



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ - UNIFAP**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS - DCET**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM**  
**COMUNIDADES ISOLADAS DO AMAPÁ: UMA ANÁLISE POR MEIO DO**  
**MODELO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA**

**GUSTAVO NUNES DA CONCEIÇÃO**

**MACAPÁ-AP**  
**2025**

**GUSTAVO NUNES DA CONCEIÇÃO**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DE TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM  
COMUNIDADES ISOLADAS DO AMAPÁ: UMA ANÁLISE POR MEIO DO  
MODELO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal do Amapá, como requisito parcial para  
conclusão da Disciplina TCC II

Orientador: Prof. Dr. Alaan Ubaiara Brito  
Coorientador: Dr. Rudi Henri van Els

**MACAPA-AP**

**2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP  
Elaborado por Cristina Fernandes – CRB-2 / 1569

---

C744v Conceição, Gustavo Nunes da.

Viabilidade econômica de tecnologias de geração de energia em comunidades isoladas do Amapá: uma análise por meio do modelo do custo nivelado de energia / Gustavo Nunes da Conceição. - Macapá, 2025.

1 recurso eletrônico.

88 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica, Macapá, 2025.

Orientador: Alaan Ubaiara Brito.

Coorientador: Rudi Henri Van Els.

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Energia. 2. LCOE. 3. ONSSET. I. Brito, Alaan Ubaiara, orientador. II. Els, Rudi Henri Van, Coorientador. III. Universidade Federal do Amapá. IV. Título.

CDD 23. ed. – 621.042098116

---

CONCEIÇÃO, Gustavo Nunes da. **Viabilidade econômica de tecnologias de geração de energia em comunidades isoladas do Amapá**: uma análise por meio do modelo do custo nivelado de energia. Orientador: Alaan Ubaiara Brito. Coorientador: Rudi Henri Van Els. 2025. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2025.

## AGRADECIMENTOS

Em um primeiro momento, gostaria de agradecer a Deus, a minha mãe e aos meus avós pelo apoio incondicional e por sempre estarem comigo em palavras, pensamentos e orações, mesmo com o obstáculo da distância. Muito obrigado por todo amor e carinho. Gostaria de agradecer também aos demais familiares e orientadores pelo suporte e pelo conhecimento compartilhado ao longo dessa jornada de muito trabalho e aprendizado.

## RESUMO

Diante das dificuldades observadas na região norte, no que diz respeito ao acesso à energia elétrica, o presente trabalho aplica uma ferramenta baseado no software de código fonte aberto Onset para calcular o custo necessário à geração de energia elétrica em comunidades isoladas fictícias posicionadas no Estado do Amapá. Para isso, utiliza-se o modelo do Custo Nivelado de Energia (LCOE), que estima, em dólares, o custo por quilowatt-hora gerado por sistemas solares, eólicos, hidrocinéticos e a diesel. A análise considera características específicas de doze comunidades, como coordenadas geográficas, irradiação solar, velocidade do vento e do rio mais próximo. Os resultados demonstram que a tecnologia mais vantajosa, em termos de custo-benefício de acordo com a metodologia empregada para o caso hipotético, é a energia solar fotovoltaica, recomendando-se, assim, uma atenção especial à última tendo em vista uma futura aplicação prática.

**Palavras-chave:** Energia; LCOE; ONSSET.

## ABSTRACT

Given the difficulties observed in the northern region regarding access to electricity, this study applies a tool based on the open source software Onset to calculate the cost required to generate electricity in fictitious isolated communities located in the state of Amapá. To this end, the Levelized Cost of Energy (LCOE) model is used, which estimates, in dollars, the cost per kilowatt-hour generated by solar, wind, hydrokinetic and diesel systems. The analysis considers specific characteristics of twelve communities, such as geographic coordinates, solar irradiation, wind speed and the nearest river. The results demonstrate that the most advantageous technology, in terms of cost-benefit according to the methodology used for the hypothetical case, is photovoltaic solar energy, thus recommending special attention to the latter with a view to future practical application.

**Keywords:** Energy; LCOE; ONSSET.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	9
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	OBJETIVO GERAL .....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
3.1	TECNOLOGIAS EMPREGADAS.....	12
3.1.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	12
3.1.2	ENERGIA EÓLICA .....	13
3.1.3	ENERGIA HIDROKINÉTICA .....	15
3.1.4	GERAÇÃO A DIESEL.....	17
3.2	PLANEJAMENTO GEOESPACIAL .....	17
3.2.1	SISTEMA GEOGRÁFICO DE INFORMAÇÕES (GIS).....	18
3.2.2	OPEN SOURCE SPATIAL ELECTRIFICATION TOOL (ONSSET) .....	20
3.3	CÁLCULO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE) .....	20
4	METODOLOGIA.....	22
4.1	ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA LCOE.....	22
4.1.1	METODOLOGIA LCOE TECNOLOGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	22
4.1.2	METODOLOGIA LCOE TECNOLOGIA HIDROKINÉTICA.....	23
4.1.3	METODOLOGIA LCOE TECNOLOGIA DE TURBINAS EÓLICAS.....	25
4.1.4	METODOLOGIA LCOE GERAÇÃO A DIESEL.....	25
4.2	ESTRUTURA DO CÓDIGO UTILIZADO NO PROJETO.....	27
4.3	ESTUDO DE CASO .....	28
4.3.1	DADOS ESPACIAIS .....	29
4.3.2	COMUNIDADES.....	31
4.3.3	POSICIONAMENTO DO RIO.....	32

