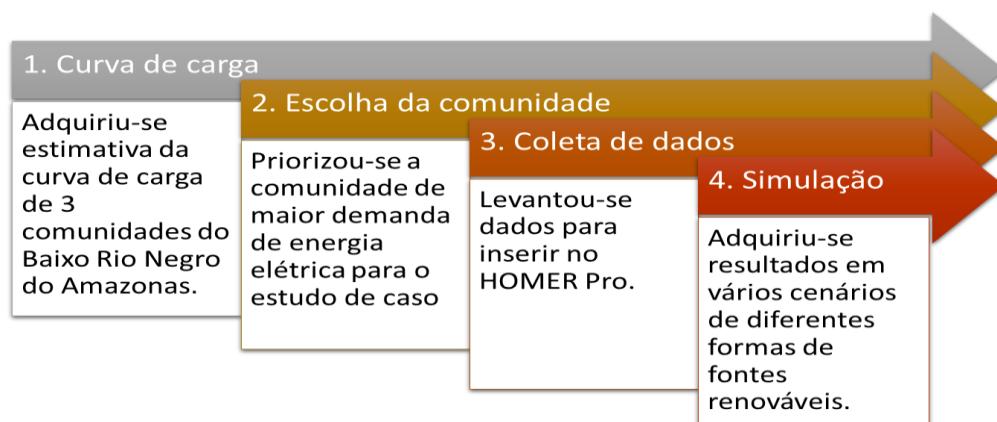
A partir do que foi observado para eletrificação rural com a complexidade geográfica do Amazonas, a distância das comunidades e a sazonalidade; é

necessário a combinação de várias fontes de energia para fornecer eletricidade em várias épocas do ano e, contornar intermitências de fontes como solar e eólica. Por este motivo, o HOMER PRO, torna-se mais adequado para estudo de viabilidade de implantação de energia elétrica por meio de fontes renováveis em uma comunidade do Baixo Rio Negro.

3 METODOLOGIA

De antemão, foi necessário estimar a curva de carga de 3 comunidades do Baixo Rio Negro do Amazonas: Santo Antônio, Marajá e Tiririca. Para que a estimativa fosse correta, usou-se dados coletados nas comunidades pelo projeto Star Energy (detalhes em <https://www.coventry.ac.uk/research/research-directories/completed-projects/2019/star-energy/>) no ano de 2017. Embora as comunidades tivessem energia elétrica oriunda de gerador diesel, este funciona poucas horas por dia. E a curva de carga estimada foi feita para 24 h por dia/7 dias por semana. Com esses dados em mãos, principalmente no tema energético da pesquisa, foi escolhida a comunidade com a maior demanda de energia elétrica para realizar o estudo de caso de eletrificação a partir de fontes renováveis. Para tal, utilizou-se o software HOMER PRO que, por sua vez, efetua a modelagem, otimização e avaliação de custos de sistemas de energia com uma ou mais fontes renováveis. À vista disso, levantou-se dados necessários para executar a simulação no software, tais como: localização da comunidade ribeirinha e uma variedade de painéis solares, controladores, inversores, baterias e turbinas eólicas, a fim de buscar o melhor custo-benefício. Finalmente, exerceu-se a simulação no HOMER PRO obtendo resultados em diversos cenários de utilização de uma ou mais fontes de energia renovável. Na Figura 12, é possível entender as etapas da metodologia de forma ilustrativa.

Figura 12 - Diagrama da metodologia.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1 CURVA DE CARGA DE 3 COMUNIDADES DO BAIXO RIO NEGRO DO AMAZONAS: SANTO ANTÔNIO, MARAJÁ E TIRIRICA.

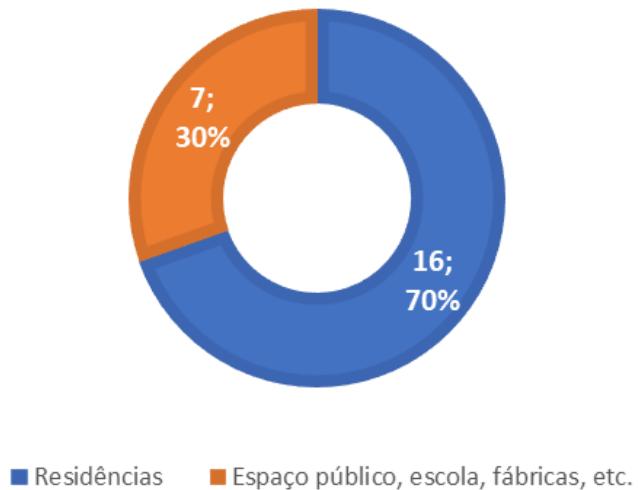
Para a curva de carga estimada das comunidades (Santo Antônio, Marajá e Tiririca), baseou-se em um antigo projeto da Universidade Federal do Amazonas, o qual foi feito uma entrevista nas próprias comunidades ribeirinhas com o intuito de descobrir a quantidade de aparelhos elétricos existentes em cada unidade consumidora de energia. Com isso, foi possível estimar a curva de carga, para 24h de uso por dia e 7 dias por semana.

3.1.1 Santo Antônio (coordenadas -2.7304648156349645, -60.82604860269413)

Através do antigo projeto mencionado no título 3.1, descobriu-se que a comunidade de Santo Antônio possui 23 unidades consumidoras, sendo 16 residências e 7 espaços como uma fábrica de espeto, uma casa de farinha, dois centros comunitários, uma escola, uma igreja e um galpão. Isto é, 70% da comunidade é composta por residências e 30% por outros espaços consumidores de eletricidade, como pode ser observado no Gráfico 1. Ademais, por meio de contato com um representante da comunidade, via aplicativo de mensagem, verificou-se que a comunidade possui 11 famílias, chegando a um total de 25 pessoas. Por fim, com auxílio do Google Earth, descobriu-se que a comunidade em questão possui uma área aproximada de 63.227,52 m², de acordo com a Figura 13.

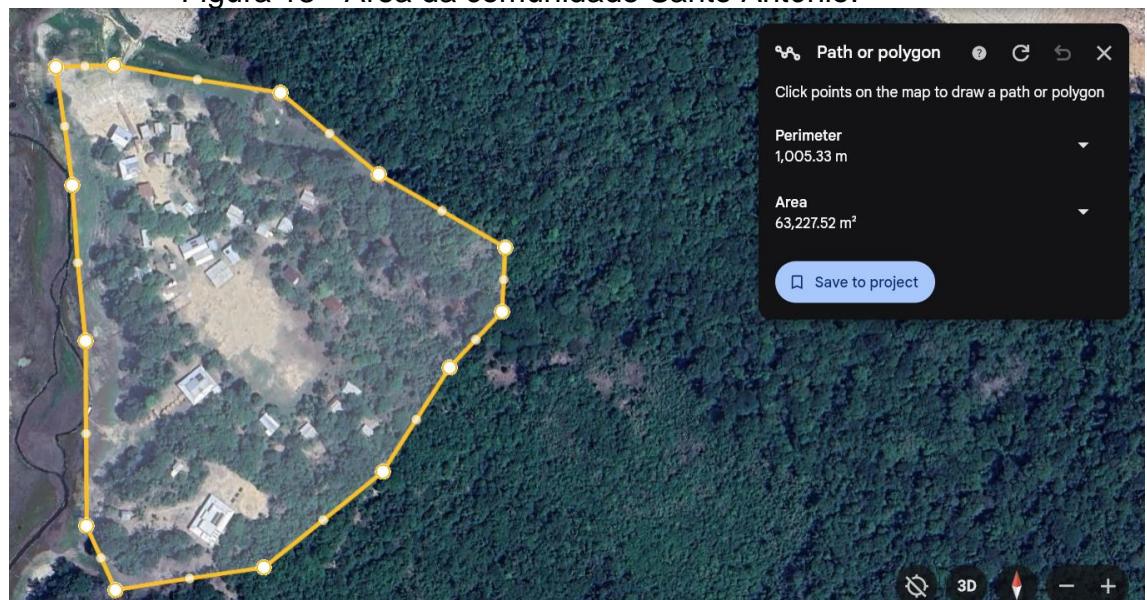
Gráfico 1 - Unidades consumidoras de Santo Antônio.

UNIDADES CONSUMIDORAS DE ST ANTÔNIO



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 13 - Área da comunidade Santo Antônio.

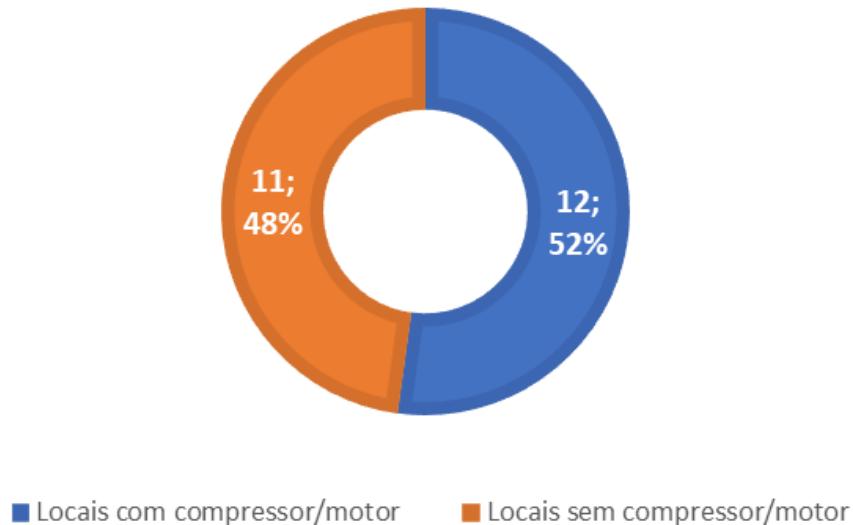


Fonte: Google Earth, 2024.

Vale ressaltar que, na curva de carga estipulada, foi incluída a potência de surto em locais onde existiam aparelhos com motor e/ou compressor. No Gráfico 2, é possível observar de maneira visual a quantidade de unidades consumidoras com e sem compressor ou motor.

Gráfico 2 - Locais com e sem motor ou compressor.

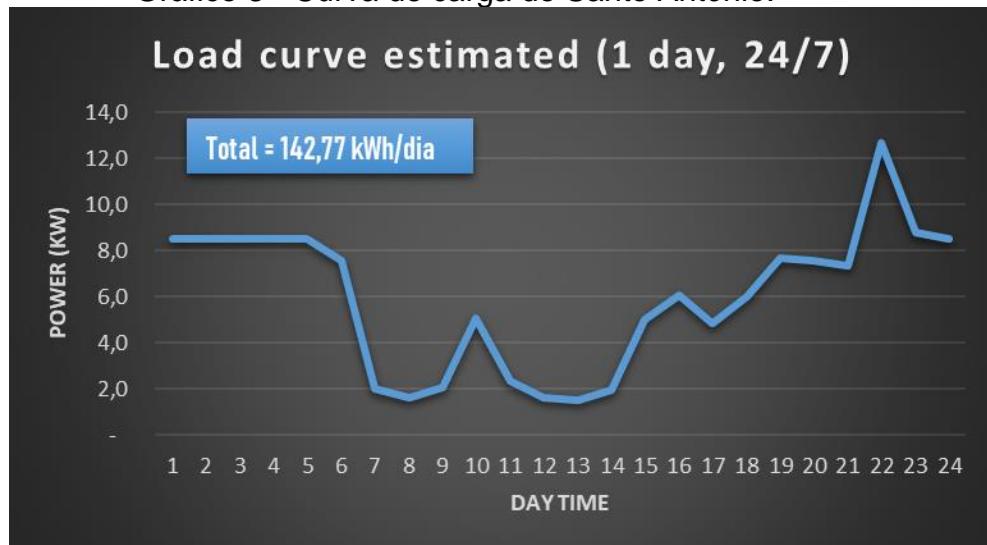
LOCAIS COM E SEM MOTOR/COMPRESSOR



Fonte: Autoria própria, 2024.

Vale destacar que, no momento da visita à comunidade para registro de seus dados energéticos, cinco residências estavam fechadas. Portanto, para compor a demanda de energia elétrica dessas residências, foi feito uma média da demanda de energia das outras 11 residências entrevistadas. Assim sendo, após a finalização da demanda estimada de todos as unidades consumidoras de energia, calculou-se a demanda de energia elétrica total da comunidade, obtendo um valor de aproximadamente 143 kWh/dia, conforme apresentado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Curva de carga de Santo Antônio.



Fonte: Autoria própria, 2024.

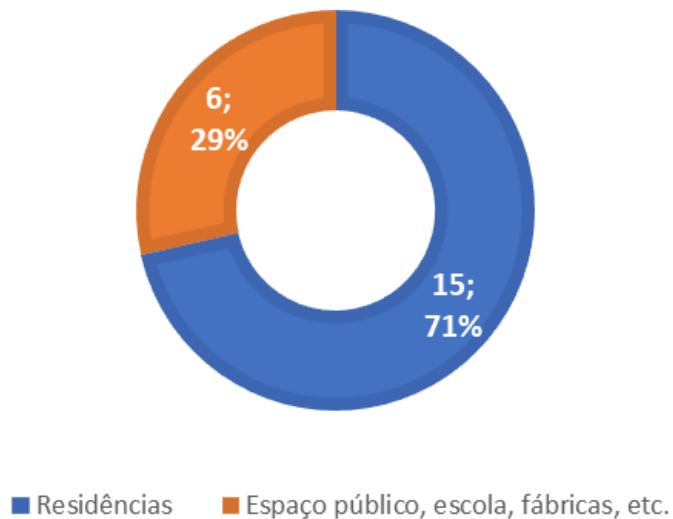
Por fim, a comunidade contava, em 2017, com um gerador a diesel de 15 kVA que fornece energia durante 3 horas por dia e, o custo da energia elétrica é dividido entre os moradores. À vista disso, nota-se que é imprescindível realizar uma estimativa da demanda de energia elétrica para a comunidade, uma vez que o cenário ideal é aquele onde as pessoas possam utilizar seus aparelhos elétricos a qualquer hora do dia (24h por dia e 7 dias por semana).

3.1.2 Tiririca (coordenadas -2.7159289377083335, -60.835646759489336)

A respeito da comunidade de Tiririca, de acordo com o projeto mencionado no título 3.1, existem 21 unidades consumidoras, sendo 15 residência e 6 espaços como uma igreja, uma casa bomba d'água, uma casa do gerador, uma hospedagem da igreja, uma casa de artesanato e um redário. Isto é, 71% da comunidade é composta por residências e o restante das unidades consumidoras representam 29%, como mostra o Gráfico 4. Finalmente, utilizando o Google Earth, identificou-se que a comunidade Tiririca possui uma área de aproximadamente 20.496,21 m², como ilustrado pela Figura 14.

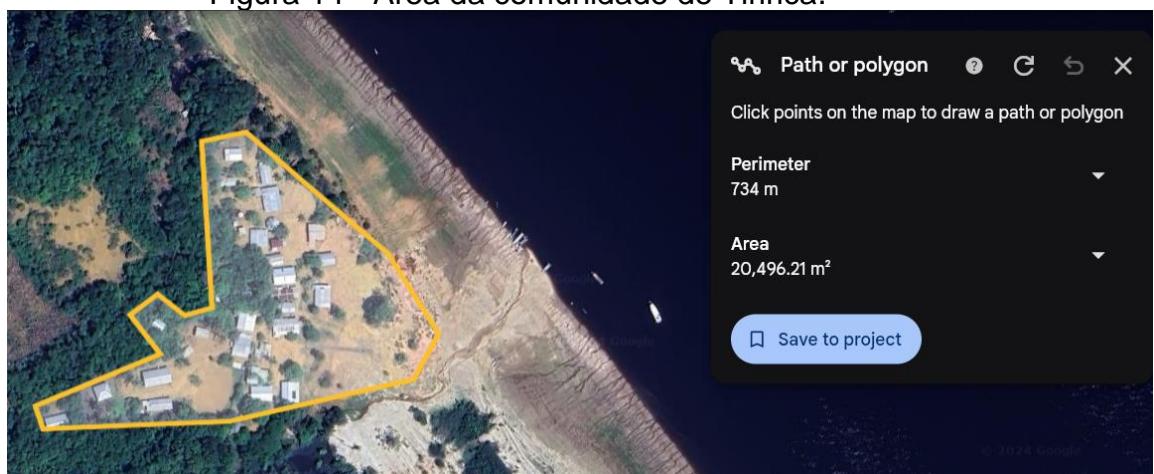
Gráfico 4 - Unidades consumidoras de Tiririca.

UNIDADES CONSUMIDORAS DE ST ANTÔNIO



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 14 - Área da comunidade de Tiririca.

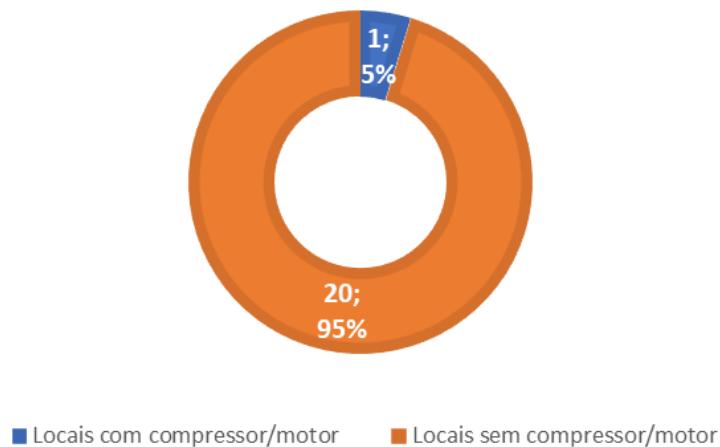


Fonte: Google Earth, 2024.

De modo semelhante a comunidade de Santo Antônio, foi incluído, na comunidade de Tiririca, a potência de surto nas unidades consumidoras de energia elétrica que possuíam motores ou compressores. No Gráfico 5, é possível notar de modo ilustrativo os locais com ou sem motor ou compressor.

Gráfico 5 - Locais com e sem motor ou compressor.

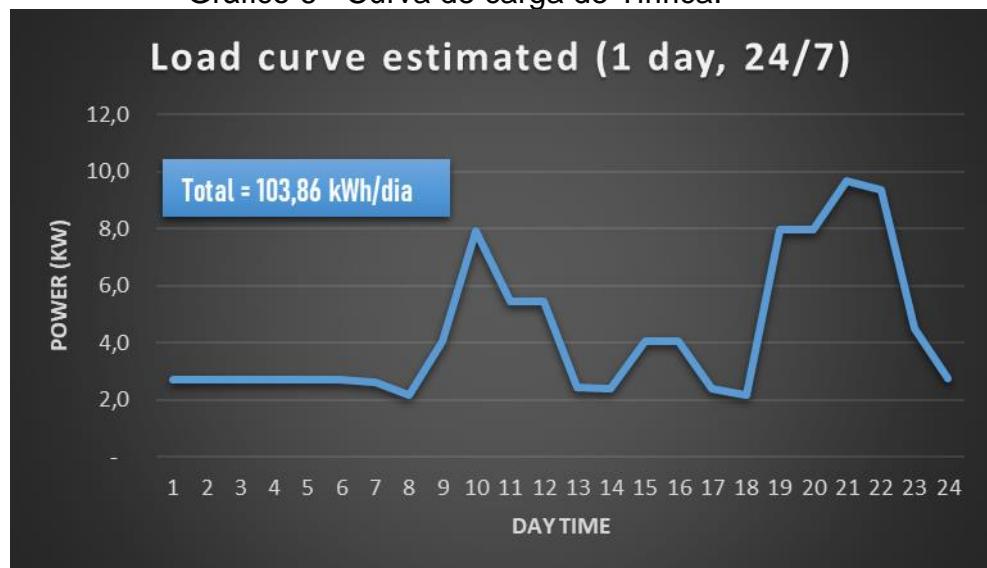
LOCAIS COM E SEM MOTOR/COMPRESSOR



Fonte: Autoria própria, 2024.

Salienta-se que, no momento da visita à comunidade Tiririca, 15 residências existentes por lá estavam fechadas. Desse modo, para construir a curva de carga estimada, utilizou-se os mesmos dados das residências fechadas da comunidade de Santo Antônio. Assim sendo, após a finalização da demanda de todas as unidades consumidoras de energia, calculou-se a demanda de energia elétrica estimada total da comunidade, obtendo um valor de aproximadamente 86 kWh/dia, conforme ilustrado pelo Gráfico 6.

Gráfico 6 - Curva de carga de Tiririca.



Fonte: Autoria própria, 2024.