4.3.4	POSICIONAMENTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	33
4.3.5	CARGA ANUAL .....	35
4.3.6	VELOCIDADE DO VENTO NA REGIÃO .....	37
4.3.7	IRRADIAÇÃO SOLAR.....	38
4.3.8	VELOCIDADE DO RIO MATAPI.....	40
4.3.9	LOCALIZAÇÃO E DISTÂNCIA CIDADE MAIS PRÓXIMA .....	41
4.4	DADOS APLICADOS AO CÁLCULO DO LCOE .....	42
4.4.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	42
4.4.2	ENERGIA EÓLICA .....	47
4.4.3	GERAÇÃO POR MEIO DE TURBINAS HIDROcinÉTICAS .....	47
4.4.4	GERAÇÃO A DIESEL.....	49
4.4.5	DADOS DO TRANSPORTE DAS TECNOLOGIAS OFF-GRID.....	50
4.4.6	TAXA DE DESCONTO .....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
5.1	MELHORES OPÇÕES PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA.....	51
5.2	VALORES DE LCOE OBTIDOS PARA AS DEMAIS TECNOLOGIAS.....	52
6	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICES .....	60
	APÊNDICE A – COORDENADAS DO RIO .....	60
	APÊNDICE B – COORDEANDAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	63
	APÊNDICE C - TABELA COM OS CUSTOS NIVELADOS CALCULADOS .....	67
	APÊNDICE D - CÓDIGO UTILIZADO NO PROJETO .....	69

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMA SOLAR OFF GRID .....	13
FIGURA 2 - TURBINA EÓLICA COM EIXO VERTICAL .....	14
FIGURA 3 - COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA.....	15
FIGURA 4 - TURBINA HIDROKINÉTICA CRIADA POR HARRY .....	16
FIGURA 5 - GERADOR A DIESEL DE 6 KVA .....	17
FIGURA 6 - FUNCIONAMENTO DO SISTEMA GIS .....	18
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO POR MEIO DE VETORES .....	19
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO POR MEIO DE RASTERS .....	20
FIGURA 9 - DIAGRAMA DO FUNCIONAMENTO DO CÓDIGO .....	28
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO EM GIS DAS COMUNIDADES FICTÍCIAS .....	29
FIGURA 11 - REPRESENTAÇÃO EM GIS AMPLIADA .....	30
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DA FOZ DO RIO MATAPI.....	30
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DAS COMUNIDADES POR MEIO DA BIBLIOTECA FIONA .....	32
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DO RIO POR MEIO DA BIBLIOTECA FIONA.....	33
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO POR MEIO DA BIBLIOTECA FIONA .....	34
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DOS ELEMENTOS NA MESMA FIGURA .....	35
FIGURA 17 - NÍVEIS DE CONSUMO DE ENERGIA PER CAPITA.....	36
FIGURA 18 - ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.....	37
FIGURA 19 - IRRADIAÇÃO SOLAR MENSAL NA COMUNIDADE 9.....	38
FIGURA 20 - GRÁFICO DA VELOCIDADE DO RIO MATAPI .....	40
FIGURA 21 - GRÁFICO DA VELOCIDADE NA FOZ DO RIO MATAPI .....	41
FIGURA 22 - PAINEL POLICRISTALINO CANADIAN.....	43
FIGURA 23 - INVERSOR FRONIUS 4210063 PRIMO 5.0 .....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DAS COMUNIDADES.....	31
TABELA 2 - COORDENADAS DO RIO .....	32
TABELA 3 - COORDENADAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO .....	33
TABELA 4 - POPULAÇÃO E CONSUMO ANUAL DE ENERGIA.....	36
TABELA 5 - IRRADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA.....	38
TABELA 6 - IRRADIAÇÃO SOLAR INTERVALOR DE TEMPO DE UM ANO .....	39
TABELA 7 - DISTÂNCIA E TEMPO DE VIAGEM CIDADE MAIS PRÓXIMA .....	41
TABELA 8 - DADOS PAINEL CANADIAN .....	43
TABELA 9 - DADOS DA BATERIA .....	44
TABELA 10 - DADOS INVERSOR FRONIUS .....	45
TABELA 11 - CUSTO COM EQUIPAMENTOS SISTEMA SOLAR .....	46
TABELA 12 - DADOS DA TURBINA HUMMER H8.0–10 KW.....	47
TABELA 13 - COMPONENTES DA TURBINA HUMMER H8.0–10 KW .....	47
TABELA 14 – DADOS DA MICROTURBINA GERAÇÃO 2 .....	48
TABELA 15 - CUSTOS DE INSTALAÇÃO DA TURBINA GERAÇÃO 2.....	48
TABELA 16 - CUSTO DE OPERAÇÃO DA TURBINA GERAÇÃO 2 .....	48
TABELA 17 - DADOS DO GERADOR.....	49
TABELA 18 - DADOS DO TRANSPORTE DE COMBUSTÍVEL .....	50
TABELA 19 - RESULTADO MELHOR OPÇÃO DE .....	51
TABELA 20 - VALOR MÉDIO DE LCOE.....	52
TABELA 21 - VALOR DE LCOE PARA CADA TECNOLOGIA .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica é um fator essencial para o desenvolvimento econômico do país e para a melhoria da qualidade de vida da população, com impactos positivos em áreas como educação, saúde e lazer. É diante dessa perspectiva, que a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu como sétimo objetivo do desenvolvimento sustentável, parte central da Agenda 2030 - adotada pela cúpula das Nações Unidas no ano de 2015 -, o acesso universal, confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia.

Entretanto, apesar dos avanços já alcançados no sentido de obter-se a meta estipulada pela ONU, a matriz energética mundial não evoluiu rápido o suficiente, de tal maneira que, no ritmo atual, aproximadamente 660 milhões de pessoas não terão acesso à eletricidade e 2 bilhões de pessoas ainda dependerão de combustíveis e tecnologias poluentes até o ano de 2030, segundo a ONU (2023).

No cenário nacional, o Brasil adota o modelo de abastecimento de energia baseado no Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual conecta usinas geradoras e consumidores ao longo de todo o país. Sendo a matriz energética fortemente baseada em energia renovável – hidrelétrica. Contudo, o formato de geração e distribuição de energia do SIN acaba por ocasionar distorções, pois as populações que vivem próximo a usinas acabam por não usufruir da energia gerada, principalmente nos locais mais remotos da região norte (Els et al., 2012).

Apesar de 25,5 % de toda a energia gerada no país ser proveniente da região amazônica, 990 mil pessoas situadas na região denominada de Amazônia legal não têm acesso ao serviço público de energia elétrica de acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA).

Tomando como referência o estado do Amapá, a questão do acesso à energia também adquire conotações alarmantes. Haja vista que, a energia elétrica não chega a 25.593 pessoas, representando 3,1 % de toda a população do estado, fato que o torna o terceiro estado da região com o maior número de habitantes sem acesso ao serviço, perdendo apenas para os estados do Acre e Amazonas, respectivamente (IEMA, 2021).

A primeira etapa para uma futura melhoria do acesso à energia elétrica no estado do Amapá consiste no planejamento voltado para o abastecimento de

comunidades isoladas da região, é nesse contexto que surgem as ferramentas de planejamento geoespacial.

Dentre elas, pode-se mencionar o Open Source Spatial Electrification Tool (ONSSET), ferramenta de planejamento energético de código fonte aberto desenvolvida em Python, que por meio do parâmetro do custo nivelado de energia, calcula o custo da geração de energia elétrica para uma determinada localidade por meio de diferentes fontes de energia, tomando como base as dimensões e características do local (Onsset, 2020).

É a partir do uso de um código baseado nessa ferramenta que o presente projeto tem como intuito realizar o planejamento primário do abastecimento de energia elétrica em comunidades localizadas no Estado do Amapá situadas próximo ao Rio Matapi, levando em conta quatro tecnologias de geração descentralizada de energia – diesel, hidrocínética, solar e eólica.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho consiste em calcular o custo necessário à geração de energia elétrica em comunidades isoladas fictícias situadas no estado do Amapá por meio de tecnologias descentralizadas, ou seja, que independem da concessionária. Para tanto, será utilizado um programa em Python baseado no código fonte da ferramenta Onssset.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar dados geoespaciais das comunidades selecionadas para o desenvolvimento do estudo;
- Fazer o levantamento dos equipamentos que serão empregados no abastecimento de energia nessas comunidades;
- Aplicar o código em Python que irá determinar a viabilidade de implantação de cada uma das fontes descentralizadas de energia;
- Comparar as tecnologias analisadas, a fim de identificar a alternativa mais viável para a implementação do projeto.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A fundamentação teórica discorrerá, em um primeiro momento, sobre as tecnologias que serão empregadas no abastecimento de energia elétrica em cada uma das comunidades - solar, eólica, diesel e hidrocínética -, com o intuito de destacar as principais características e modos de funcionamento de cada uma das últimas.

Posteriormente, definindo-se as tecnologias, será discutida a questão do planejamento geoespacial, com ênfase nas ferramentas que permitirão a inserção das características do local tomado como base para análise. Dentre as ferramentas, pode-se mencionar o uso do Sistema Geográfico de Informações (GIS) e do Onset.

Por último, será feita uma apresentação do modelo do Custo Nivelado de Energia (LCOE), parâmetro utilizado com a finalidade de identificar o custo da geração de energia nas comunidades tomadas como referência no estudo.