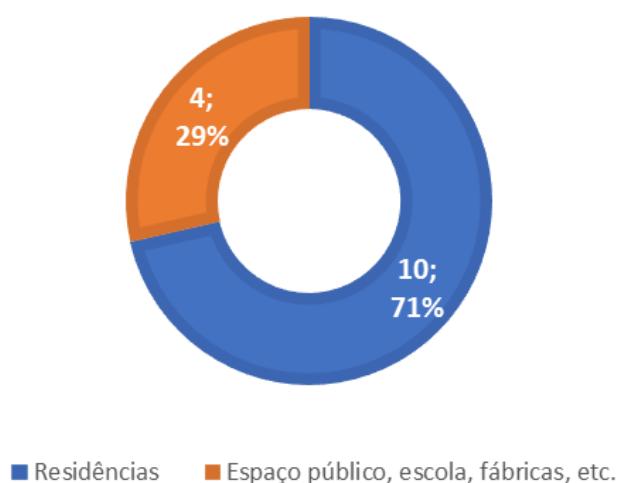
Finalmente, a comunidade conta com um gerador a diesel de 12,5 kVA que fornece energia durante 3 horas e, o custo de energia elétrica é dividido entre os moradores. Dessa forma, é importante produzir uma estimativa da demanda de energia elétrica para a comunidade, uma vez que o cenário ideal é aquele onde as pessoas possam utilizar seus aparelhos elétricos a qualquer hora do dia.

3.1.3 Marajá (coordenadas -2.73344394,-60.81558108)

Em relação a comunidade de Marajá, conforme projeto mencionado no título 3.1, existem 14 unidades consumidoras de energia, sendo 10 residências e 4 espaços como duas casas do gerador, um poço artesiano e um centro comunitário. Isto é, 71% da comunidade é composta por residência e, o restante, por outros espaços, como se revela no Gráfico 7. Por último, desvendou-se no Google Earth que a comunidade de Marajá possui uma área aproximada de 3.286,71 m², conforme representado pela Figura 15.

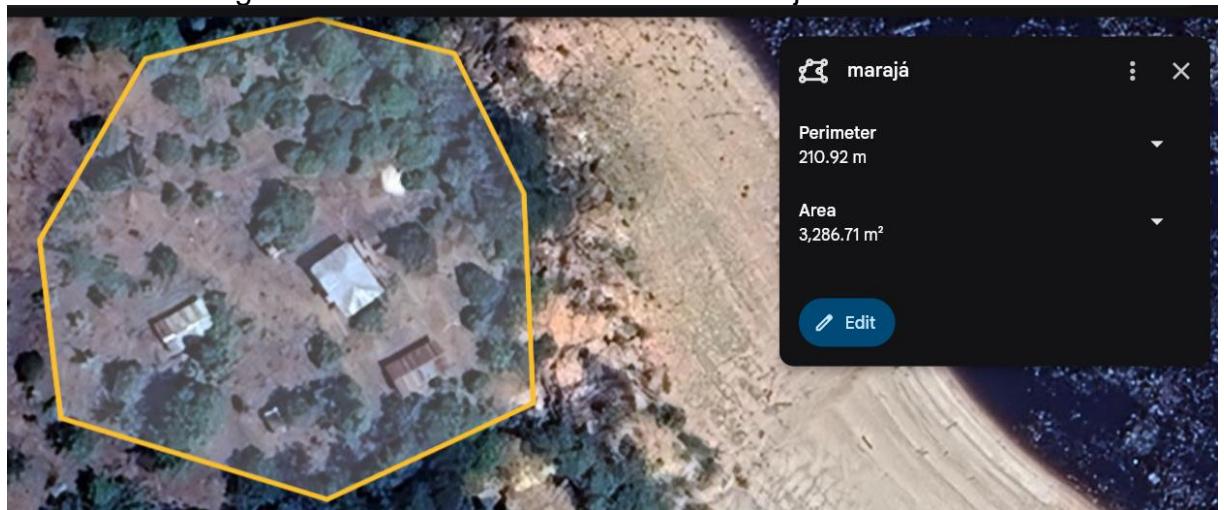
Gráfico 7 - Unidades consumidoras de Marajá.

UNIDADES CONSUMIDORAS DE ST ANTÔNIO



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 15 - Área da comunidade de Marajá.

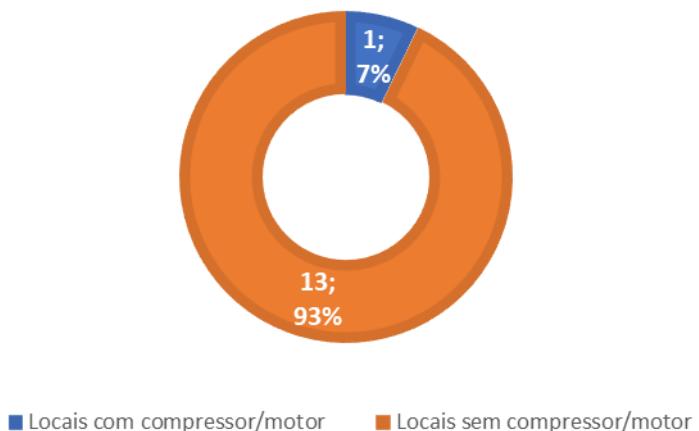


Fonte: Google Earth, 2024.

Analogamente às duas comunidades já citadas, foi incluído, na comunidade de Marajá, a potência de surto para locais com aparelhos com motor ou compressor. No Gráfico 8 ,nota-se de maneira visual a quantidade de locais com ou sem compressor ou motor.

Gráfico 8 - Locais com e sem motor ou compressor.

LOCAIS COM E SEM MOTOR/COMPRESSOR

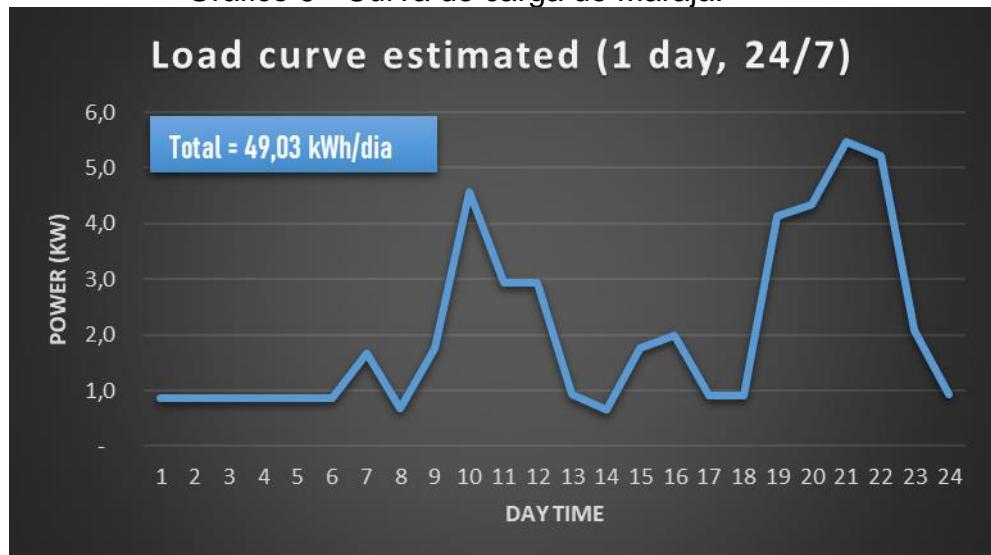


Fonte: Autoria própria, 2024.

Vale destacar que, no momento da visita à comunidade de Marajá, dez residências existentes por lá estavam fechadas. Assim sendo, para construir a curva de carga, utilizou-se os mesmos dados das residências fechadas da comunidade de Santo Antônio. Em seguida, com a finalização da demanda energética de todas as

unidades consumidoras, calculou-se a demanda de energia elétrica total da comunidade, atingindo 49,03 kWh/dia, como expõe o Gráfico 9.

Gráfico 9 - Curva de carga de Marajá.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Em suma, Marajá possui um gerador a diesel de 3,3 kVA, com custo de energia dividido entre os moradores, que fornece energia por 12 horas, divididas em três períodos de 4 horas: pela manhã, tarde e noite. Assim sendo, torna-se relevante elaborar uma estimativa da demanda de energia elétrica para a comunidade, uma vez que o cenário ideal é aquele onde as pessoas possam utilizar seus aparelhos elétricos a qualquer hora do dia.

3.1.4 Razão da determinação da comunidade para realização do estudo de caso.

A análise das curvas de cargas revelou que a comunidade de Santo Antônio possui a maior demanda de energia elétrica entre as localidades estudadas, com aproximadamente 143 kWh/dia. Esse dado reflete a relevância da comunidade, que se destaca também por ser a única, entre as três avaliadas, a contar com uma escola. Esse fator é essencial para a promoção da educação não apenas na própria

comunidade, mas também nas regiões vizinhas, já que moradores de localidades próximas têm a possibilidade de se deslocar até Santo Antônio para estudar.

Nessa perspectiva, o Programa Nacional de Apoio ao Transporte Escolar (Pnate), do governo brasileiro, desempenha um papel fundamental. O programa, gerido pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE), assegura transporte fluvial para crianças de comunidades ribeirinhas sem escolas, permitindo que elas tenham acesso à educação básica em localidades que dispõem de infraestrutura educacional. Além de garantir um meio seguro e eficiente de transporte, o Pnate disponibiliza recursos para custear despesas como manutenção, seguros, licenciamento, impostos, pneus, serviços mecânicos e combustível das embarcações. Também possibilita a contratação de serviços de transporte por estados e municípios, beneficiando mais de 5 milhões de estudantes em todo o Brasil (PORTAL DA NAVEGAÇÃO, 2024).

Apesar de sua importância e do apoio do Pnate, a comunidade de Santo Antônio enfrenta sérias limitações em relação ao acesso à energia elétrica. Por meio de contato com um representante da comunidade, via aplicativo de mensagem, constatou-se que a comunidade não é atendida pelo Programa Luz para Todos. Essa exclusão ressalta a necessidade urgente de investimentos em eletrificação, visando melhorar a qualidade de vida local e apoiar o desenvolvimento socioeconômico da região.

3.2 FERRAMENTA DE ANÁLISE DO PROJETOS: SOFTWARE HOMER PRO

A implantação de eletrificação nas comunidades do Baixo Rio Negro, no Amazonas, por meio de fontes renováveis, exige a definição de parâmetros para realizar uma simulação mais próxima da realidade no software HOMER PRO. Esses parâmetros incluem a curva de carga, localização de onde será feito o estudo, o custo de aquisição dos materiais, os custos de operação, manutenção e substituição dos materiais ao longo dos anos, bem como as especificações técnicas, como potência, tensão e corrente elétrica.

O HOMER PRO é um software amplamente reconhecido como padrão global para o projeto e otimização de *microgrids* em diversos setores, abrangendo desde

comunidades isoladas e construções em ilhas até bases militares e *campi* conectados à rede elétrica. Desenvolvido originalmente pelo NREL e atualmente distribuído pela UL Solutions, o HOMER PRO combina simulação, otimização e análise de sensibilidade em uma única plataforma, permitindo que engenheiros e pesquisadores avaliem sistemas híbridos de geração de energia ao longo de um ano, com intervalos de tempo variáveis entre um minuto e uma hora. Uma de suas principais funcionalidades é a simulação de todas as combinações possíveis de equipamentos configurados, garantindo a análise de sistemas economicamente viáveis e tecnicamente eficientes. Além disso, sua ferramenta de otimização classifica as configurações de sistemas com base no custo total, operação e manutenção. Por fim, a análise de sensibilidade possibilita a avaliação do impacto de variáveis como velocidade do vento e custos de combustíveis, permitindo a adaptação dos projetos às condições locais (HOMER ENERGY, 2024).

Vale destacar que o HOMER PRO foi obtido na versão premium do aplicativo disponibilizada pelo desenvolvedor durante o período de teste gratuito de 21 dias, a partir da instalação em um notebook da marca Lenovo, equipado com processador Intel i5 de décima geração, frequência de 2.5 GHz, 16GB de memória RAM, tela com resolução de 1920x1080 pixels, sistema operacional Windows 10 de 64 bits, além de 68,4GB de armazenamento interno disponível e acesso à internet.

3.3 COLETA DE DADOS PARA SIMULAÇÃO

3.3.1 Características do local

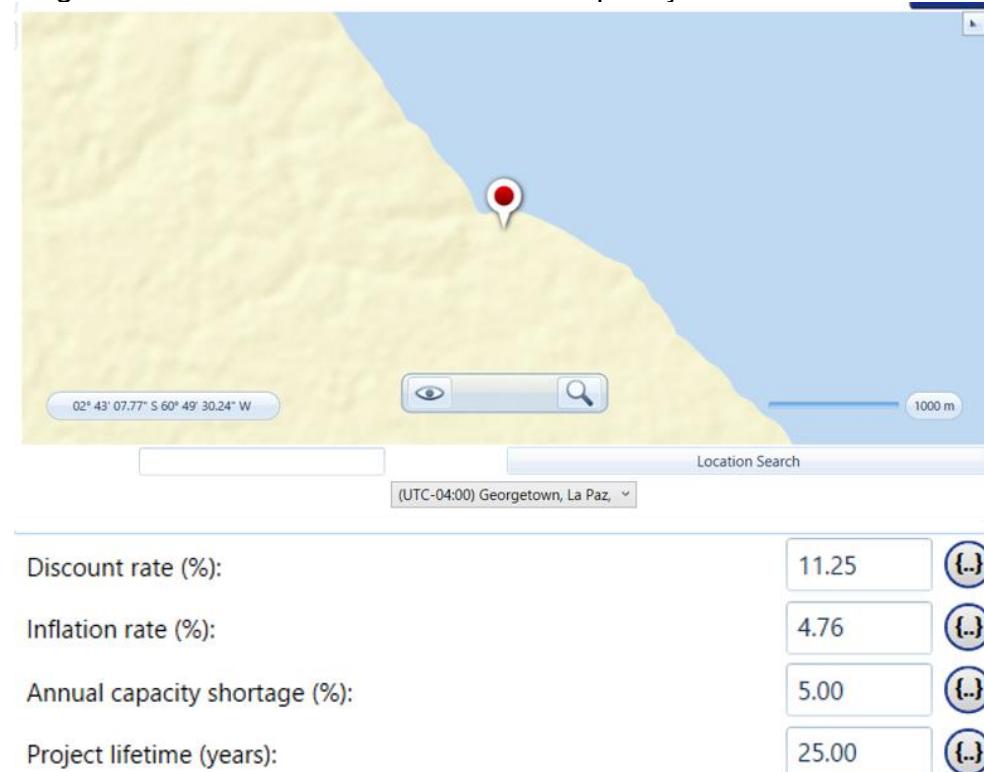
Para iniciar a simulação, é necessário fornecer atributos da comunidade de Santo Antônio, tais como coordenadas do local, taxa de inflação do país (*inflation rate*), taxa Selic (*discount rate*), tempo de vida do projeto (*lifetime project*) e escassez anual de capacidade (*annual capacity shortage*). De acordo com a análise econômica mencionada em relatórios de 2024 sobre financeiros e projeções econômicas do

Banco Central do Brasil, a projeção da inflação está com uma taxa de 4,76% e a taxa Selic com 11,25%.

No contexto do software HOMER PRO, um déficit de 5% de capacidade anual foi adotado, o que equivale a 95% de disponibilidade de energia elétrica. A disponibilidade é definida como a porcentagem de tempo em que o sistema de energia é capaz de atender às necessidades de carga. Para cargas críticas, uma disponibilidade de 99% é considerada aceitável, enquanto para cargas residenciais comuns, 95% é geralmente considerada suficiente. O valor de 5% de déficit foi escolhido para equilibrar a viabilidade econômica com a confiabilidade do fornecimento de energia, garantindo que o sistema seja capaz de atender a demanda de forma eficiente, sem custos excessivos (TRINDADE, 2014).

No que diz respeito ao tempo de vida do projeto, admitiu-se valores padrões que o próprio software preenche automaticamente, 25 anos. Em suma, a Figura 16 demonstra como foi feita a inserção dos dados.

Figura 16 - Características do local de aplicação do estudo de caso.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Posteriormente, faz-se necessário adicionar a demanda estimada de energia elétrica da comunidade (Figura 17) a cada hora do dia e atribuir o mês de janeiro tal

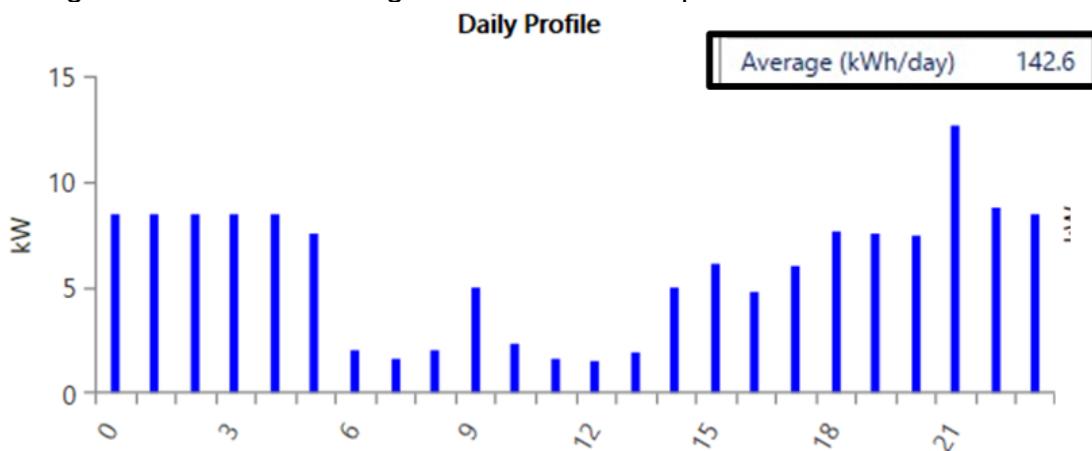
como o que mais demanda energia, visto que é o período do verão na região do estado do Amazonas e, dessa forma, as pessoas tendem a utilizar meios para se refrescar, como por exemplo, o uso de ventiladores, ares-condicionados, etc. Com isso, o software foi capaz de prover a curva de carga (Figura 18) que, por sua vez, foi semelhante àquela mostrada no tópico 3.1.1.

Figura 17 - Demanda de energia da comunidade de Santo Antônio.

Hour	Load (kW)
0	8.500
1	8.500
2	8.500
3	8.500
4	8.500
5	7.600
6	2.000
7	1.600
8	2.000
9	5.000
10	2.300
11	1.600
12	1.500
13	1.900
14	5.000
15	6.100
16	4.800
17	6.000
18	7.700
19	7.600
20	7.400
21	12.700
22	8.800
23	8.500

Fonte: HOMER PRO, 2024.

Figura 18 - Curva de carga do HOMER PRO para Santo Antônio.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Com o objetivo de ampliar a diversidade das fontes de fornecimento de energia elétrica no Brasil, foram coletados dados sobre os recursos solares e eólicos da comunidade de Santo Antônio no *software*. Conforme apresentado na Figura 2, a matriz elétrica brasileira é predominantemente composta por energia hidrelétrica, solar e eólica. No entanto, a energia hidrelétrica responde por mais de 50% da geração de eletricidade no país. Assim, é fundamental diversificar as fontes de energia, a fim de evitar que a matriz elétrica se torne excessivamente dependente de uma única fonte. A diversificação das fontes de energia elétrica é fundamental para garantir a segurança e a sustentabilidade do fornecimento em áreas rurais, onde a dependência de uma única fonte pode ser um risco significativo. Ao diversificar, é possível reduzir os impactos de falhas na geração ou fornecimento de energia, como acontece, por exemplo, quando uma seca prolongada compromete a produção de energia hidrelétrica (SANTOS, 2022).

Deste modo, para obtenção da radiação solar, o *software* acessa os conjuntos de dados TMY2 e TMY3, fornecidos pelo NREL, além do SSE (*Surface Solar Energy*) da NASA, que oferece médias mensais globais de radiação solar. Já para a velocidade do vento, o HOMER PRO recorre a atlas eólicos, como o Atlas Eólico Brasileiro, e a fontes internacionais, como o NREL e a base de dados POWER (*Prediction of Worldwide Energy Resource*) da NASA, para estimar a produção de energia eólica (HOMER ENERGY, 2024). Na Figura 19 e Figura 20, apresenta-se, respectivamente, a radiação solar e a velocidade do vento (acima de 50 metros da superfície da Terra), ao longo do ano na comunidade de Santo Antônio. Estas informações são importantes para a escolha dos equipamentos que consigam atender as características do local.

Figura 19 - Dados Mensais Médios de radiação Solar Global Horizontal.

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /day)
Jan	0.420	4.340
Feb	0.409	4.320
Mar	0.411	4.320
Apr	0.424	4.260
May	0.441	4.140
Jun	0.486	4.370
Jul	0.515	4.720
Aug	0.536	5.230
Sep	0.508	5.230
Oct	0.483	5.060
Nov	0.460	4.750
Dec	0.428	4.370

Annual Average (kWh/m²/day): 4.59

Fonte: HOMER PRO, 2024.

Figura 20 - Dados Mensais Médios de Velocidade do Vento.

Month	Average (m/s)
Jan	2.080
Feb	2.220
Mar	2.190
Apr	2.110
May	2.040
Jun	2.280
Jul	2.390
Aug	2.180
Sep	1.920
Oct	1.800
Nov	1.760
Dec	1.870

Downloaded at 11/19/2024 2:53:35
 PM from:
 NASA Prediction of Worldwide
 Energy Resource (POWER) database.
 Monthly average wind speed at 50m
 above the surface of earth over a 30-
 year period (Jan 1984 – Dec 2013)
 cellMidpointLatitude: -2.75
 cellMidpointLongitude: -60.75

Annual Average (m/s): 2.07

Fonte: HOMER PRO, 2024.

3.3.2 Parâmetros para o dimensionamento de energia solar e eólica *off-grid*.

Ao utilizar o software HOMER PRO, reparou-se empiricamente que ele mantém listas de fornecedores internacionais de produtos para eletrificação. No entanto, considerando que a comunidade de Santo Antônio está localizada no estado do Amazonas, Brasil, o custo logístico dos materiais para eletrificação se torna elevado, assim como a conversão da moeda estrangeira para o valor em reais.

Diante disso, para realizar uma simulação mais realista, foram selecionados no software equipamentos com determinadas especificações elétricas. Em seguida, foram considerados equipamentos com as mesmas características, mas provenientes de fornecedores nacionais. Dessa forma, o preço dos materiais e o custo logístico se tornam mais equilibrados.

Ademais, foi dada atenção ao preenchimento dos dados solicitados pelo software, como exibe a Figura 21, custos dos dispositivos, as despesas com substituição e manutenção, capacidade em kW, e a vida útil de cada um dos quatro equipamentos necessários para o dimensionamento do sistema solar *off-grid*. Para concluir, os custos dos dispositivos assim como a sua substituição incluem o valor do produto somado ao valor do frete para a cidade de Manaus-AM.

Figura 21 - Parâmetros para adicionar um equipamento na simulação.

Cost			
Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Lifetime			
time (years):		<input type="text"/>	<input type="button" value="..."/>
More...			

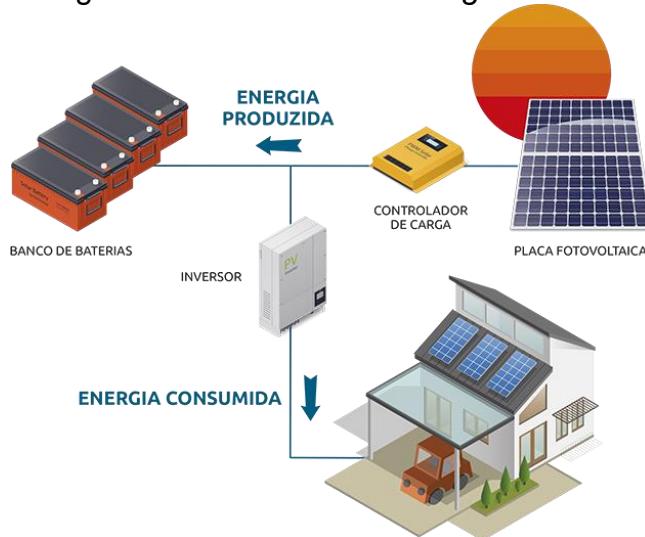
Fonte: HOMER PRO, 2024.

3.3.2.1 Dimensionamento de energia solar *off-grid*.

Para eletrificação através de energia solar *off-grid* é necessário a integração de 4 equipamentos, de acordo com a Figura 21, painel solar, inversor, bateria e controlador. O painel solar é responsável por captar a luz solar e convertê-la em energia elétrica, por meio da conversão fotovoltaica, em formato de corrente contínua. O inversor, por sua vez, é encarregado de converter a corrente contínua gerada pelos painéis em corrente alternada e, ajusta a tensão da corrente para os padrões dos dispositivos conectados. No que concerne à bateria, a mesma armazena energia gerada pelo painel para ser utilizada em momentos em que a geração solar é

insuficiente, como a noite, dias nublados ou chuvosos. Em relação ao controlador, ele é essencial para proteger as baterias contra sobrecarga ou descarga excessiva, regulando o fluxo de energia do painel solar para a bateria.

Figura 22 - Sistema solar off-grid.



Fonte: Fark Engenharia, 2024.

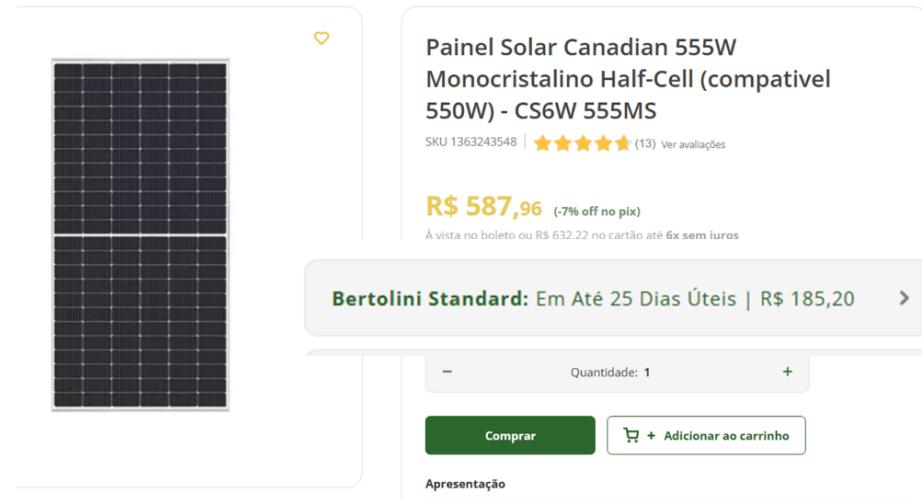
Dentre os critérios requeridos pelo HOMER PRO, o único relacionado a todos os aparelhos é o custo de manutenção. De acordo com a *Liberty Energy* (2021), o custo de manutenção de uma usina solar corresponde a 0,5% ao ano do valor total do investimento inicial. Por este motivo, para determinar o custo de manutenção de cada equipamento, foi realizada uma simulação no software, preenchendo todos os valores solicitados, exceto o custo de O&M (operação e manutenção). Com o custo inicial do sistema solar, obtido a partir da simulação, calculou-se 0,5% desse valor. Em seguida, o custo de manutenção foi alocado entre os 4 equipamentos, levando em consideração a porcentagem de contribuição de cada um ao custo total de manutenção. Com base nessa contribuição, o valor total de manutenção foi distribuído proporcionalmente entre os aparelhos.

- **Painel solar:**

Experimentalmente, ao pesquisar por painéis solares com uso para sistema off-grid, selecionou-se, no HOMER PRO, um painel genérico, atribuído das características do painel solar Canadian 555 W Monocristalino Half-Cell - CS6W

555MS da loja Minha Casa Solar, por ter um ótimo custo-benefício, resultando em um valor, com frete incluso, de R\$ 817,42, conforme mostra a Figura 23.

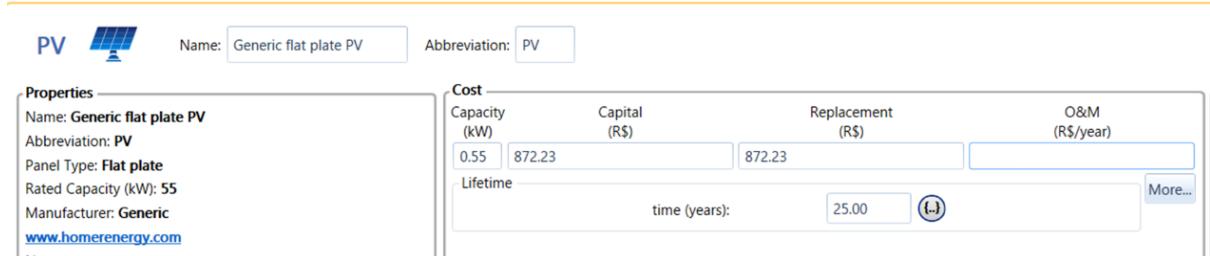
Figura 23 - Painel solar para simulação.



Fonte: Minha Casa Solar, 2024.

Assim sendo, agregou-se no *software*, conforme Figura 24 , a capacidade do painel (*Capacity*) de 555 W, o valor do custo (*Capital*) de R\$ 817,42 e a sua substituição (*Replacement*) R\$ 817,42, que nada mais é que o preço de um novo dispositivo. No que concerne ao custo de manutenção, conforme visto no tópico 3.3.2.1, será o último calculado pois é necessário realizar uma simulação com esta despesa em valor nulo. Por fim, de acordo com a WEG (2021), a vida útil dos painéis solares é, em média, de 25 a 30 anos, embora esse período possa variar dependendo de fatores como a qualidade do painel, as condições climáticas e os cuidados com a manutenção do sistema.

Figura 24 - Painel solar no HOMER PRO.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- **Bateria:**

De maneira análoga à busca do painel solar, pesquisou-se, empiricamente, por baterias para sistema *off-grid* com melhor custo-benefício e maior compatibilidade com o painel. Assim sendo, selecionou-se no HOMER PRO uma bateria de marca estrangeira tão semelhante quanto possível a bateria solar de lítio 100 Ah 4,8 kW 48 V Unipower – UPLFP48 da loja Minha Casa Solar, custeando no total R\$ 7.014,38, segundo exibido pela Figura 25.

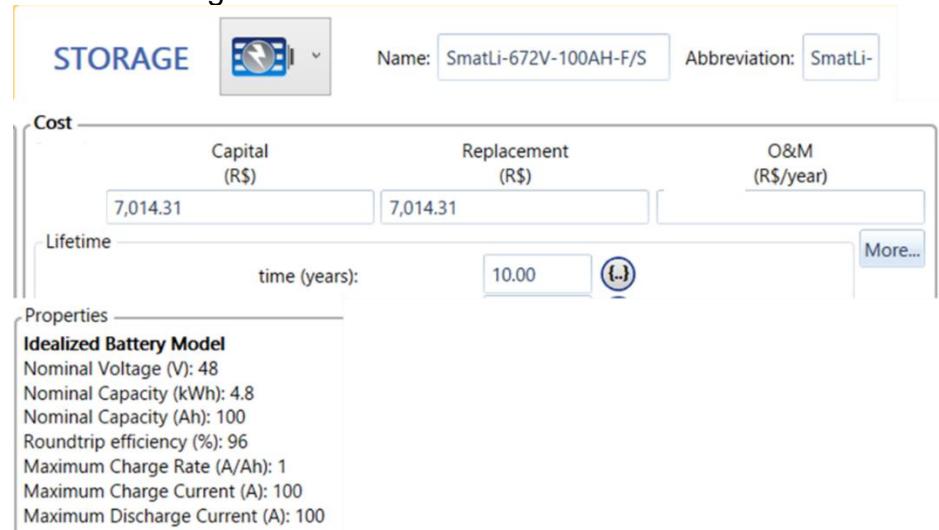
Figura 25 - Bateria solar para simulação.



Fonte: Minha Casa Solar, 2024.

Dessa forma, inseriu-se no *software*, conforme Figura 26, a capacidade (*Capacity*) de 4,8 kW, o valor do custo (*Capital*) de R\$ 7.014,38 e a sua substituição (*Replacement*) R\$ 7.014,38, que nada mais é que o preço de um novo dispositivo. No que concerne ao custo de manutenção, conforme visto no tópico 3.3.2.1, será o último calculado pois é necessário realizar uma simulação com esta despesa em valor nulo. Finalmente, segundo a SOLLED ENERGIA (2024), a vida útil das baterias solares é, em média, de 5 a 15 anos, dependendo de fatores como a qualidade do equipamento, o uso diário e a manutenção.

Figura 26 - Bateria solar no HOMER PRO.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- **Inversor:**

Ao mesmo passo do painel e da bateria solar, buscou-se um inversor com características que melhor atendesse o sistema no quesito de compatibilidade e custo. Dessa forma, optou-se por um inversor genérico no HOMER PRO atribuindo as características do inversor carregador solar 5 kW 48/220 V 100 A Unipower UNIPV5000 da loja Minha Casa Solar, totalizando em R\$ 5.032,57, de acordo com a Figura 27.

Figura 27 - Inversor para simulação.



Fonte: Minha Casa Solar, 2024.

Conforme INSOL ENERGIA (2024), o tempo de vida de um inversor gira em torno de 10 a 15 anos, dependendo das condições do ambiente e da incidência das

descargas atmosféricas. Dessa forma, inseriu-se os dados no software, com restrição do custo de manutenção, como mostra a Figura 28.

Figura 28 - Inversor no HOMER PRO.

Capacity (kW)	Capital (R\$)	Replacement (R\$)	O&M (R\$/year)
5	R\$5,032.57	R\$5,032.57	

Inverter Input
Lifetime (years): 15.00

Fonte: HOMER PRO, 2024.

- **Controlador:**

Analogamente aos outros equipamentos, analisou-se vários controladores para chegar ao melhor custo-benefício e maior combinação com todo o sistema solar. Visto isso, alocou-se um inversor comum no software, colocando as características do controlador de carga MPPT 60A 12/24/36/48V SRNE - ML4860N15 (Figura 29), resultando em R\$ 1.766,07 pois, no momento da pesquisa, o controlador estava em falta e por conseguinte não foi possível incluir o valor do frete.

Figura 29 - Controlador para simulação.



Fonte: Minha Casa Solar, 2024.

Baseando-se na NEOSOLAR (2021), o tempo de vida útil de um controlador de carga está entre 5 a 10 anos. Assim sendo, adicionou-se os valores no *software* (Figura 30), menos o custo de manutenção.

Figura 30 - Controlador no HOMER PRO.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Custo inicial para obtenção do valor de manutenção de cada componente:**

Após simular o dimensionamento de energia solar restringindo o custo de manutenção de cada componente, adquiriu-se um custo inicial de R\$ 360.772,04, como mostra a Figura 31.

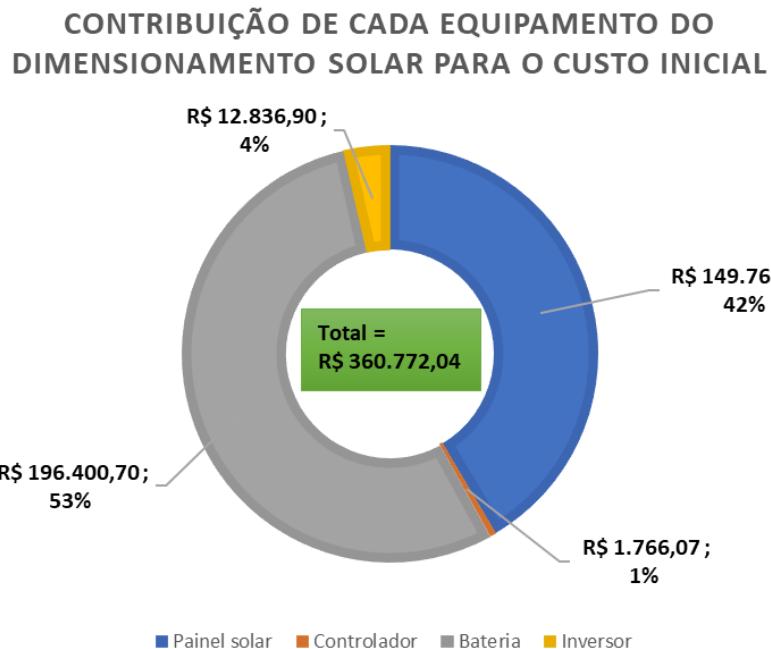
Figura 31 - Custo inicial do dimensionamento de energia solar.

Component	Capital (R\$)
► Generic flat plate PV	R\$149,768.37
► HOMER Load Following	R\$1,766.07
► SmatLi-672V-100AH-F/S	R\$196,400.70
► System Converter	R\$12,836.90
System	R\$360,772.04

Fonte: HOMER PRO, 2024.

Conforme dito anteriormente, o custo de manutenção anual de uma usina solar corresponde a 0,5% do investimento inicial. Dito isso, calculou-se 0,5% de R\$ 360.772,04, obtendo R\$ 1.803,86. Seguidamente, calculou-se a contribuição de cada equipamento em relação ao custo inicial, como ilustra o Gráfico 10.

Gráfico 10 - Contribuição de cada componente em relação ao custo total inicial.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A partir disso, racionou-se R\$ 1.803,86 proporcionalmente a contribuição de cada equipamento, em conformidade com a Tabela 1.

Tabela 1 - Custo de manutenção de cada equipamento da usina solar.

Equipamento	Custo total da manutenção	Contribuição de cada equipamento	Custo total manutenção x Contribuição cada equipamento
Painel solar	R\$ 1.803,36	42%	R\$ 757,41
Controlador	R\$ 1.803,36	1%	R\$ 18,03
Bateria	R\$ 1.803,36	53%	R\$ 955,78
Inversor	R\$ 1.803,36	4%	R\$ 72,13
Total		100%	R\$ 1.803,36

Fonte: Autoria própria, 2024.

O resultado da Tabela 1 condiz com o custo de manutenção anual da quantidade total de cada equipamento, ou seja, para o painel solar, o resultado R\$ 757,41 inclui a manutenção de todos os painéis. Todavia, o HOMER PRO necessita do custo de manutenção unitário. Por este motivo, com o resultado da simulação, foi calculada a quantidade de cada equipamento (painel solar, controlador, bateria e inversor) para designar o custo de manutenção unitário. Para tal, utilizou-se os dados da Figura 31 dividindo o valor total inicial de cada equipamento pelo valor unitário dos

mesmos. Dessa forma, resultaria na quantidade de equipamentos e, após isso, utilizar estes valores para descobrir o custo de manutenção unitário, como segue a Tabela 2.

Tabela 2 - Custo da manutenção unitária de cada equipamento da usina solar.

Equipamento	Custo total	Custo Unitário	Quantidade de equipamento (Custo total / custo unitário)	Custo total manutenção x Contribuição cada equipamento	Custo de manutenção unitário
Painel solar	R\$ 149.768,37	R\$ 872,23	172	R\$ 757,41	R\$ 4,41
Controlador	R\$ 1.766,07	R\$ 1.766,07	1	R\$ 18,03	R\$ 18,03
Bateria	R\$ 196.400,70	R\$ 7.014,31	28	R\$ 955,78	R\$ 34,14
Inversor	R\$ 12.836,90	R\$ 5.032,57	3	R\$ 72,13	R\$ 28,28

Fonte: Autoria própria, 2024.

Finalmente, com os custos de manutenção de cada equipamento do dimensionamento solar em mãos, colocou-se todos os dados necessários no software HOMER PRO, de acordo com a Figura 32.

Figura 32 - Alocamento dos componentes da usina solar no HOMER PRO.

The figure consists of four separate windows from the HOMER PRO software, each showing cost parameters for a specific component:

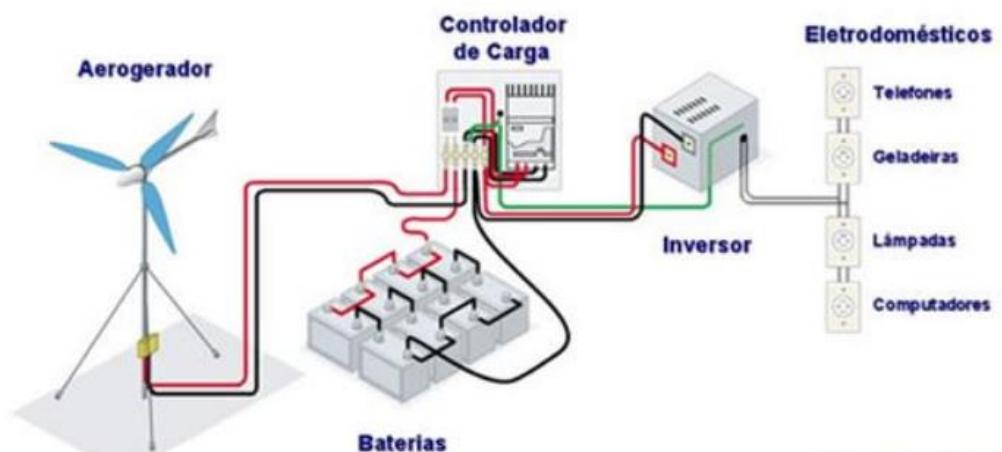
- CONTROLLER**: Shows Capital (R\$) 1,766.07, Replacement (R\$) 1,766.07, O&M (R\$/year) 18.03, Lifetime time (years) 10.00, and a More... button.
- PV SETUP**: Shows Capacity (kW) 0.55, Capital (R\$) 872.23, Replacement (R\$) 872.23, O&M (R\$/year) 4.41, Lifetime time (years) 25.00, and a More... button.
- STORAGE**: Shows Quantity 1, Capital (R\$) 7,014.31, Replacement (R\$) 7,014.31, O&M (R\$/year) 34.14, Lifetime time (years) 10.00, and a More... button.
- CONVERTER**: Shows Capacity (kW) 5, Capital (R\$) R\$5,032.57, Replacement (R\$) R\$5,032.57, O&M (R\$/year) R\$28.28, Lifetime (years) 15.00, and a More... button.

Fonte: HOMER PRO, 2024.

3.3.2.2 Dimensionamento de energia eólica *off-grid*.

Análogo ao dimensionamento solar *off-grid*, o sistema eólico necessita de inversor, bateria e controlador, conforme Figura 33. Contudo, o objeto que capta energia é o aerogerador (turbina eólica) que converte a energia cinética do vento em energia elétrica.

Figura 33 - Configuração de um sistema eólico isolado.



Fonte: CRESESB, 2005.