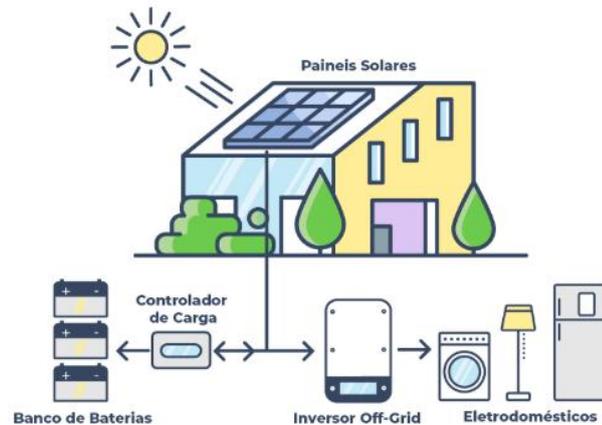
#### **3.1 TECNOLOGIAS EMPREGADAS**

##### **3.1.1 Energia solar fotovoltaica**

Os sistemas solares fotovoltaicos são constituídos por equipamentos que juntos são capazes de converter a radiação solar em energia elétrica a partir de painéis formados por células fotovoltaicas. As duas classes de sistemas fotovoltaicos são a on grid e a off grid, as quais possuem uma configuração que essencialmente é formada por módulos fotovoltaicos, unidade de controle de potência e de armazenamento de carga.

O sistema off grid, representado na figura 1, é mais adequado à finalidade de geração descentralizada de energia. Haja vista que, pelo fato de não estar conectado diretamente à rede elétrica convencional, pode ser destinado ao abastecimento de energia em comunidades remotas, operando de maneira autônoma. Por funcionar de forma isolada, essa configuração conta com banco de baterias e uma unidade capaz de controlar o armazenamento de carga, para que a energia gerada durante o dia possa vir a ser consumida em outros momentos.

Figura 1 - Sistema solar off grid



Fonte: Casa solar (2023)

Além disso, é importante destacar que o barateamento do custo dos módulos fotovoltaicos tem tornado essa tecnologia mais atrativa do ponto de vista econômico. Cabe mencionar também que no ano de 2024 foram instalados no Brasil 782.864 sistemas de micro e minigeração de energia solar, totalizando um acréscimo de 5,63 GW de potência instalada na matriz energética nacional, segundo a Agência nacional de energia elétrica (ANEEL).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objeto propor uma análise destinada às comunidades não atendidas pela rede elétrica convencional, a configuração tomada como base para o estudo será a off grid, a qual conta com painéis fotovoltaicos, banco de baterias e um inversor de frequência.

### 3.1.2 Energia eólica

Denomina-se energia eólica, a energia proveniente das massas de ar em movimento. A sua utilização ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação a partir do emprego de turbinas eólicas, como a representada na figura 2.

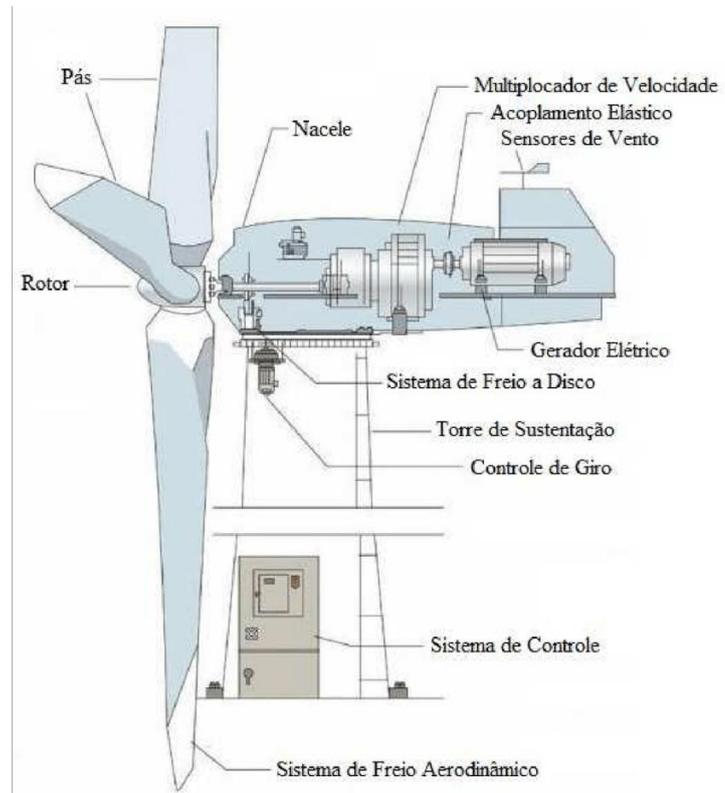
Figura 2 - Turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Vitruvius (2015)

O processo de montagem de uma turbina em um parque eólico consiste no acoplamento de componentes pré-montados e pré-fabricados exibidos na figura 3 ainda na fábrica. A torre é fabricada em seções ou segmentos, dimensionados de acordo com as condições de transporte. A nacelle é a parte da turbina que abriga componentes importantes, tais como o gerador e a caixa de velocidades; depois de colocada no topo da torre, a montagem da nacelle requer alguns ajustes finais, como o alinhamento do gerador e lubrificação. O rotor que é transportado desmembrado em três pás e um hub, pode ser pré-montado em solo e depois içado como uma peça única.

Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Abrantes (2017)

Em 2024 a ANEEL registrou a maior expansão da história da matriz elétrica brasileira, com 10.321 MW adicionados. A energia eólica desempenhou um papel crucial no aumento dessa capacidade, com 39,26% da potência instalada em 2024 proveniente de usinas eólicas. A capacidade instalada total de usinas eólicas no Brasil é próxima de 33 mil MW, representando cerca de 13,5% da matriz elétrica nacional (ANEEL, 2024).

### 3.1.3 Energia hidrocínética

Uma tecnologia menos difundida, mas igualmente merecedora de destaque, consiste na utilização de turbinas hidrocínéticas com a finalidade de gerar energia de maneira renovável e descentralizada. O aproveitamento da energia hidráulica das correntes, é uma das alternativas atuais e promissoras para geração de eletricidade usando o potencial energético de rios.

O emprego de turbinas hidrocínéticas, como a da figura 4, em detrimento à geração hidrelétrica convencional, apresenta uma série de vantagens, como a

eliminação da necessidade de alagamento e a possibilidade da geração de energia próxima às unidades consumidoras, reduzindo consideravelmente o custo com a transmissão.

O primeiro esforço para a utilização de energia hidrocínética no Brasil foi em 1985 quando Harry e Almeida implantaram no rio Solimões uma estrutura capaz de gerar 1 kW de eletricidade quando submetida a uma correnteza de 1,1 m/s. Por assemelhar-se a um “catavento”, os pesquisadores a denominaram de “cata-água”.

Figura 4 - Turbina Hidrocínética TREK



Fonte: Medina (2013)

Hoje, existem basicamente dois modelos de turbinas hidrocínéticas: turbinas com sistema de escoamento cruzado e turbinas com sistemas de escoamento axial. Sendo, o sistema de escoamento axial, o mais adequado à utilização em rios por possuir o eixo de rotação paralelo à direção de escoamento da água.

Porém, um dos principais obstáculos relacionado ao uso dessa tecnologia consiste na identificação do local adequado à sua implantação. Haja vista que, segundo Els et al. (2008), o rio deve apresentar características específicas de profundidade e de velocidade da água.

### 3.1.4 Geração a diesel

Em muitas comunidades isoladas, ainda é frequente o emprego de geradores que produzem energia a partir da queima de combustíveis fósseis, como o representado na figura 5. E dentre esses geradores, o mais comum diz respeito ao gerador a diesel. Como vantagem, o uso dessa tecnologia apresenta um custo moderado de implantação. Entretanto, a longo prazo, os geradores a diesel possuem um elevado valor de manutenção, em virtude da necessidade constante de aquisição de combustível e dos danos ao meio ambiente intrínsecos à sua aplicação (Pinheiro et al., 2012).

Figura 5 - Gerador a diesel de 6 kVA



Fonte: Nowak (2025)

## 3.2 PLANEJAMENTO GEOESPACIAL

O processo de levar energia elétrica até uma comunidade que outrora era isolada está relacionado a um elevado investimento. Principalmente, quando a comunidade em questão se encontra na Amazônia que possui trechos extensos e de difícil acesso. É nesse contexto que o planejamento geoespacial surge como uma ferramenta elementar na consecução do projeto de eletrificação de uma região isolada, pois essa busca inclui as características e dimensões do local, permitindo, dessa forma, que o pesquisador possa compreender melhor as variações de cada região.

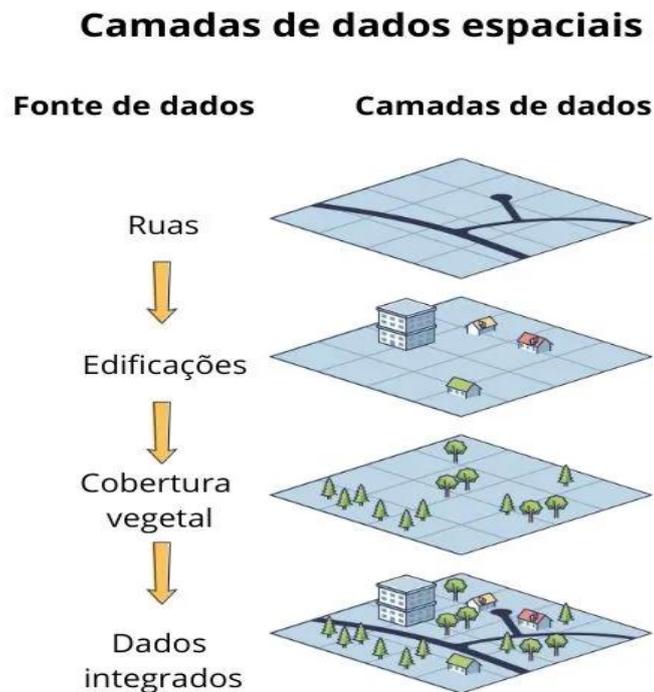
E para que esse planejamento seja executado no presente trabalho, duas ferramentas são levadas em consideração: o sistema geográfico de informações (GIS) e ONSSET.