Diante disso, realizou-se uma pesquisa para identificar uma turbina eólica compatível com os componentes do sistema solar que pudessem ser integrados ao sistema eólico. Foi essencial selecionar uma turbina capaz de gerar energia a partir de uma velocidade do vento de 2 m/s, conforme indicado na Figura 20, que apresenta a velocidade média anual dos ventos na comunidade de Santo Antônio. Para a simulação no software HOMER PRO, foi configurada uma turbina eólica genérica com as características do modelo HUIZHITENGDA 3000W (Figura 34) com tensão nominal AC de 48V, agora eliminando a necessidade de inversor, ao custo de R\$ 6.617,61 (frete incluso). De acordo com as especificações do fabricante disponíveis no site do vendedor, essa turbina opera a partir de ventos de 2 m/s. Além disso, considerando a estimativa da Enel Green Power (2020), que aponta uma vida útil média de 30 anos para turbinas eólicas, e o período de projeto definido em 25 anos (Figura 16), optou-se por utilizar o mesmo período de 25 anos para a vida útil da turbina na simulação.

Figura 34 - Turbina eólica para simulação.



Entrega para Josekson
Manaus, AM, Brasil
[Adicionar instruções de entrega](#)

Confirmar pedido

Ao fazer seu pedido, você concorda com as [Condições de Uso](#) da Amazon. Por favor verifique a [Notificação de Privacidade](#), [Notificação de Cookies](#) e a [Notificação de Anúncios Baseados em Interesse](#).

Itens:	R\$ 6.822,28
Frete e manuseio:	R\$ 0,00
Total:	R\$ 6.822,28
Promoção aplicada:	-R\$ 204,67

Total do pedido: R\$ 6.617,61
[Em 1x de R\\$ 6.617,61 sem juros Alterar](#)

Descrição do produto

ESPECIFICAÇÕES:

Marca: HUIZHITENGDA
 Cores das lâminas: Branco
 Quantidade das lâminas: 3 lâminas
 Tensão nominal (AC): 12V/ 24V/ 48V/ 220V
 Poder avaliado (W): 3000W
 Diâmetro do rotor das lâminas (m): 0.55m
 Altura das lâminas (m): 0.75m
 Peso do conjunto do produto (quilograma): <12KG
Velocidade do vento iniciada (m/s): 2 m/s
 Velocidade do vento de corte (m/s): 3 m/s
 Velocidade do vento (m/s): 10 m/s
 Velocidade segura do vento (m/s): 40m/s
 material: Liga de alumínio galvanizada
 Gerador: Motor permanente trifásico da suspensão do ímã
 Sistema de controlo: Electromagnet
 Altura da montagem (m): 2-12m
 Categoria da proteção do gerador: IP54
 Altitude: 4500m
 Proteção da velocidade excessiva: Sobrecarga eletromagnética do freio
 proteção: Freio eletromagnético e a unidade de descarregamento

Lista de Pacotes:

1 x turbina eólica
 3 x Lâmina
 1 x disco de flange
 1 x junta
 1 x controlador
 1 x kit de fixação

Fonte: *Amazon, 2024.*

No que diz respeito ao custo de manutenção do sistema eólico, será reutilizado os valores encontrados no dimensionamento do sistema solar para os equipamentos que também são utilizados em um sistema eólico. Agora, a respeito da turbina eólica, baseou-se em um exemplo encontrado no site da SIGMAEARTH (2024), onde diz que a manutenção de uma turbina de 2MW custa, em média, US \$ 4.200,00. Isto posto,

trabalhou-se em uma regra de três para estimar o custo de uma turbina de 3 kW. Assim:

$$x = \left(\frac{3 \times 10^3 \times 42000}{2 \times 10^6} \right) = 63,00$$

Com isso, fez-se uma conversão direta de dólares para o real brasileiro que, por sua vez, em 2024, US\$1,00 dólar é equivalente a R\$ 5,9730 reais. Portanto, o custo de manutenção da turbina eólica HUIZHITENGDA (3000W) é de R\$ 376,30 reais, condizente com a Figura 35.

Figura 35 - Turbina eólica no HOMER PRO.

Costs			
Quantity	Capital (R\$)	Replacement (R\$)	O&M (R\$/year)
1	R\$6,822.28	R\$6,822.28	R\$376.30

Lifetime (years): 25.00

Fonte: HOMER PRO, 2024.

3.3.3 Gerador a diesel da própria comunidade Santo Antônio

Tal como dito no tópico 3.1.1, a comunidade de Santo Antônio possui um gerador a diesel de 15 kVA que retém energia elétrica durante 3 horas para os moradores da região. Em razão disso, será incluído os dados deste gerador no software com o objetivo de aproveitar a geração de energia presente no local e para que o mesmo tenha uma melhor otimização na simulação. Para tal fim, foi selecionado no software um gerador de 15 kVA da marca Generac (Figura 36), em razão do desconhecimento da marca e modelo do gerador de Santo Antônio. Desse modo, foi encontrado um fornecedor da cidade de Manaus, através da loja Generac Brasil (<https://generacbrasil.com.br/produtos/geradores-diesel/15-800-kva/>), com o mesmo

gerador, cujo preço dito pelo vendedor foi de R\$ 52.125,00, posteriormente selecionado no HOMER PRO. Vale ressaltar que, devido a comunidade já possuir um gerador, o valor em *Initial Capital* no software será nulo, possuindo apenas o valor de substituição (*Replacement*).

Figura 36 - Gerador para simulação.



Fonte: Generac Brasil, 2024

De acordo com o site TORRE DE ILUMINAÇÃO (2024), um gerador pode durar entre 10 a 30 anos, dependendo do cuidado e da manutenção. Em virtude disso, foi escolhido um tempo de vida útil de 15 anos.

Quanto ao custo de manutenção, referenciou-se em 3 trabalhos. O primeiro, de VASSOLER (2023), aponta que, para sua situação, o custo de manutenção de um gerador a diesel de 505 kVA (MULTI-500LK) é de R\$ 4.857,80 por semestre. Já o segundo trabalho diz que um gerador de 500 kVA (CNY400) contém um custo estimado em R\$ 4.251,67 a cada seis meses, conforme análise realizada em um estudo técnico-financeiro sobre sua implementação em horários de ponta em um hospital de Curitiba (NOCERA; GOMES; PEREIRA, 2015). Finalmente, o terceiro trabalho indica que o custo estipulado para seu gerador a diesel de 40 kVA (GWP-4022S) é de R\$ 608,92 (FRAGOSO; STELLA, 2018).

A partir dos valores obtidos de cada um dos 3 trabalhos, criou-se uma regra de 3, de cada trabalho, para estimar o custo de manutenção de um motor de 15 kVA. Ao final, calculou-se uma média dos três resultados. Desta maneira:

- Comparação do gerador de 505 kVA com o de 15 kVA:

$$x_1 = \left(\frac{15 \times 10^3 \times 4857,8}{505 \times 10^3} \right) = 144,3$$

- Comparação do gerador de 500 kVA com o de 15 kVA:

$$x_2 = \left(\frac{15 \times 10^3 \times 4251,67}{500 \times 10^3} \right) = 127,55$$

- Comparação do gerador de 40 kVA com o de 15 kVA:

$$x_3 = \left(\frac{15 \times 10^3 \times 608,92}{40 \times 10^3} \right) = 228,34$$

- Média das comparações:

$$M = \frac{144,3 + 127,55 + 228,34}{2} = 166,73$$

Segundo a Generac Brasil (2024), a manutenção do gerador a diesel deve ser feita a cada 6 meses. Dado que o tempo de vida do gerador foi determinado como 15 anos (180 meses), ao longo de 180 meses serão feitas 30 manutenções. Por conseguinte, o total gasto com manutenção durante 15 anos será de R\$ 5.001,90. Visto que o HOMER PRO pede o custo da manutenção do gerador na unidade de preço por hora, dividiu-se R\$ 5.001,9 por 12.9600 horas (equivalente a 15 anos), adquirindo 0,04 R\$/h. Finalizando com último requisito do gerador, fundamentado na Petrobrás (2024), o preço médio do diesel no Amazonas é de R\$ 6,7. Sendo assim, foi feita a inserção no software, em concordância com a Figura 37.

Figura 37 - Gerador no HOMER PRO.

The screenshot shows the 'Generator Cost' section of the HOMER PRO software. It includes input fields for Initial Capital, Replacement, O&M, Fuel Price, and Lifetime. The 'Lifetime (Hours)' field is highlighted with a cursor.

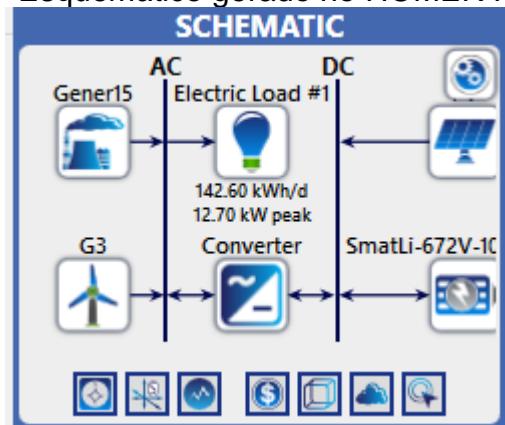
Generator Cost	
Initial Capital (R\$):	0.00
Replacement (R\$):	52,125.00
O&M (R\$/op. hour):	0.040
Fuel Price (R\$/L):	6.7
Lifetime (Hours):	15.00

Fonte: HOMER PRO, 2024.

4 RESULTADOS

Depois da inserção dos dados necessários para a simulação da eletrificação da comunidade de Santo Antônio, utilizando uma ou mais fontes renováveis de energia, os resultados obtidos são apresentados a seguir. Vale destacar que a turbina eólica já gera energia em AC, portanto não é necessário o uso de inversor, segundo a Figura 38.

Figura 38 - Esquemático gerado no HOMER PRO.

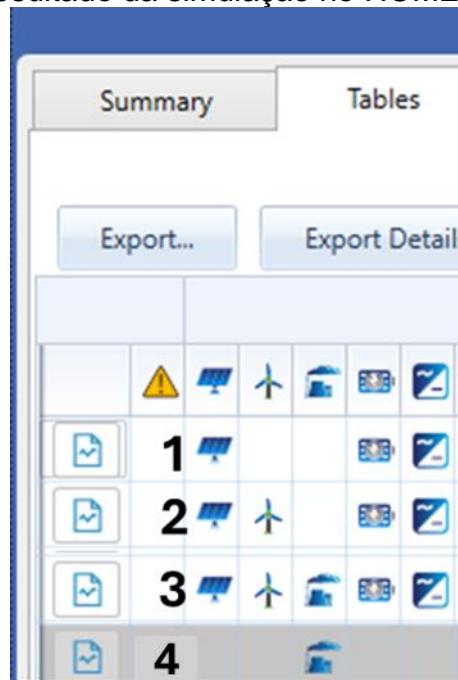


Fonte: HOMER PRO, 2024.

A respeito das simulações geradas pelo *software*, a Figura 39 destaca 4 resultados. A primeira aborda a eletrificação da comunidade de Santo Antônio utilizando apenas o sistema solar. A segunda simulação considera a combinação de duas fontes de energia: solar e eólica. A terceira emprega o sistema solar em conjunto com a turbina eólica e o gerador a diesel já existente na comunidade. Por fim, a última revela utilizar apenas o gerador a diesel existente na comunidade para geração de energia.

É relevante apontar que o HOMER Pro não considerou a eletrificação da comunidade utilizando apenas energia eólica, devido à baixa velocidade média do vento na região, que é insuficiente para a operação eficiente de aerogeradores. Segundo Automaxx Windmill (2024), velocidades inferiores a 3,3 m/s não atendem aos requisitos mínimos para o funcionamento adequado de turbinas eólicas. Além disso, seriam necessárias torres extremamente altas para alcançar velocidades de vento satisfatórias, o que tornaria o projeto inviável.

Figura 39 - Resultado da simulação no HOMER PRO.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Neste capítulo, será dissertado sobre cada simulação usando as informações fornecidas do software (HOMER ENERGY, 2024), tal como exibe a Figura 40:

- Resumo de custos (*Cost Summary*):

Mostra um resumo dos custos totais do sistema, incluindo o *Net Present Cost* (NPC), Custo de Capital Inicial, Custo de Operação e Manutenção, e outros custos ao longo do ciclo de vida do projeto.

- Fluxo de caixa (*Cash Flow*):

Exibe o fluxo de caixa ao longo do tempo, detalhando os custos de investimento inicial, manutenção e substituição de componentes.

- Elétrica (*Electrical*):

Mostra os dados relacionados à geração, consumo e demanda de energia elétrica no sistema. Inclui gráficos de carga e geração.

- Equipamentos utilizados na simulação:

Exibe os detalhes dos equipamentos utilizados na simulação.

- Emissões (*Emissions*):

Mostra as emissões de gases de efeito estufa associadas ao sistema, detalhando a contribuição de cada componente (como geradores a diesel) e a redução obtida com renováveis.

Figura 40 - Detalhes da simulação no HOMER PRO.

Cost Summary Cash Flow Compare Economics Electrical SmatLi-672V-100AH-F/S Generic flat plate PV System Converter Emissions

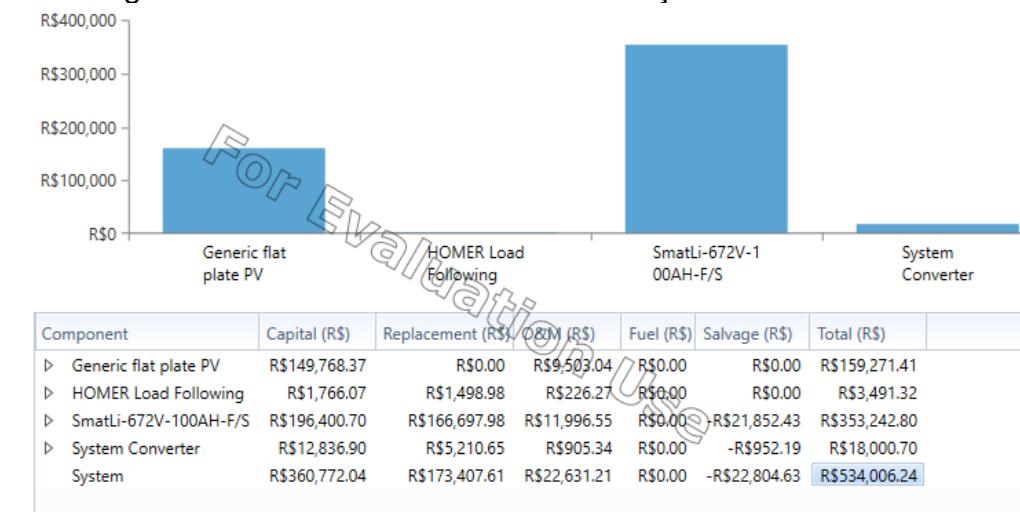
Fonte: HOMER PRO, 2024.

4.1 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO APENAS SISTEMA SOLAR.

- Resumo de custos (*Cost Summary*):

De acordo com a Figura 41, os painéis solares têm um custo de capital inicial de R\$ 149.768,37, sem custos de reposição, e um custo total de R\$ 159.271,41, considerando despesas de operação e manutenção. O sistema de controle apresenta um custo inicial de R\$ 1.766,07, com custos adicionais que resultam em um total de R\$ 3.491,32. As baterias são o componente mais oneroso, com um custo de capital inicial de R\$ 196.400,70, reposições de R\$ 166.697,96 e um custo total de R\$ 353.242,80. Já o conversor possui um custo inicial de R\$ 12.836,90, reposições de R\$ 5.210,65 e totaliza R\$ 18.000,70 ao longo do tempo. No geral, o custo total do sistema soma R\$ 534.006,24, incluindo capital inicial, substituições e manutenção, evidenciando que as baterias representam o maior impacto financeiro, enquanto os outros componentes apresentam custos mais equilibrados.

Figura 41 - Resumo de custo da simulação 1.

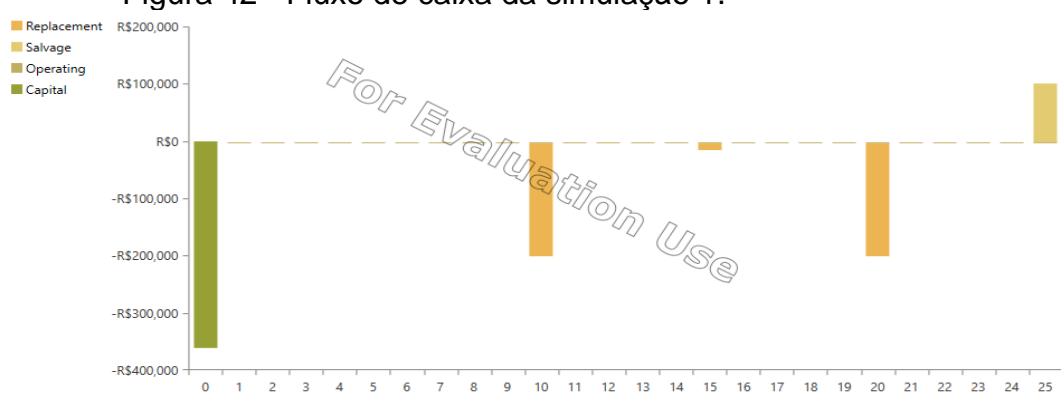


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Fluxo de caixa (*Cash Flow*):

Conforme a Figura 42, há um investimento inicial significativo em capital, representado pela barra verde, indicando o custo inicial do sistema. Nos anos 10 e 20, as barras laranjas mostram os custos de reposição, associados à substituição de componentes como baterias e outros itens com vida útil limitada. Ao final do período, no ano 25, a barra amarela representa o salvamento, que reflete o valor residual dos componentes que ainda possuem utilidade, compensando parcialmente os custos totais do projeto. Durante o período, os custos operacionais recorrentes não apresentam destaque significativo, sugerindo que a maior parte das despesas está concentrada no investimento inicial e nas reposições, enquanto o salvamento contribui para reduzir o impacto financeiro.

Figura 42 - Fluxo de caixa da simulação 1.

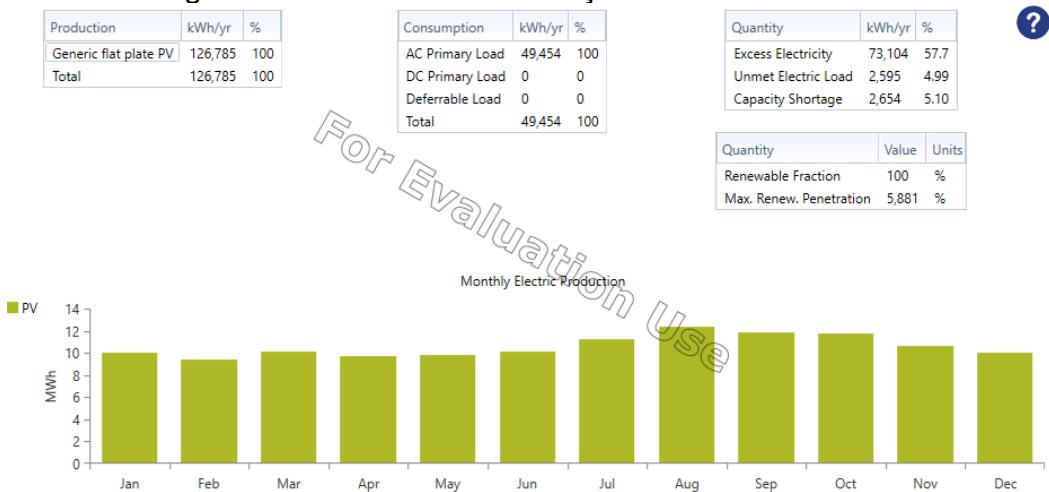


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Elétrica (*Electrical*):

De acordo com a Figura 43, a produção total alcança 126.785 kWh, enquanto o consumo registrado é de 49.454 kWh. Dessa forma, observa-se um excedente de eletricidade de 73.104 kWh, equivalente a 57,7% da energia gerada, revelando que o HOMER PRO calculou que é mais barato elevar a quantidade de painéis solares do que investir em mais baterias. Além disso, há uma carga não atendida de 2.595 kWh, o que corresponde a 4,99% do consumo total, juntamente com um déficit de capacidade de 5,10%. Com uma fração renovável de 100% e uma penetração máxima de renováveis de 5.881%, o sistema se destaca por ser totalmente dependente de energia solar. Por fim, o gráfico mensal da figura revela uma produção consistente ao longo do ano, sem grandes variações sazonais, evidenciando a estabilidade da geração solar na região.

Figura 43 – Elétrica da simulação 1.



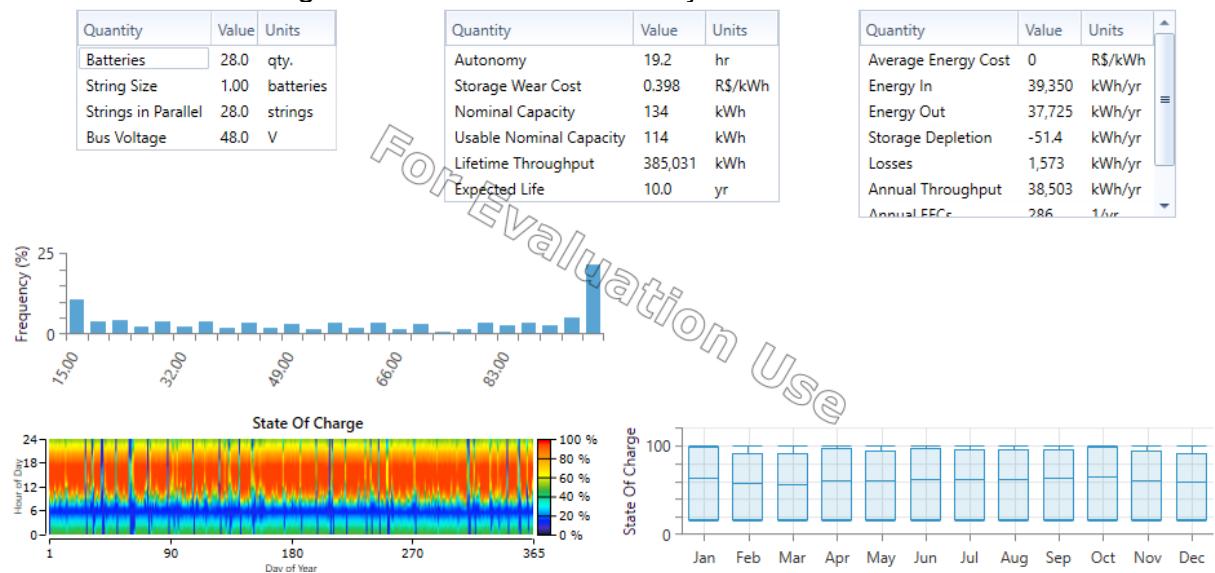
Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Equipamentos utilizados na simulação:

De acordo com a Figura 44, a análise anual das baterias do sistema, composto por 28 unidades conectadas em paralelo com uma tensão de 48 V. O sistema oferece autonomia média de 19,2 horas, com uma capacidade nominal de 134 kWh, sendo 114 kWh utilizáveis, e uma vida útil esperada de 10 anos. A energia recebida pelas baterias é de 39.350 kWh/ano, enquanto a energia fornecida é de 37.725 kWh/ano, com perdas de 1.573 kWh/ano. O estado de carga varia entre 20% e 100%, mostrando

estabilidade no uso, enquanto a frequência de altos níveis de carga reforça a eficiência do armazenamento. Esses resultados destacam a confiabilidade e o bom desempenho do sistema.

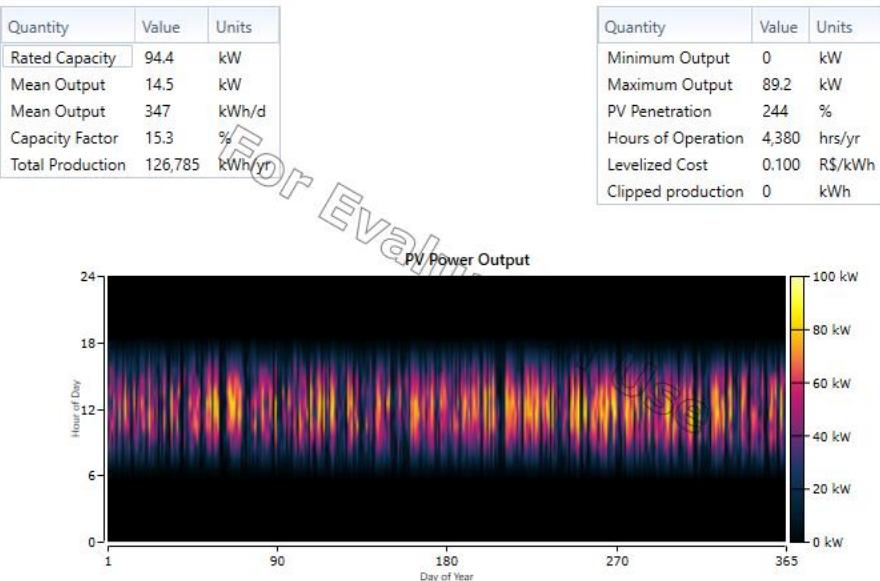
Figura 44 - Bateria da simulação 1.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Por sua parte, os painéis solares, de acordo com a Figura 45, apresentam uma produção média diária de 347 kWh, resultando em uma geração total de 126.785 kWh ao longo do ano. O fator de capacidade, de 15,3%, reflete o aproveitamento da irradiação solar, com a produção variando entre 0 kW, em períodos de baixa irradiação, e 89,2 kW, nos momentos de pico. Além disso, a penetração fotovoltaica atinge 244%, com 4.380 horas anuais de operação, evidenciando o potencial do sistema em suprir as demandas energéticas de maneira sustentável. O custo nivelado de energia, de apenas R\$ 0,10 por kWh, aliado à ausência de perdas por recorte de produção, reforça a viabilidade econômica do projeto. Por fim, o gráfico da figura ilustra uma geração estável ao longo do ano, com picos recorrentes próximos ao limite máximo da capacidade.

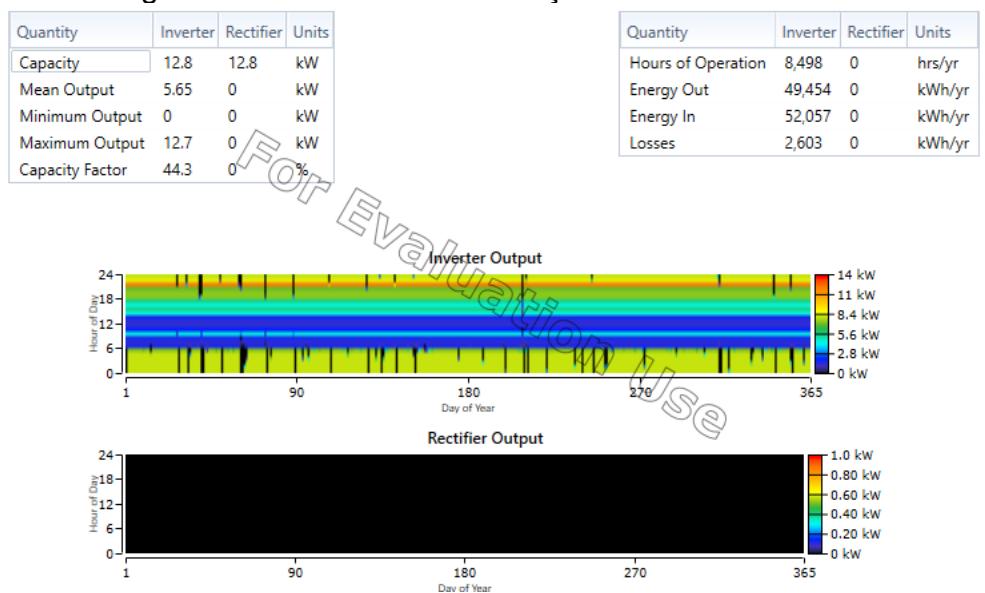
Figura 45 - Painel solar da simulação 1.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Por seu turno, o inversor, de acordo com a Figura 46, possui capacidade nominal de 12,8 kW, opera com uma produção média de 5,65 kW, atingindo uma saída máxima de 12,7 kW e um fator de capacidade de 44,3%. Com 8.498 horas de operação anuais, processa 52.057 kWh de energia de entrada, entregando 49.454 kWh de energia de saída e registrando perdas de 2.603 kWh. O gráfico do inversor da figura mostra uma operação consistente, com variações ao longo dos dias e do ano.

Figura 46 – Inversor da simulação 1.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Emissões (*Emissions*):

De acordo com a Figura 47, o sistema opera com emissões zero de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados, material particulado, dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Essa ausência total de poluentes evidencia a pureza ambiental do projeto.

Figura 47 - Emissões da simulação 1.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	0	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

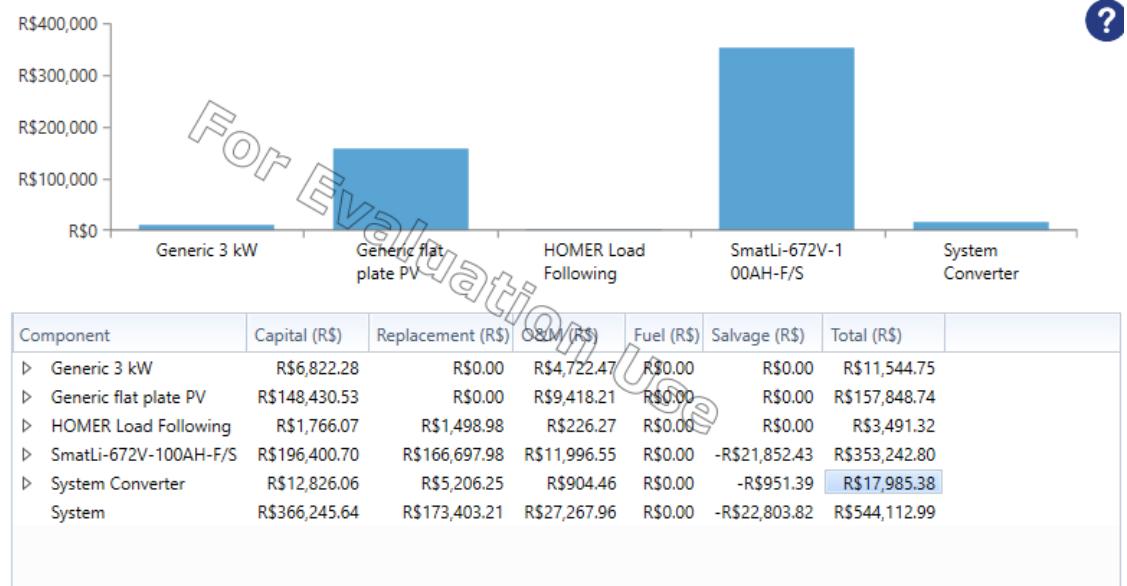
Fonte: HOMER PRO, 2024.

4.2 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO UMA COMBINAÇÃO DE DUAS FONTES DE ENERGIA: SOLAR E EÓLICA

- Resumo de custos (*Cost Summary*):

Conforme a Figura 48, o banco de baterias, com um custo total de R\$ 353.242,80, representa o maior impacto financeiro, seguido pelos painéis solares, que possuem um custo total de R\$ 157.848,74, incluindo R\$ 148.450,53 de capital e R\$ 9.418,21 de operação e manutenção. O sistema de controle apresenta um custo total de R\$ 3.491,32, enquanto o conversor, com R\$ 17.985,38, tem custos significativos de reposição, somando R\$ 5.206,25. Por outro lado, o gerador tem um custo total de R\$ 11.144,75, com destaque para R\$ 4.722,47 de operação e manutenção. No geral, o custo total do sistema é de R\$ 544.112,99, refletindo o investimento em capital inicial, reposições e manutenção, com a maior parte dos gastos concentrada no armazenamento e na geração solar.

Figura 48 - Resumo de custo da simulação 2.

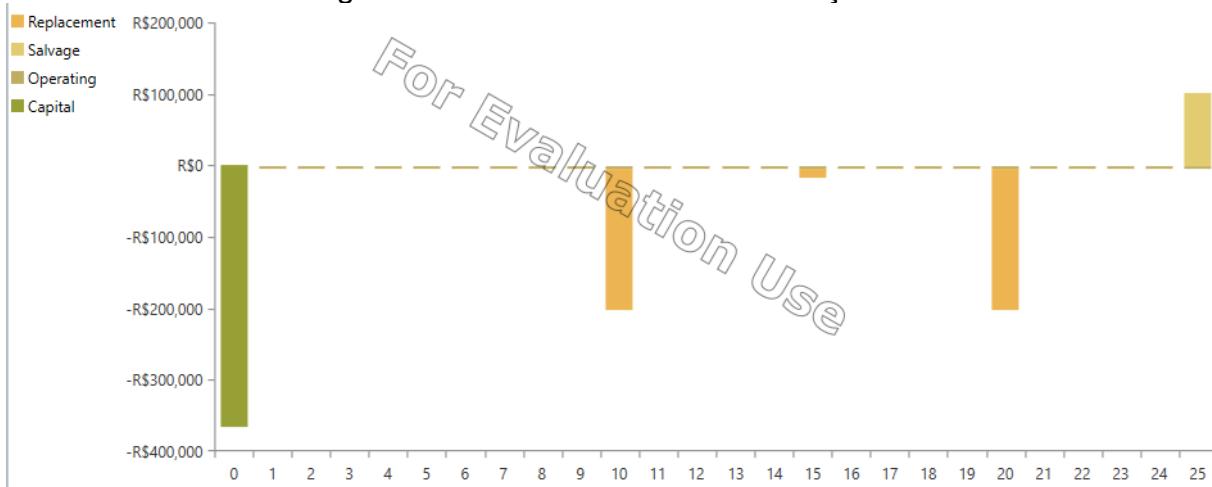


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Fluxo de caixa (Cash Flow):

De acordo com a Figura 49, ilustra-se os custos e receitas ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema. No início do período (ano 0), observa-se um investimento inicial significativo em capital, representado pela barra verde, com valor próximo a R\$ 400.000. Nos anos 10 e 20, aparecem barras amarelas indicando custos de reposição substanciais, evidenciando a necessidade de substituição de componentes críticos. Por outro lado, ao final do período (ano 25), há uma barra amarela positiva, correspondente ao salvamento, que reflete o valor residual dos componentes ainda utilizáveis. A análise demonstra que os principais custos estão concentrados no início e nos momentos de reposição, enquanto o salvamento proporciona um retorno parcial ao término do horizonte de análise.

Figura 49 - Fluxo de caixa da simulação 2.

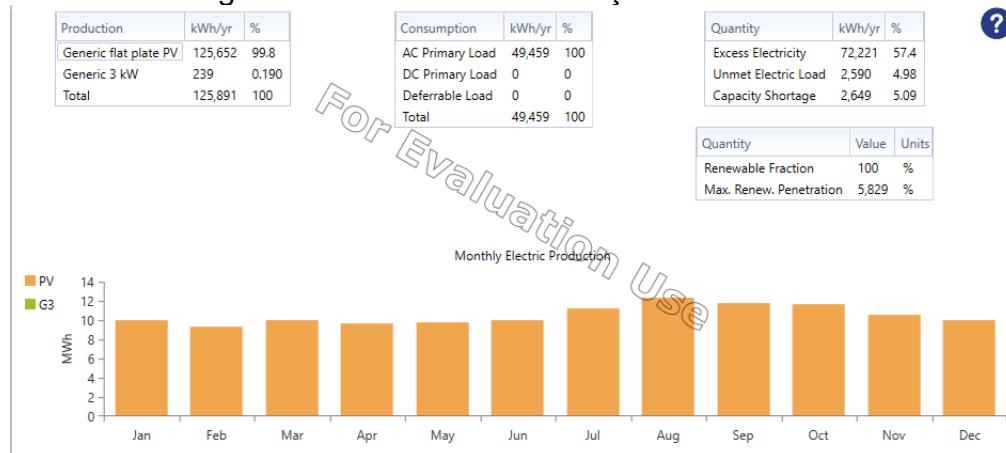


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Elétrica (*Electrical*):

De acordo com a Figura 50, a análise de produção e consumo de energia do sistema ao longo de um ano. A geração total é de 125.891 kWh, com a maior parte proveniente dos painéis solares (125.652 kWh, representando 99,8%), enquanto o gerador contribui com apenas 239 kWh. O consumo anual é de 49.459 kWh, sendo todo destinado a cargas em corrente alternada. Apesar disso, o sistema registra um excedente de eletricidade de 72.221 kWh, correspondente a 57,4% da produção, além de uma carga não atendida de 2.590 kWh, equivalente a 4,98%, e um déficit de capacidade de 5,09%. A fração renovável é de 100%, indicando que toda a energia consumida é de fontes limpas, enquanto o gráfico mensal da figura revela uma produção estável ao longo do ano, sem grandes variações sazonais. Esses dados destacam a sustentabilidade do sistema e, embora apontem para um potencial superdimensionamento da geração solar, isto, na verdade indica que o software calculou que é mais viável economicamente investir em mais painéis solares do que em baterias devido a diferença de preço. Além disso, a velocidade do vento disponível na região desfavorece o uso da turbina eólica.

Figura 50 - Elétrica da simulação 2.

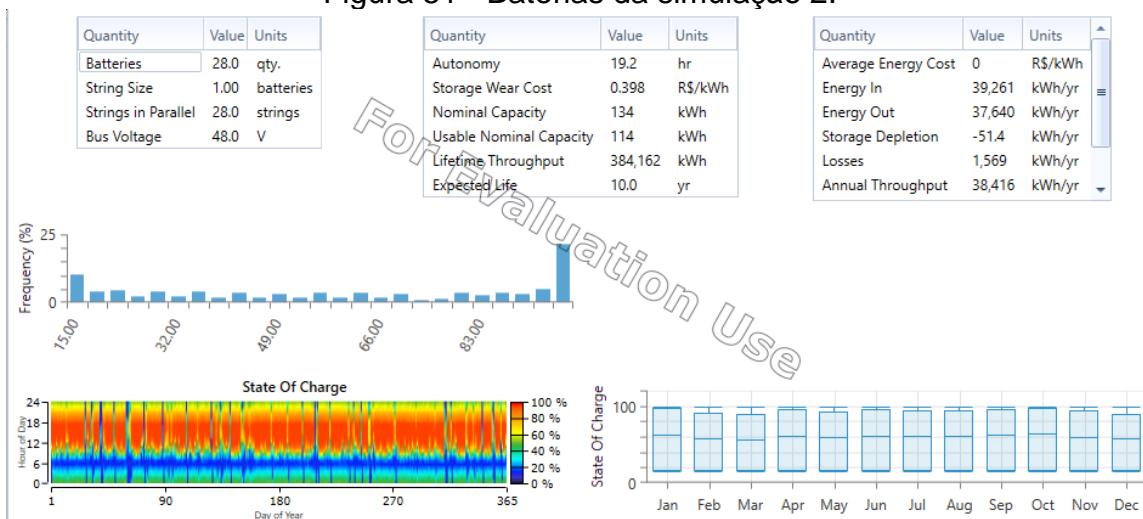


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Equipamentos utilizados na simulação:

Conforme a Figura 51, apresenta o desempenho do banco de baterias do sistema, composto por 28 unidades conectadas em paralelo, com uma tensão de 48 V e uma autonomia média de 19,2 horas. A capacidade nominal total é de 134 kWh, sendo 114 kWh utilizáveis, com um *throughput* anual de 38.416 kWh e uma vida útil esperada de 10 anos. A energia armazenada é de 39.261 kWh/ano, com uma saída de 37.640 kWh/ano e perdas de 1.569 kWh/ano. O custo médio do desgaste do armazenamento é de R\$ 0,398/kWh, enquanto o estado de carga varia predominantemente entre 80% e 100%, conforme mostrado nos gráficos da figura, indicando um gerenciamento eficiente da energia.

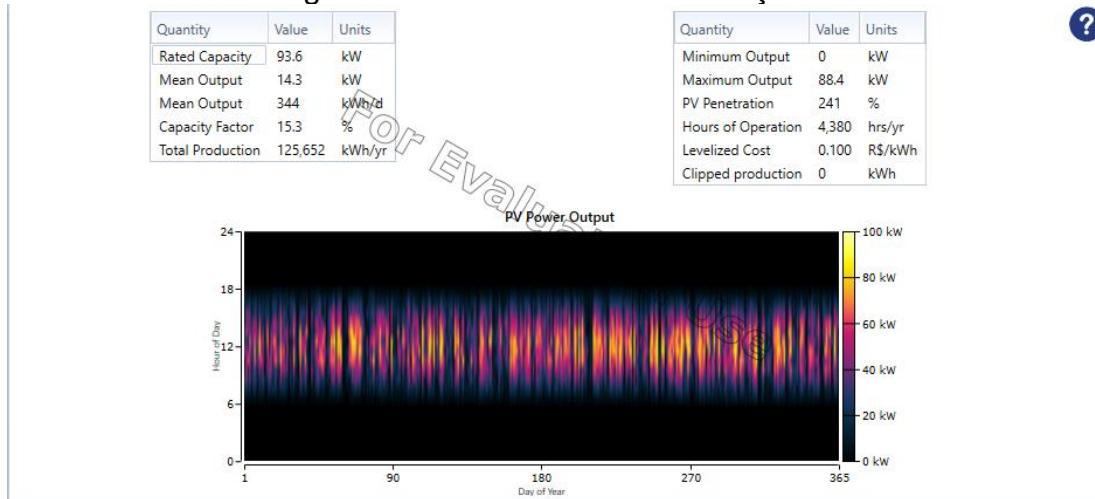
Figura 51 - Baterias da simulação 2.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Por sua parte, os painéis solares, de acordo com Figura 52, possuem uma capacidade nominal de 93,6 kW e uma produção total de 125.652 kWh. A saída média diária é de 344 kWh, com uma potência média de 14,3 kW e um fator de capacidade de 15,3%. A geração varia entre 0 kW, nos períodos sem irradiação, e atinge um pico de 88,4 kW. Com uma penetração fotovoltaica de 241% e 4.380 horas de operação anuais, o sistema demonstra alta eficiência e estabilidade. O custo nivelado da energia é de R\$ 0,10/kWh, e não há registros de energia perdida por recorte. O gráfico da figura destaca a consistência na geração ao longo do ano, com variações esperadas que refletem as condições sazonais de irradiação solar.