### 3.2.1 Sistema geográfico de informações (GIS)

O sistema geográfico de informações (GIS) é um conjunto integrado de ferramentas de hardware e software, projetado para capturar, armazenar, manipular, analisar, gerenciar e apresentar digitalmente dados espaciais (ou geográficos) e informações de atributos relacionados. O GIS pode relacionar dados de diferentes fontes, usando duas variáveis de índice principais, espaço (ou localização) e tempo (National Geographic, 2024).

No exemplo da figura 6, é possível observar que primeiro são adicionados os dados das ruas, seguidos dos dados das edificações e da cobertura vegetal, respectivamente, e por fim, houve a integração de todas essas informações em um único arquivo.

Figura 6 - Funcionamento do sistema GIS

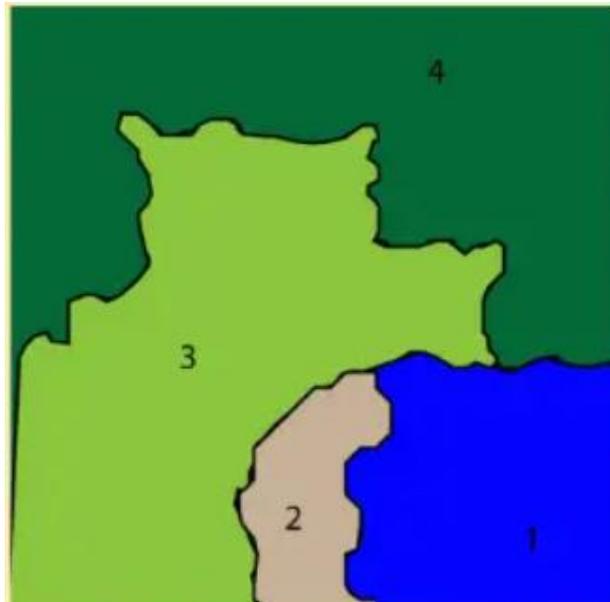


Fonte: National Geographic (2024)

O emprego do modelo GIS se torna de grande valia ao estudar-se a questão da eletrificação em comunidades isoladas na Amazônia pelo fato de permitir a análise simultânea de múltiplos pontos, possibilitando maior facilidade e economia de tempo ao trabalhar-se com uma região tão ampla e cheia de especificidades.

Os tipos mais comuns de dados GIS incluem dados espaciais, os quais descrevem a localização absoluta e relativa de características geográficas que, por sua vez, podem ocorrer por meio de vetores como arcos, polígonos e pontos na figura 7.

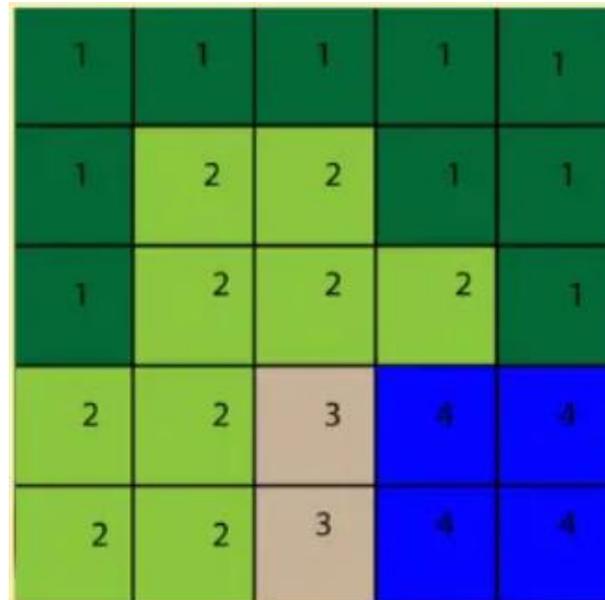
Figura 7 - Representação de uma localidade por meio de vetores



Fonte: Onset (2025)

Os dados espaciais também podem ser descritos por meio de células de grade contendo posições únicas de linha e coluna denominadas de rasters conforme a figura 8.

Figura 8 - Representação de uma localidade por meio de rasters



Fonte: Onset (2025)

### 3.2.2 Open Source Spatial Electrification Tool (ONSSET)

O Onset é uma ferramenta desenvolvida com base no sistema geográfico de informações que tem como finalidade realizar o levantamento dos custos necessários à consecução da eletrificação completa de uma determinada região. Para tanto, a ferramenta faz uso de dados como a proximidade da rede elétrica existente na localidade e a densidade populacional da região em análise (Mentis, 2017).

O Onset utiliza como parâmetro para executar a sua análise o custo nivelado de energia (LCOE do inglês Levelized cost of energy). Esse indicador permite a verificação do custo relacionado à aplicação de cada tecnologia de geração descentralizada que está sendo empregada, de modo a permitir a identificação do modelo mais econômico (Lima, 2024).

### 3.3 CÁLCULO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA (LCOE)

A metodologia do custo nivelado de energia (LCOE) consiste em uma ferramenta de benchmarking (análise comparativa) usada para a avaliação da relação custo-benefício entre diferentes tipos de tecnologias de geração de energia (Branker

et al., 2011). Em linhas gerais, o cálculo do LCOE é feito a partir da divisão dos custos envolvidos na geração de energia pela energia total gerada com a aplicação da tecnologia desde o momento em que esta começa a operar (Lima, 2024).