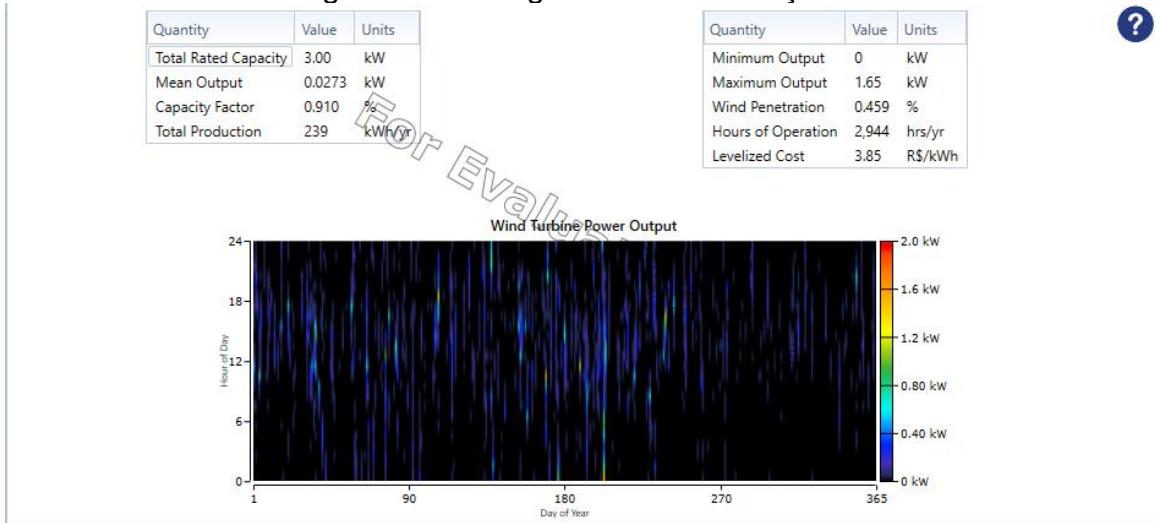
Figura 52 - Painel solar da simulação 2.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

A turbina eólica que não depende do inversor pois já geram energia em corrente alternada, de acordo com a Figura 53, possui uma capacidade nominal de 3 kW, mas apresenta uma produção total de apenas 239 kWh, com uma média de 0,0273 kW e um fator de capacidade de 0,91%. A potência varia entre 0 kW, nos períodos sem vento, e atinge um máximo de 1,65 kW. A penetração eólica é de 0,459%, com 2.944 horas de operação ao longo do ano, refletindo baixa contribuição para o sistema. O custo nivelado de energia gerada é de R\$ 3,85/kWh. O gráfico da figura mostra uma produção esporádica e instável, evidenciando que as condições de vento na região não são favoráveis para um desempenho eficiente da turbina.

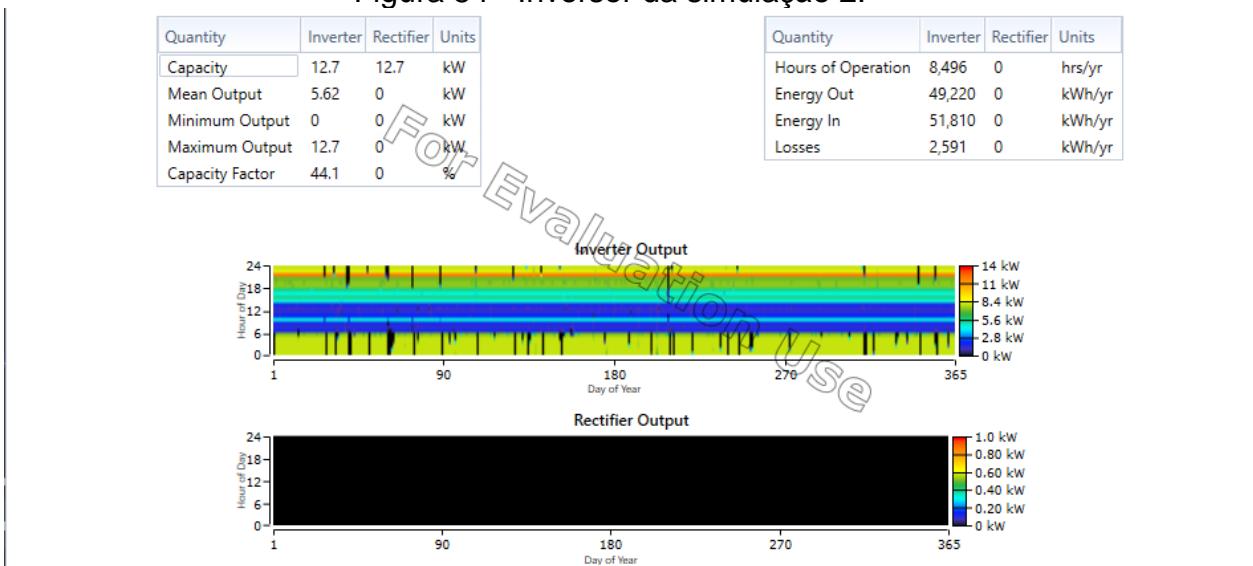
Figura 53 - Aerogerador de simulação 2.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

O inversor, conforme a Figura 54, possui capacidade nominal de 12,7 kW, opera com uma potência média de 5,62 kW e atinge um máximo de 12,7 kW, resultando em um fator de capacidade de 44,1%. Ele permanece ativo por 8.496 horas ao longo do ano, processando 51.810 kWh de energia de entrada e entregando 49.220 kWh de energia de saída, com perdas registradas em 2.591 kWh. Ademais, o gráfico da figura demonstra uma operação consistente do inversor ao longo dos dias e meses.

Figura 54 - Inversor da simulação 2.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Emissões (*Emissions*):

De acordo com a Figura 55, o sistema híbrido solar-eólico alcança uma marca de emissões zero para todos os poluentes analisados, incluindo dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados, material particulado, dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Figura 55 - Emissões da simulação 2.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	0	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	0	kg/yr
Nitrogen Oxides	0	kg/yr

Fonte: HOMER PRO, 2024.

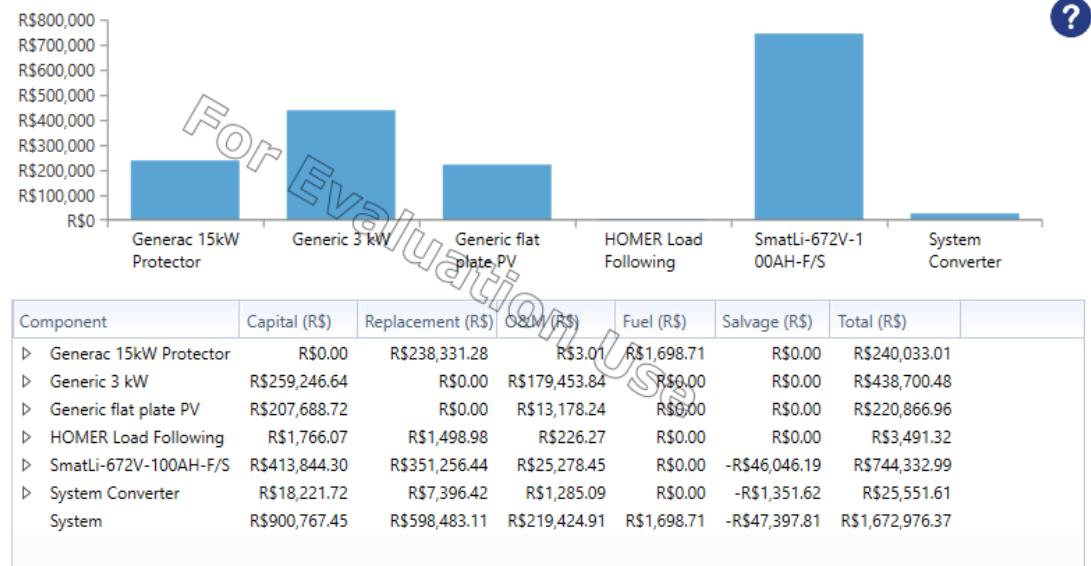
4.3 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO A PARTIR DE SISTEMA SOLAR EM CONJUNTO COM TURBINA EÓLICA E O GERADOR A DIESEL EXISTENTE NA COMUNIDADE.

- Resumo de custos (*Cost Summary*):

De acordo com a Figura 56, O banco de baterias é o item de maior impacto financeiro, com um custo total de R\$ 744.332,99, considerando R\$ 413.344,80 de capital e R\$ 351.256,44 de reposições, parcialmente compensado por um salvamento negativo de R\$ 46.046,19. Os painéis solares apresentam um custo total de R\$ 220.866,96, com R\$ 207.688,72 investidos em capital e R\$ 13.178,24 em manutenção. O gerador de 3 kW possui um custo total de R\$ 438.700,48, com destaque para R\$ 259.246,64 de capital e R\$ 179.453,84 de reposições. O conversor soma R\$ 25.551,61 em custos totais, enquanto o sistema de controle *HOMER Load Following*

tem impacto financeiro reduzido, totalizando R\$ 3.491,32. No geral, o sistema completo acumula um custo total de R\$ 1.672.976,37, refletindo investimentos, manutenção e substituições ao longo do período avaliado.

Figura 56 – Resumo de custo da simulação 3.

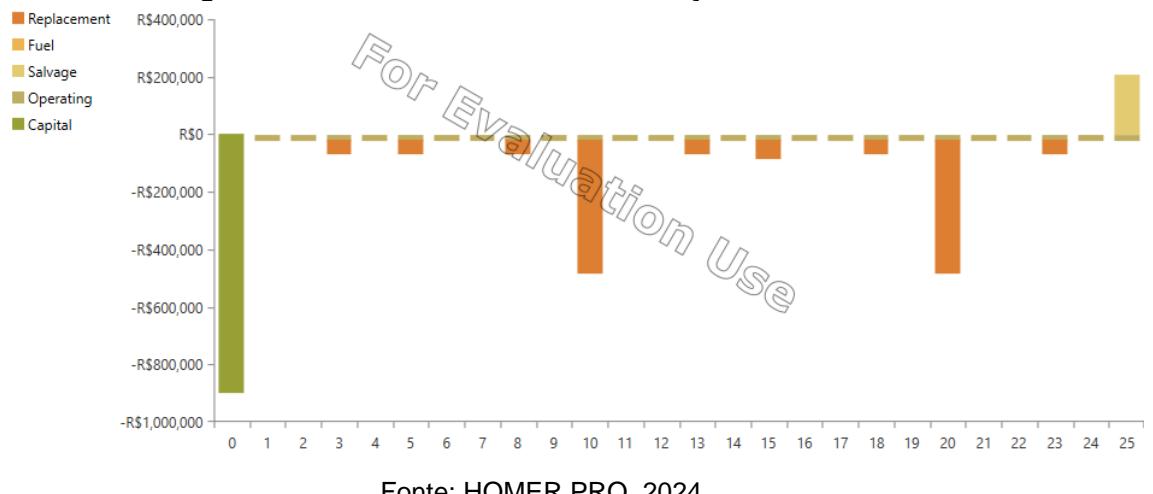


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Fluxo de caixa (Cash Flow):

A Figura 57 destaca que, no início do período, existe um alto investimento em capital, representado pela barra verde, próximo de R\$ 1.000.000, indicando o custo inicial do sistema. Nos anos 10 e 20, aparecem barras laranjas expressivas, evidenciando custos significativos com reposições de componentes. Ao final do período, no ano 25, há uma barra amarela positiva, representando o salvamento, que reflete o valor residual dos equipamentos ainda utilizáveis. Custos operacionais e com combustível são registrados de forma moderada e constante ao longo do período, enquanto os principais desembolsos estão concentrados no investimento inicial e nos ciclos de reposição. O salvamento final contribui para reduzir o impacto financeiro do sistema ao término do horizonte de análise.

Figura 57 - Fluxo de caixa da simulação 3.

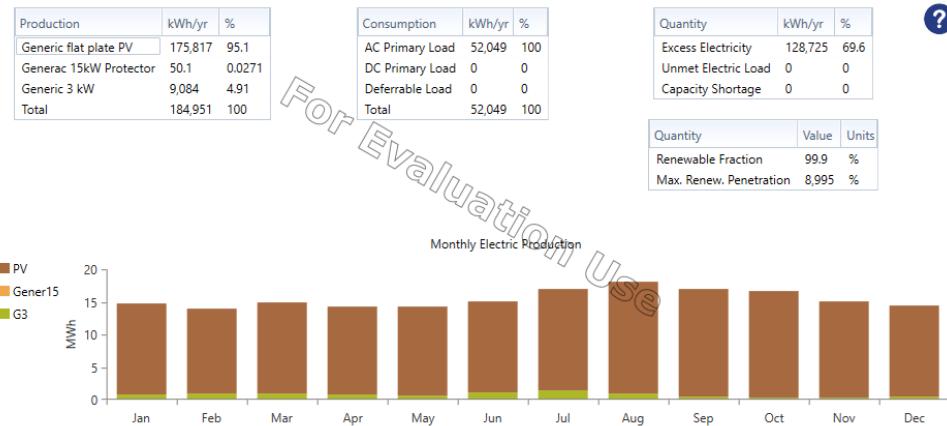


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Elétrica (*Electrical*):

A Figura 58 apresenta a análise anual de produção e consumo de energia no sistema, que gera um total de 184.951 kWh. A maior parte da produção vem dos painéis solares, responsáveis por 175.817 kWh (95,1%), seguidos pelo gerador de 3 kW com 9.084 kWh (4,91%), enquanto o gerador de 15 kW contribui com apenas 50,1 kWh. O consumo anual é de 52.049 kWh, totalmente destinado a cargas de corrente alternada, sem déficits ou cargas não atendidas. Contudo, há um excedente significativo de 128.725 kWh, equivalente a 69,6% da energia gerada. O sistema apresenta uma fração renovável de 99,9% e uma penetração máxima de renováveis de 8.995%. O gráfico mensal da figura demonstra uma produção estável ao longo do ano, com os painéis solares predominando e o gerador de 3 kW atuando em momentos específicos. Esses resultados destacam a eficiência da geração solar, embora o alto excedente sugira possibilidades de otimização no uso da energia produzida.

Figura 58 - Elétrica da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Equipamentos utilizados na simulação:

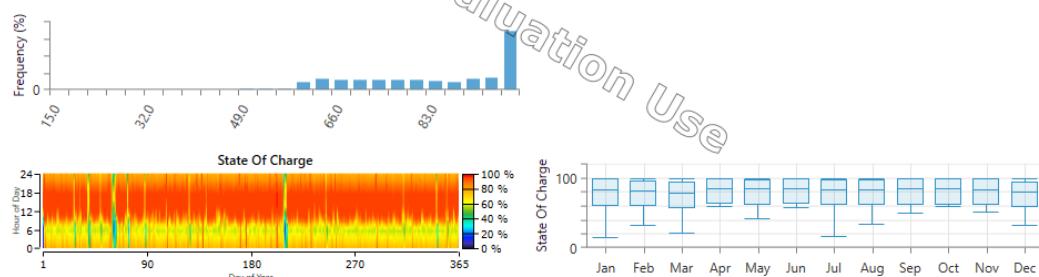
A Figura 59 apresenta o banco de baterias, composto por 59 unidades conectadas em paralelo, com tensão de 48 V e autonomia média de 40,5 horas. A capacidade nominal total é de 283 kWh, sendo 241 kWh utilizáveis, e o *throughput* anual registrado é de 37.837 kWh, com uma vida útil esperada de 10 anos. As baterias processam 38.800 kWh de energia ao longo do ano, entregando 37.072 kWh, com perdas de 1.548 kWh e uma depleção de armazenamento de -180 kWh. O custo médio de desgaste do armazenamento é de R\$ 0,398/kWh. O gráfico de estado de carga revela uma operação predominantemente entre 80% e 100%, indicando eficiência no uso das baterias, enquanto a frequência de carga destaca sua estabilidade ao longo do ano.

Figura 59 - Bateria da simulação 3.

Quantity	Value	Units
Batteries	59.0	qty.
String Size	1.00	batteries
Strings in Parallel	59.0	strings
Bus Voltage	48.0	V

Quantity	Value	Units
Autonomy	40.5	hr
Storage Wear Cost	0.398	R\$/kWh
Nominal Capacity	283	kWh
Usable Nominal Capacity	241	kWh
Lifetime Throughput	378,366	kWh
Expected Life	10.0	yr

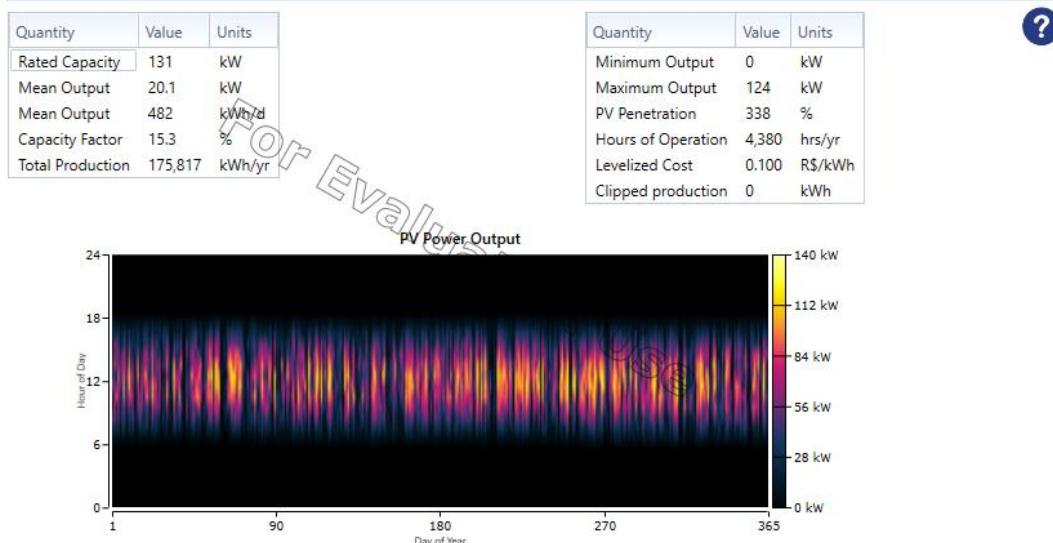
Quantity	Value	Units
Average Energy Cost	0	R\$/kWh
Energy In	38,800	kWh/yr
Energy Out	37,072	kWh/yr
Storage Depletion	-180	kWh/yr
Losses	1,548	kWh/yr
Annual Throughput	37,837	kWh/yr



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Por sua vez, os painéis solares, de acordo com Figura 60, possuem uma capacidade nominal de 131 kW e uma produção total de 175.817 kWh. A produção média diária é de 482 kWh, com uma saída média de 20,1 kW e um fator de capacidade de 15,3%. A potência gerada varia entre 0 kW, nos momentos de menor irradiação, e atinge um máximo de 124 kW. O sistema opera por 4.380 horas ao longo do ano, com uma penetração fotovoltaica de 338%. Não há registros de energia perdida por recorte, e o custo nivelado da energia gerada é de R\$ 0,10/kWh.

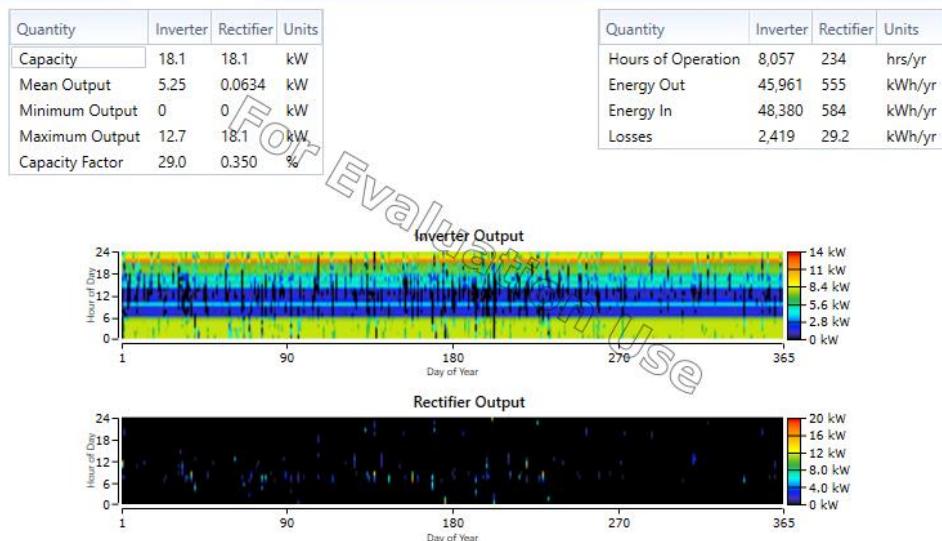
Figura 60 - Painel solar da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

O inversor, por sua parte, conforme Figura 61, possui capacidade nominal de 18,1 kW, registra uma produção média de 5,25 kW, alcançando um pico de 12,7 kW, e opera por 8.057 horas ao longo do ano, com um fator de capacidade de 29%. Ele processa 48.380 kWh de energia de entrada, entregando 45.961 kWh de saída, com perdas de 2.419 kWh.