Uma outra característica relevante dessa metodologia, diz respeito ao fato de a última ser capaz de levar em consideração a taxa de juros praticada no período. Um elemento que se revela importante, pois permite o ajuste do custo da geração de energia ao avanço do tempo, ao inserir fatores como inflação e taxa de juros relativa a empréstimos, realizando assim, um cálculo que pode ser denominado de custo e geração descontada de energia.

A equação do LCOE utilizada como referência no presente projeto foi proposta pela International Renewable Energy Agency (IRENA), estando representada na equação (3.1):

$$LCOE_{IRENA} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (3.1)$$

Onde o numerador representa o custo descontado, calculado em dólares; ao passo que o denominador, por sua vez, consiste na geração de energia descontada proveniente do uso da tecnologia, medida em kW.

Essa fórmula é composta por seis parâmetros, sendo eles:  $I_t$ : O investimento realizado no ano t (US\$);  $M_t$ : Os gastos com operação e manutenção para que a planta se mantenha em funcionamento no ano t (US\$);  $F_t$ : Os gastos com combustível durante o ano t (US\$);  $i$ : A taxa de juros anual praticada na situação em análise;  $n$ : O ciclo de vida da planta;  $t$ : Tempo de operação do sistema (anos).

## 4 METODOLOGIA

Primeiramente, será feita a adaptação da metodologia LCOE para cada tecnologia analisada - Solar, eólica, hidrocínética e geração a diesel - tendo em vista que cada uma delas possui características específicas. Em seguida, será realizada a explicação da estrutura do código aplicado no projeto e por fim, será feita a análise de custos.

### 4.1 ADAPTAÇÃO DA METODOLOGIA LCOE PARA CADA TECNOLOGIA ANALISADA

O cálculo do LCOE, em linhas gerais, consiste em uma divisão entre os fatores que reunidos resultam nos custos que permeiam a instalação de uma tecnologia pela energia total gerada. Entretanto, diante do fato das tecnologias consideradas apresentarem modos distintos de funcionamento, é necessário adaptar essa fórmula para atender às especificidades de cada modelo de geração.

#### 4.1.1 Metodologia LCOE para a tecnologia solar fotovoltaica

A fórmula do custo nivelado de energia (LCOE) para os sistemas solares fotovoltaicos empregada neste projeto foi extraída do artigo elaborado por Branker et al. (2011). Neste artigo, os autores fazem uma análise sobre os pontos da fórmula original que devem ser ajustados com o intuito de que possa ser utilizada para determinar um valor consistente do parâmetro LCOE na geração solar fotovoltaica.

Dessa forma, o custo nivelado de energia para sistemas fotovoltaicos pode ser calculado a partir do uso da equação 4.1:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T (I_t + O_t + M_t) / (1 + i)^t}{\sum_{t=0}^T E_t / (1 + i)^t} \quad (4.1)$$

Onde  $I_t$ : Custo do capital de instalação no ano t (US\$);  $O_t$ : Custo de operação do sistema no ano t (US\$);  $M_t$ : Custo de manutenção do sistema no ano t (US\$);  $t$ :

Ano de operação do sistema;  $i$ : Taxa de juros anual aplicada à operação;  $E_t$ : Energia anual gerada pelo sistema (kWh);  $T$ : O tempo de vida útil do sistema (anos).

É importante destacar que a energia gerada anualmente ( $E_t$ ), de acordo com Branker et al. (2011) é determinada pela equação 4.2:

$$E_t = S_t(1 - d)^t \quad (4.2)$$

Em que  $S_t$ : Geração nominal anual de energia pelo sistema KWh;  $d$ : Fator de degradação das placas solares;  $t$ : Tempo de operação do sistema.

Para o cálculo da geração nominal anual de energia pelo sistema, será empregada a seguinte equação 4.3:

$$S_t = I_a e_p a_p \quad (4.3)$$

Sendo,  $I_a$ : Insolação anual na localidade onde as placas foram instaladas em kWh/m<sup>2</sup>. dia;  $e_p$ : Eficiência dos painéis;  $a_p$ : Área de cada painel em m<sup>2</sup>.

Cabe destacar que o custo de instalação do sistema compreende todas as despesas com a aquisição dos módulos fotovoltaicos, banco de baterias, inversores de frequência, mão de obra de instalação e transporte.

Já o custo operacional, por sua vez, leva em consideração os gastos que surgem a partir do momento em que o sistema começa a operar como manutenção, limpeza, troca de suporte e de baterias do sistema.

#### 4.1.2 Metodologia LCOE para a tecnologia hidrocínética

No que tange ao cálculo do LCOE para a tecnologia de turbinas hidrocínéticas, empregou-se o modelo adaptado por Nunes et al. (2023), em que a equação 4.4 consiste em:

$$LCOE = \frac{CapEx + OpEx}{AEP} \quad (4.4)$$

*CapEx*: custo de capital de instalação (US\$); *OpEx*: custo de operação do sistema (US\$); *AEP*: geração total de energia ao longo de um ciclo de vida (kWh).