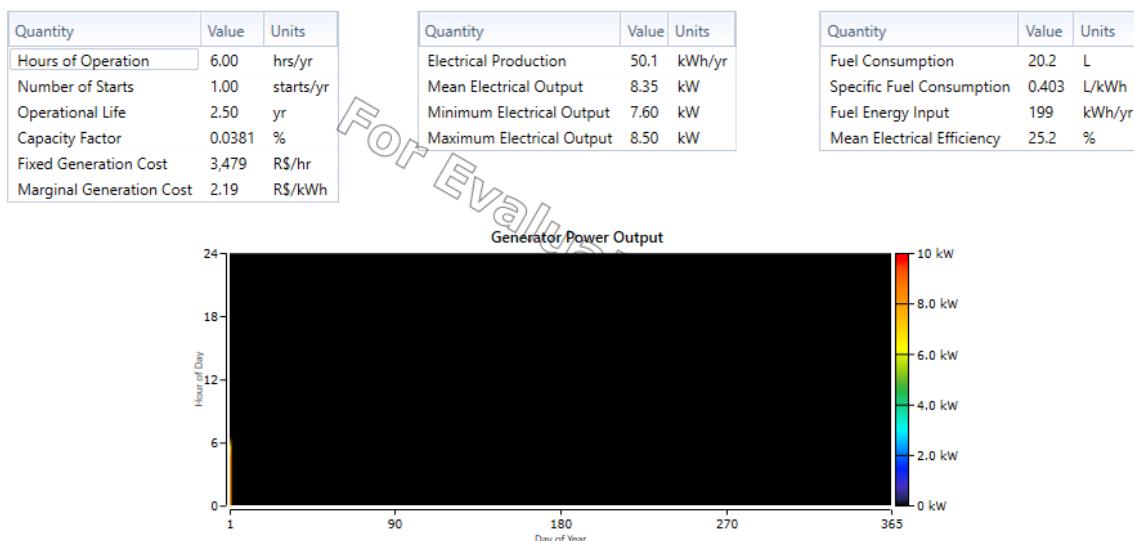
Figura 61 - Inversor da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

A respeito da simulação sobre o gerador a diesel, a Figura 62 demonstra que com apenas 6 horas de operação ao longo do ano, o mesmo possui uma produção elétrica total de 50,1 kWh, com uma saída média de 8,35 kW e um pico de 8,50 kW, além de um fator de capacidade de 0,0381%. O consumo total de combustível é de 20,2 litros, com um consumo específico de 0,403 litros por kWh e uma eficiência elétrica média de 25,2%. O custo fixo de geração é de R\$ 3,479 por hora, enquanto o custo marginal é de R\$ 2,19 por kWh.

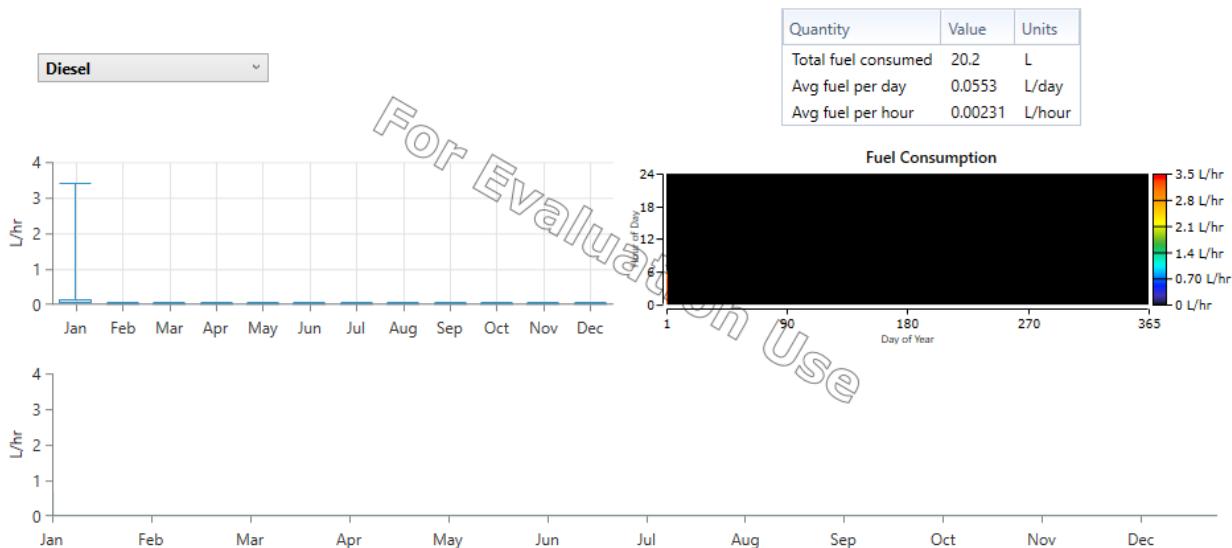
Figura 62 - Gerador a diesel da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Ademais, a Figura 63 relata que o total de diesel consumido foi de 20,2 litros, com uma média diária de 0,0553 litros e um consumo médio por hora de 0,00231 litros. O gráfico da figura demonstra que o consumo ocorre de forma esporádica, com uso concentrado em momentos específicos, principalmente no início do ano, enquanto o restante do período apresenta atividade praticamente inexistente.

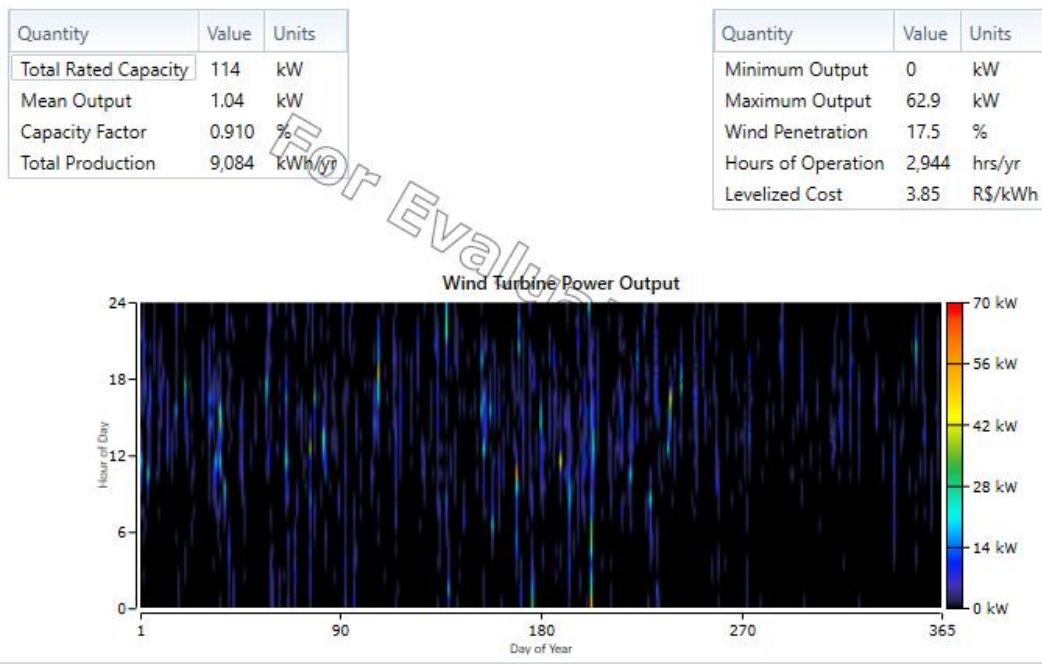
Figura 63 - Resumo do custo com combustível da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Por fim, a turbina eólica que não depende do inversor pois já geram energia em corrente alternada, de acordo com a Figura 64, possui uma capacidade total de 114 kW e uma produção total de 9.084 kWh. A saída média registrada é de 1,04 kW, com um fator de capacidade de 0,91%, indicando baixa eficiência no uso do recurso eólico. A potência máxima alcançada foi de 62,9 kW, enquanto a mínima permaneceu em 0 kW. O sistema operou por 2.944 horas ao longo do ano, com uma penetração eólica de 17,5% e um custo nivelado de R\$ 3,85 por kWh.

Figura 64 - Turbina eólica da simulação 3.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Emissões (*Emissions*):

Como mostra a Figura 65, o dióxido de carbono é o principal poluente emitido, com 52,8 kg/ano, seguido por óxidos de nitrogênio, que totalizam 0,407 kg/ano. Outras emissões incluem monóxido de carbono (0,358 kg/ano), dióxido de enxofre (0,129 kg/ano), matéria particulada (0,0217 kg/ano) e hidrocarbonetos não queimados (0,0145 kg/ano). Esses valores indicam que, embora as emissões sejam baixas, devido ao uso limitado do gerador, ele ainda contribui com poluentes atmosféricos.

Figura 65 - Emissões da simulação 3.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	52.8	kg/yr
Carbon Monoxide	0.358	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0.0145	kg/yr
Particulate Matter	0.0217	kg/yr
Sulfur Dioxide	0.129	kg/yr
Nitrogen Oxides	0.407	kg/yr

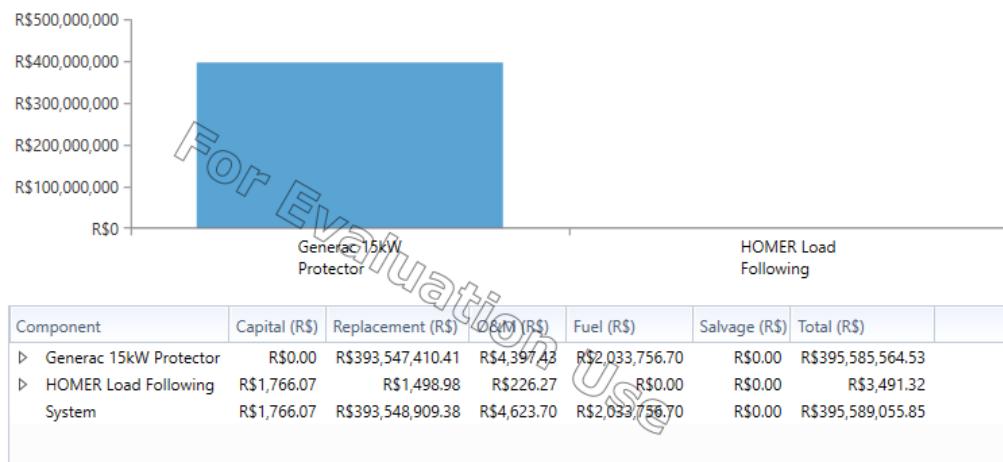
Fonte: HOMER PRO, 2024.

4.4 ELETRIFICAÇÃO DA COMUNIDADE DE SANTO ANTÔNIO UTILIZANDO GERADOR A DIESEL DE 15 KVA

- Resumo de custos (*Cost Summary*):

Conforme a Figura 66, mostra-se que o gerador de 15 kW representa o maior impacto financeiro, com um custo total de R\$ 395.585.564,53. Esse valor é majoritariamente composto por R\$ 393.547.410,41 em reposições e R\$ 2.033.756,70 em combustível, enquanto os custos operacionais somam R\$ 4.397,43. O sistema de controle *HOMER Load Following* contribui com um total de R\$ 3.491,32, sendo R\$ 1.498,98 referentes a reposições e R\$ 226,27 de custos operacionais. No geral, o sistema totaliza R\$ 395.589.055,85, evidenciando o impacto significativo das reposições e do consumo de combustível no custo acumulado ao longo do tempo.

Figura 66 - Resumo de custo da simulação 4.

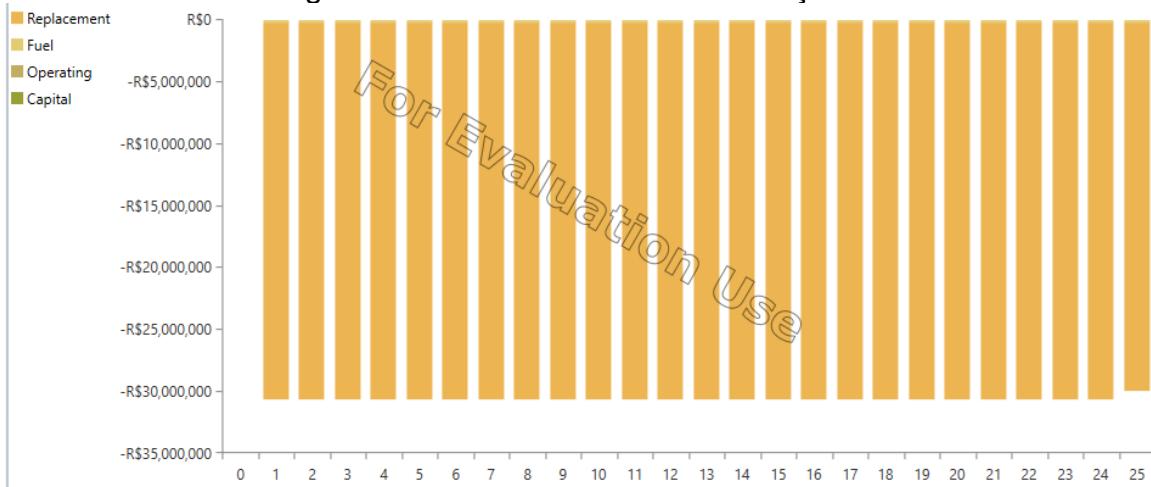


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Fluxo de caixa (Cash Flow):

A Figura 67 mostra que ao longo de 25 anos, as despesas com reposição são predominantes em relação a outros componentes financeiros. Os valores negativos constantes refletem um gasto significativo e regular com reposições, sem variação notável ao longo dos anos, enquanto os custos com capital e operação não são destacados visualmente. Essa configuração demonstra que o sistema está fortemente impactado pelo alto custo de manutenção e reposição de equipamentos ao longo do tempo.

Figura 67 - Fluxo de caixa da simulação 4.

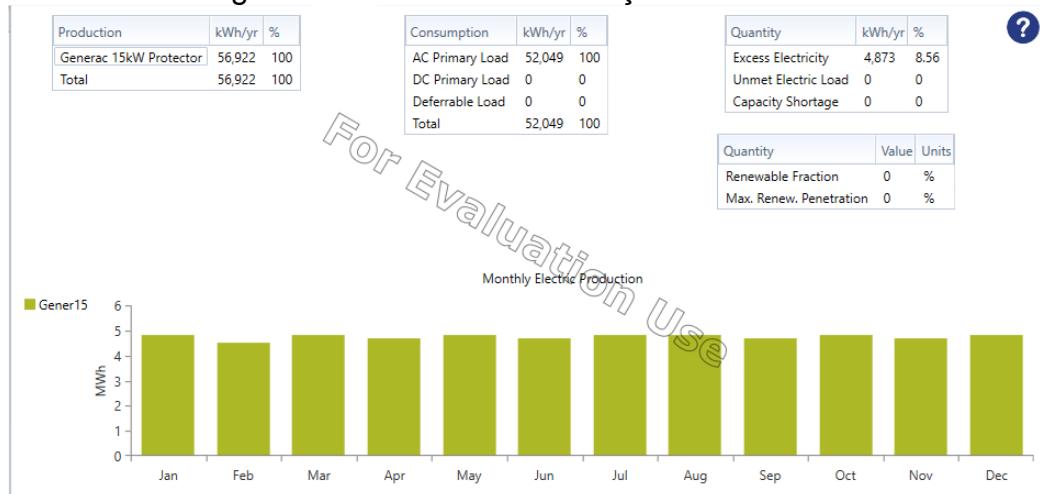


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Elétrica (*Electrical*):

Como exibe a Figura 68, a geração de energia do sistema utilizando o gerador de 15 kW, responsável por produzir 56.922 kWh/ano, suprindo integralmente a carga primária de 52.049 kWh/ano. Apesar da eficiência em atender à demanda, houve um excedente de 4.873 kWh, representando 8,56% do total produzido. O gráfico mensal revela uma produção constante ao longo do ano, sem variações significativas. O sistema não apresenta participação de fontes renováveis, com uma fração renovável de 0% e sem penetração máxima renovável, indicando total dependência do gerador para atender ao consumo elétrico.

Figura 68 - Elétrica da simulação 4.

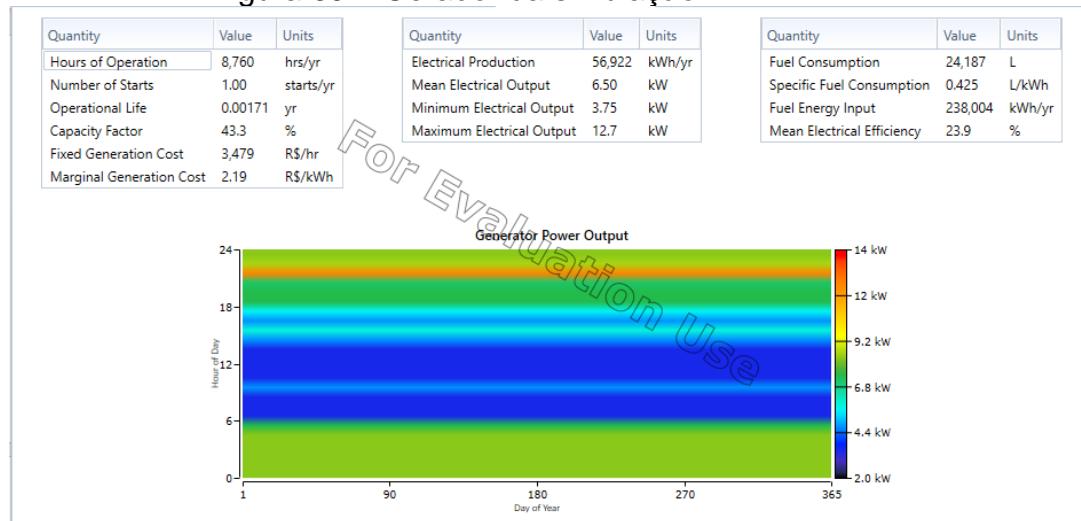


Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Equipamentos utilizados na simulação:

No que concerne ao gerador a diesel, a Figura 69 apresenta que o mesmo opera durante 8.760 horas por ano, entregando uma produção elétrica total de 56.922 kWh/ano. O valor médio de produção elétrica é de 6,50 kW, com uma faixa que varia entre 3,75 kW e 12,7 kW, conforme evidenciado no gráfico da figura. O consumo de combustível foi de 24.187 litros, resultando em uma eficiência elétrica média de 23,9%, enquanto o custo marginal de geração foi de 2,19 R\$/kWh.

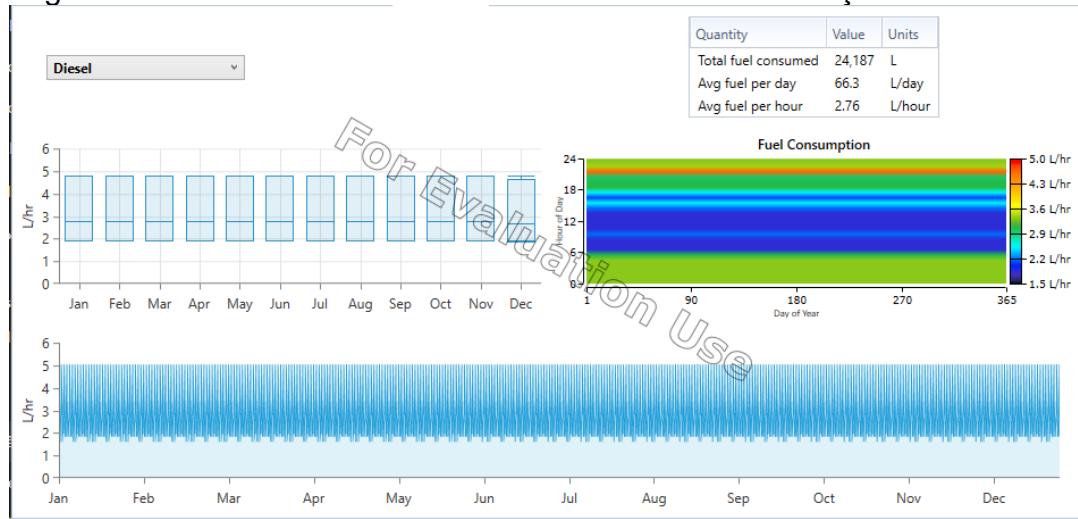
Figura 69 – Gerador da simulação 4.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

Ainda sobre o gerador, de acordo com a Figura 70, o consumo de combustível totalizou 24.187 litros ao longo do ano. O consumo médio diário foi de 66,3 litros, enquanto o consumo por hora alcançou 2,76 litros.

Figura 70 - Análise do consumo de combustível da simulação 4.



Fonte: HOMER PRO, 2024.

- Emissões (*Emissions*):

Por fim, a análise de emissões, conforme a Figura 71, exibe a liberação de 63.266 kg de dióxido de carbono, acompanhada por 429 kg de monóxido de carbono. Outras emissões incluem 17,4 kg de hidrocarbonetos não queimados, 26 kg de material particulado, 155 kg de dióxido de enxofre e 488 kg de óxidos de nitrogênio. Esses dados refletem o impacto ambiental gerado pelo funcionamento do sistema, evidenciando a quantidade significativa de gases poluentes emitidos ao longo do ano.

Figura 71 - Emissões da simulação 4.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	63,266	kg/yr
Carbon Monoxide	429	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	17.4	kg/yr
Particulate Matter	26.0	kg/yr
Sulfur Dioxide	155	kg/yr
Nitrogen Oxides	488	kg/yr

Fonte: HOMER PRO, 2024.

4.5 OUTROS CUSTOS

Todos os dados levantados para a eletrificação da comunidade de Santo Antônio foram considerados incluindo a entrega de materiais na cidade de Manaus-AM. No entanto, é necessário avaliar os custos logísticos no trajeto entre Manaus e Santo Antônio sobre a entrega de materiais, como painéis solares, e produtos, como o diesel. Além disso, devem ser contemplados, em Santo Antônio, os seguintes aspectos: readequação da rede elétrica de baixa tensão (cabos e mão de obra), instalação dos painéis solares, conexão à rede elétrica, reforma da casa de força e adequação das residências, incluindo a instalação de medidores de energia.

Os custos mencionados não são calculados pelo software HOMER PRO. Para estimar essas despesas, foram utilizados dados coletados de uma empreiteira que realizou um serviço de engenharia na comunidade Santa Helena do Inglês, no primeiro semestre de 2021. As informações apresentadas na Tabela 3 foram adaptadas para estimar os gastos semelhantes na comunidade de Santo Antônio.

Tabela 3 - Custo conforme empreiteira que executou serviço de engenharia em Santa Helena do Inglês.

Categoria	Valor
Logística	R\$ 26.000,00
Readequação da rede elétrica	R\$ 62.000,00
Instalações dos painéis	R\$ 98.900,00
Alimentação da rede	R\$ 31.900,00
Reforma da casa de força	R\$ 21.900,00
Instalação de um contador de energia em cada residência	R\$ 37.800,00

Fonte: Autoria própria, 2024.

- Custo logístico de Manaus até Santo Antônio:

Para descobrir a distância de Santo Antônio até Manaus, buscou-se um guia turístico que, por sua vez, destacou que a distância é de 103 km indo de barco. E, de acordo com a Fundação Amazônia Sustentável (2024), Santa Helena do Inglês encontra-se 64 km distante de Manaus.

Posto isso, fez-se uma regra de três para estimar o custo logístico de Santo Antônio. Assim:

$$x = \left(\frac{103 \times 10^3 \times 26000}{64 \times 10^3} \right) = R\$ 41.843,75$$

- Readequação da rede elétrica e instalação dos painéis:
De acordo com o manual do HOMER PRO (2024), os gastos com instalação, materiais e mão de obra, já são inclusos no CAPEX (investimento inicial).
- Alimentação da rede elétrica:
Segundo a empreiteira, o custo de alimentação da rede elétrica é fixo, ou seja, o valor de R\$ 31.900,00 permanece.
- Reforma da casa de força:
A reforma da casa de força, conforme a empreiteira, também não sofre alterações, isto é, permanecendo o custo de R\$ 21.900,00
- Instalação de um contador de energia para cada residência:
Com o objetivo de estimar o gasto total de contadores instalados em cada residência na comunidade de Santo Antônio, fez-se uma regra de 3 comparando o número de casas em Santa Helena do Inglês e seu valor total correspondente, com o número de residências em Santo Antônio. Segundo a Fundação Amazônia Sustentável (2024), existe 30 famílias em Santa Helena. Assim sendo, foi atribuído para Santa Helena 30 unidades consumidoras de energia elétrica. Por outro lado, em Santo Antônio, conforme o 3.1.1, existem 23 unidades consumidoras.

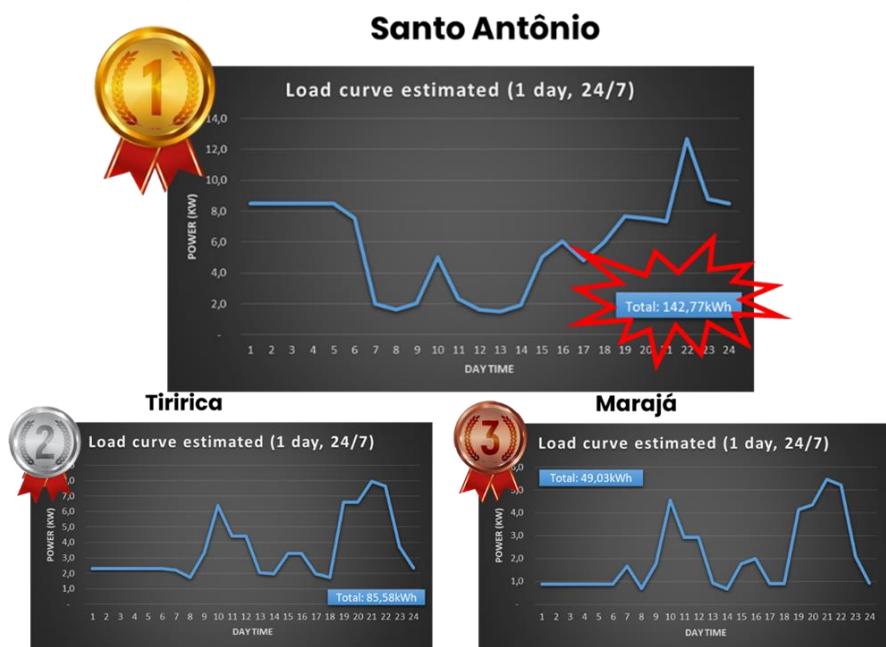
$$x = \left(\frac{23 \times 37800}{30} \right) = R\$ 28.980,00$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve o intuito de dimensionar um sistema de eletrificação a partir de uma ou mais fontes de energia que melhor atendesse as necessidades de uma comunidade no Baixo Rio Negro do Amazonas. Utilizando o software HOMER PRO para modelagem e otimização desta finalidade, foi possível averiguar a viabilidade de implantação, abrangendo aspectos financeiros e ambientais.

Primeiramente, a partir de dados do consumo de energia elétrica de 3 comunidades (Tiririca, Marajá e Santo Antônio) por meio de entrevista nos locais, fez-se a curva de carga alvejando a comunidade com maior demanda de energia, como mostra a Figura 72.

Figura 72 - Comunidade escolhida



Fonte: Autoria própria, 2024.

Segundamente, obtendo Santo Antônio como a comunidade escolhida, sabendo que a comunidade possuía um gerador a diesel de 15 kVA que fornecia energia elétrica por 3 horas e que não era atendida pelo Programa Luz para Todos, utilizou-se o software HOMER PRO para realizar dimensionamentos de implantação de energia elétrica, conforme segue o resultado na Figura 73.

Figura 73 - Resultado final HOMER PRO.

		NPC (R\$)	CAPEX (R\$)	LCOE (R\$/kWh)	Operating cost (R\$/yr)	Simple Payback (yr)	Total Fuel (L/yr)
Wind	Solar	R\$533,810	R\$360,772	R\$0.860	R\$13,788	0.012	0
Wind	Solar	R\$543,916	R\$366,246	R\$0.876	R\$14,157	0.012	0
Wind	Solar	R\$1.31M	R\$730,950	R\$2.01	R\$46,304	0.024	20.2
Wind	Solar	R\$396M	R\$1,766	R\$605.86	R\$31.5M		24,187

Fonte: HOMER PRO, 2024.

Os resultados da simulação demonstraram que o software HOMER PRO não apresentou nenhuma possibilidade viável de implementação de sistemas exclusivamente eólicos. Esse resultado confirma a inviabilidade dessa solução para a região analisada, devido à baixa velocidade dos ventos e à altura necessária para alcançar níveis mínimos de eficiência, mesmo considerando o uso de turbinas eólicas geradoras de energia em corrente alternada.

Além disso, observou-se que o HOMER PRO realiza dimensionamentos com elevados excedentes de energia elétrica. Após diversos testes, ficou evidente que o software considera mais econômico superdimensionar o sistema do que dimensioná-lo para atender apenas à demanda específica da região. Esse comportamento reflete a priorização da confiabilidade energética em detrimento de um ajuste mais preciso da capacidade instalada.

Outro ponto relevante identificado durante a análise é a limitação das informações detalhadas fornecidas pelo software. Enquanto a quantidade de baterias utilizadas no sistema é explicitamente apresentada, para outros componentes, como painéis solares, inversores, controladores e turbinas, o software apresenta apenas as capacidades nominais, exigindo complementos analíticos para o dimensionamento completo.

Dentre as quatro simulações realizadas, a Simulação 1, baseada exclusivamente em energia solar, revelou-se a solução mais adequada para o contexto proposto. Esse sistema apresentou o menor custo total ao longo de 25 anos (R\$ 533.810,00), garantiu uma fração de energia renovável de 100%, eliminou o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases poluentes, além de registrar o menor custo de manutenção anual (R\$ 13.788,00) e o menor custo de energia (R\$ 0,86/kWh). O investimento inicial (CAPEX) também foi o mais baixo,

totalizando R\$ 360.772,00, e o retorno financeiro ocorreu no menor tempo (0,012 ao ano).

Contudo, embora o sistema solar apresente inúmeros benefícios técnicos e econômicos, sua implementação exige uma vasta área para a instalação dos painéis solares. No caso da comunidade de Santo Antônio, que possui áreas protegidas para a preservação ambiental, a devastação da flora local para a instalação de uma usina solar representa um desafio significativo, dificultando a viabilização prática desse modelo no contexto ambiental da região.

Para mais, a autonomia das baterias é suficiente para assegurar a confiabilidade do sistema, mesmo nos períodos de baixa irradiação solar. Vale destacar que, mesmo com a posse de um gerador a diesel de 15 kVA em Santo Antônio, o custo com a manutenção periódica, combustível e a substituição do mesmo tornam-se tão elevados que não compensa utilizá-lo para fornecer energia elétrica. Por esta razão, por mais que as demais simulações integrem fontes eólicas e o gerador a diesel, essas adições aumentaram os custos sem trazer benefícios significativos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Apesar da relevância do HOMER Pro na modelagem e otimização de sistemas híbridos de energia, uma limitação identificada no uso desta ferramenta é a ausência de recursos para o dimensionamento dos sistemas de proteção elétrica. Assim, sugere-se, como trabalho futuro, a complementação das simulações realizadas pelo software por meio do dimensionamento e análise dos dispositivos de proteção necessários, como disjuntores, fusíveis e supressores de surtos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amazon. Turbina eólica HUIZHITENGDA (3000W). Disponível em: <https://www.amazon.com.br/velocidade-iniciar-vertical-permanente-controlador/dp/B0BT8221P8?th=1>. Acesso em 30 de nov. 2024.

ARAÚJO, C. de F. Eletrificação rural em comunidades isoladas na Amazônia: introdução da energia solar fotovoltaica na reserva extrativista do Rio Unini, AM. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

AUTOMAXX WINDMILL. Velocidade mínima do vento para um gerador eólico funcionar? Disponível em: <https://www.automaxxwindmill.com/pt/blogs/turbina-eolica-1/quanto-vento-voce-precisa-para-um-gerador-eolico-funcionar>. Acesso em: 23 nov. 2024.

AZEVEDO, T. M.; VARELLA, F. K. de O. M. Acesso à energia, gênero e pobreza energética. UFERSA, 2023.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Banco Central do Brasil**. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Acordo de Paris. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>. Acesso em: 8 out. 2024.

BRAZ, C. A.; RODRIGUES, R. L.; SIQUEIRA, H. V. Geração de energia elétrica por meio de fontes de energia renováveis: uma revisão sistemática. *R. Gest. Industr.*, Ponta Grossa, v. 13, n. 1, p. 228-242, 2017.

CAVALCANTE, A. S. A Contribuição do Programa Luz Para Todos no Desenvolvimento Sustentável do Amazonas: um estudo de caso na comunidade Terra Preta do Limão-Barreirinha/AM. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2008.

COSTA, M. P. Avaliação da concentração de dióxido de nitrogênio no entorno de uma usina termelétrica em Manaus-AM. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2013.

DI LASCIO, M. A.; BARRETO, E. J. F. Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira: Eletrificação de Comunidades Isoladas. Ministério de Minas e Energia, 2009.

ELETROBRAS. Relatórios de desempenho do Programa Luz para Todos. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2024: Ano Base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 4 out. 2024.

Enel Green Power. Vida útil de uma turbina eólica. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/historias/articles/2020/06/nova-vida-turbinas-eolicas-sustenabilidade>. Acesso em 30 de nov. 2024.

FARK ENGENHARIA. *Sistema Off Grid*. Disponível em: <https://fark.eng.br/off-grid/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

FERNANDES, C. C.; MAZZOLA, B. G. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: A evolução do Objetivo 7 – Energia Acessível e Limpa. Universidade de São Paulo, 2016.

FERREIRA, A. L.; SILVA, F. B. Universalização do acesso ao serviço público de energia elétrica na Amazônia Legal: desafios e evolução recente. Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2021.

FRAGOSO, Cássio de Oliveira; STELLA, Letícia Fernanda. Estudo de viabilidade da implementação de um grupo motor gerador a diesel em horário de pico em um consumidor comercial de baixa potência aliado à tarifa branca. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

Fundação Amazônia Sustentável. Distância de Santa Helena do Inglês até Manaus. Disponível em: <https://fas-amazonia.org/comunidades-amazonicas-sao-beneficiadas-com-sistema-de-energia-solar-que-fortalece-empreendedorismo-sustentavel/>. Acesso em 01 de dez. de 2024.

Fundação Amazônia Sustentável. Número de famílias em Santa Helena do Inglês até Manaus. Disponível em: <https://fas-amazonia.org/comunidade-ribeirinha-da-amazonia-e-beneficiada-com-sistema-inovador-de-energia-solar/>. Acesso em 01 de dez. de 2024.

Generac Brasil. Gerador a diesel de 15kVA. Disponível em: <https://generacbrasil.com.br/produtos/geradores-diesel/15-800-kva/>. Acesso em 30 de nov. 2024.

Generac Brasil. Período de manutenção. Disponível em: <https://generacbrasil.com.br/como-funciona-a-manutencao-de-geradores-de-energia/>. Acesso em 1 de dez. 2024.

HOMER ENERGY. *Finding data to run HOMER PRO*. Disponível em: <https://homerenergy.my.site.com/supportcenter/s/article/finding-data-to-run-homer-pro>. Acesso em: 13 nov. 2024.

HOMER ENERGY. HOMER PRO: Hybrid Renewable and Microgrid System Design Tool. Disponível em: <https://homerenergy.com/products/pro/index.html>. Acesso em: 12 nov. 2024.

Homer Energy. Manual HOMER PRO. Disponível em: <https://homerenergy.com/products/pro/docs/>. Acesso em 01 de dez. 2024.

IBGE; SIMPLES. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024. Ano base 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 17 dez. 2024.

INSOL ENERGIA. Vida útil de um inversor solar. Disponível em: <https://insolenergia.com.br/blog/paineis-e-inversores-fotovoltaicos-qual-a-durabilidade-desses-equipamentos/>. Acesso em 30 de nov. 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica? São Paulo: IEMA, 2021. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br>. Acesso em: 7 out. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Electricity 2024 - Analysis and forecast to 2026*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 4 out. 2024.

LACERDA, G. Y. C.; LIRA, J. S.; OLIVEIRA, L. H. S.; SANTOS, M. R. P. Implantação de um sistema fotovoltaico *off-grid* em uma comunidade da Resex Tapajós-Arapiuns. X Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2023.

LANA, T. R.; SILVA, J. A.; SILVA, M. S.; TALARICO, M. G.; NAZARE, T. B. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. FIC/UNIS, 2020.

LIBERTY ENERGIA. Custo da manutenção em energia solar. Disponível em: <https://www.libertyenergia.eco.br/quanto-custa-a-manutencao-em-energia-solar/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

LIMA, A. A. et al. Energia Solar Fotovoltaica e Universalização do Atendimento de Energia Elétrica em Áreas Remotas. SENDI, 2010.

MARI JÚNIOR, A.; MARI, A. G.; CABRAL, A. C.; FRIGO, E. P.; SANTOS, R. F. V. Vantagens e desvantagens da energia hidráulica. *Acta Iguazu*, Cascavel, v. 2, n. 4, p. 20-28, 2013.

MATIELLO, S.; CERRI, F.; PAGANI, C. P.; MORET, A. de S. Energia e desenvolvimento: alternativas energéticas para comunidades isoladas da Amazônia. *Revista de Desenvolvimento Regional*, 2018.

MINAYO, M. C. de S.; HARTZ, Z. M. de A.; BUSS, P. M. Qualidade de vida e saúde: um debate necessário. *Ciência & Saúde Coletiva*, 2000.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). UM MARCO HISTÓRICO: 10 milhões de brasileiros saíram da escuridão – Programa Luz para Todos. Brasília: MME, 2023.

NASCIMENTO, M. J. A. Levantamento histórico da matriz energética em Manaus. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2017.

NOCERA, Diego; GOMES, Rafael; PEREIRA, Tiago. Análise financeira da utilização de grupo gerador diesel em horário de ponta. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).

ONU. Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Organização das Nações Unidas, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) - Energia Limpa e Acessível. Nova Iorque: ONU, 2020. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>. Acesso em: 7 out. 2024.

PEPITONE, A. Energia solar amplia a característica sustentável da matriz elétrica do Brasil. *Boletim Energético*, 2016.

Petrobras. Preço médio do diesel no Amazonas. Disponível em: <https://precos.petrobras.com.br/web/precos-dos-combustiveis/w/diesel/am>. Acesso em 01 de dez. 2024.

PORTAL DA NAVEGAÇÃO. Transporte escolar fluvial terá reajuste em 2025, informa FNDE. Disponível em: <https://portaldanavegacao.com/2024/11/02/transporte-escolar-fluvial-tera-reajuste-em-2025-informa-fnde/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

PORTOCARRERO, I. R. Desenvolvimento sustentável e energias renováveis: o etanol no Brasil. *Revista de Ciências Gerenciais*, v. 15, n. 22, p. 273-286, 2011.

PVSYST. PVsyst 8: Solar PV Simulation Software. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/pvsyst-8/>. Acesso em: 12 nov. 2024.

RIBEIRO, R. N. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU analisando o ODS 7 e os impactos na realidade brasileira. UFERSA, 2022.

ROCHA, L. C. Diagnóstico das emissões de CO₂ na geração termelétrica de Manaus e as possibilidades no mecanismo de desenvolvimento limpo. Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2012.

SALAS, C. S. S.; SILVEIRA, L. H. S. Eletrificação de regiões remotas: estudo de alternativas e aplicação no Pantanal Sul-mato-grossense. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

SANTOS, Cleiton José de Brito. Evolução do mercado de energia elétrica brasileiro e a crise eletroenergética de 2021. 2022. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

SANTOS, D. O. Avaliação da inserção da geração fotovoltaica em redes isoladas. 2023. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

SANTOS, P. R. G.; FLORENTINO, M. C. C.; BASTOS, J. L. C.; TREVISAN, G. V. Fontes renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil. Anais do VIII MICTI, 2015.

SIGMAEARTH. Manutenção de uma turbina eólica de 2MW. Disponível em: <https://sigmaearth.com/pt/cost-analysis-how-much-do-commercial-wind-turbines-really-cost/>. Acesso em 30 de nov. 2024

SILVA, L. R. J.; SHAYANI, R. A.; OLIVEIRA, M. A. G. Análise comparativa das fontes de energia solar fotovoltaica, hidrelétrica e termelétrica. Universidade de Brasília, 2017.

SILVA, S. S. F.; CÂNDIDO, G. A. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o planejamento energético nacional e uma oportunidade para a região Nordeste do Brasil. *Revista Espacios*, v. 36, n. 15, 2015.

SOLLED ENERGIA. Vida útil de uma bateria solar. Disponível em: <https://www.solledenergia.com.br/quanto-tempo-dura-uma-bateria-solar/>. Acesso em: 29 nov. 2024.

TOLMASQUIM, M. T. Planejamento Energético Nacional e Sustentabilidade. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

Torre de iluminação. Vida útil do gerador. Disponível em:
<https://torredeiluminacao.com.br/qual-o-tempo-de-vida-util-de-um-gerador/>. Acesso em 30 de nov. 2024.

TRINDADE, A. B. *Análise e otimização de sistemas híbridos de energia para comunidades isoladas no Amazonas utilizando o software HOMER PRO*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

TRINDADE, Alessandro B. *Access to energy in isolated communities at the Amazon basin: economic, technological and logistical challenges*. Symposium Florianópolis, 16-18 abril 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). *The Paris Agreement*. Bonn: UNFCCC, 2015. Disponível em:
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 7 out. 2024.

VASSOLER JUNIOR, Ricardo Tronco. Avaliação técnica e financeira do uso de geradores à diesel em horário de ponta. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2024.

VIEIRA, M. R. S. Energia acessível e de qualidade: os desafios para a garantia de acesso à energia renovável no Amazonas. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2022.

WEG. Vida útil de um painel solar. Disponível em:
<https://www.weg.net/solar/blog/qual-e-a-vida-util-de-uma-placa-solar/#:~:text=A%20vida%20%C3%BAtil%20de%20uma%20placa%20solar%20%C3%A9%2C%20em%20m%C3%A9dia,a%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20proporcionalizada%20ao%20sistema>. Acesso em: 29 nov. 2024.