Para que o cálculo da energia produzida por uma turbina hidrocínética ao longo de um ano seja efetuado, é elementar que se disponha do fator de potência da máquina, pois esse fator irá possibilitar a determinação da potência média do eixo da última, a partir da equação 4.5.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho U^3 A C_p \quad (4.5)$$

Em que  $P_m$ : potência do eixo médio da máquina (w);  $\rho$ : densidade da água ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $U$ : velocidade da água (m/s);  $A$ : área da seção do rotor da máquina ( $\text{m}^2$ );  $C_p$ : fator de potência.

Uma vez calculado o valor de  $P_m$ , é possível determinar a potência operacional média da turbina pela equação 4.6:

$$P_t = \eta_m \eta_t \eta_e P_m \quad (4.6)$$

Sendo:  $\eta_m$ : Eficiência dos rolamentos da máquina;  $\eta_t$ : Eficiência de transmissão;  $\eta_e$ : Eficiência do gerador;  $P_t$ : Potência média do eixo da máquina (W).

E por fim, com o valor de  $P_t$  é possível determinar a geração de energia anual de uma turbina com a equação 4.7:

$$AEP_n = P_t t \quad (4.7)$$

$AEP_n$ : é a geração anual da turbina no ano n (kWh);  $P_t$ : Potência média do eixo da máquina (W);  $t$ : Tempo anual de geração da turbina (em horas).

De modo que a geração total de energia pela turbina, obtida a partir da soma das produções anuais resulta na equação 4.8:

$$AEP = \sum_n^N \frac{AEP_n}{(1+i)^n} \quad (4.8)$$

Em que  $i$ : Taxa de juros anual;  $n$ : Ano de operação em análise;  $N$ : Vida útil da turbina.

Em posse do valor da geração anual total, é importante destacar os elementos que compõe o custo de instalação e de operação de uma turbina hidrocínética como: valor de aquisição das turbinas, estrutura de montagem, mão de obra e transporte.

#### 4.1.3 Metodologia LCOE para a tecnologia de turbinas eólicas

Pela similaridade de funcionamento existente entre as turbinas eólicas e as hidrocínéticas, o cálculo da geração anual de energia por uma turbina eólica e do seu LCOE é realizado da mesma maneira que na subseção 4.1.2.

Sendo necessário primeiro, a determinação da potência média do eixo das turbinas eólicas (equação 4.5), posteriormente, a obtenção da potência operacional média (equação 4.6), da geração de energia anual (equação 4.7) e por fim, da geração total de energia (equação 4.8).

A maior diferença reside no custo de instalação, pois, para que ocorra a instalação de uma turbina hidrocínética é necessário a presença de uma embarcação que fixe a turbina no rio selecionado. Sendo os custos de operação similares aos já mencionados para as demais tecnologias, ou seja, envolvendo manutenção e troca de peças.

#### 4.1.4 Metodologia LCOE para a tecnologia de geração a diesel

O cálculo do LCOE para a geração a diesel foi extraído do código da ferramenta Onset. Um grande diferencial desse método consiste na inclusão do custo de transporte do combustível até a comunidade onde esse será utilizado na equação 4.9.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^T (I_t + O\&M + F_t) / (1+i)^t}{\sum_{t=0}^T E_t / (1+i)^t} \quad (4.9)$$

De modo que  $I_t$ : Investimento para a implantação da tecnologia (US\$);  $O\&M$ : Custo de operação e de manutenção anual da tecnologia (US\$);  $F_t$ : Custo com combustível anual para a operação da tecnologia (US\$);  $i$ : Taxa de juros anual praticada;  $t$ : Ano de operação do sistema;  $T$ : Vida útil do gerador (em anos).

O custo de instalação de um gerador a diesel engloba a aquisição do equipamento, a construção da estrutura de distribuição da energia gerada e a mão de obra de instalação. Por outro lado, os custos operacionais envolvem a manutenção da máquina e a compra de combustível.

Com a finalidade de efetuar um cálculo que se aproxime de maneira mais precisa de uma situação real, a fórmula utilizada no Onset possui um segmento a parte destinada exclusivamente ao custo do combustível, representado na equação 4.10.

$$P_t = 2 \frac{P_d \cdot c \cdot t}{V} \frac{1}{LHV_d} \quad (4.10)$$

Onde  $P_t$ : Preço do combustível (em dólares) com a inclusão do gasto com transporte em US\$/kWh;  $P_d$ : Preço do combustível comprado na bomba em US\$/litro;  $c$ : Consumo de combustível do caminhão que fará o transporte em litro/h;  $t$ : Tempo de deslocamento da cidade mais próxima até a comunidade onde será utilizado o combustível;  $V$ : Volume transportado pelo caminhão em litros;  $LHV_d$ : Poder calorífico inferior do combustível em kWh/ litro.

Diante da obtenção do valor de  $P_t$ , determina-se o valor anual gasto com o combustível  $F_t$  a partir da equação 4.11.

$$F_t = \frac{E_t P_t}{LHV_d \cdot e} \quad (4.11)$$

$F_t$ : Preço final do combustível a ser calculado no LCOE (US\$);  $E_t$ : Energia anual gerada pelo sistema em kWh;  $e$ : Eficiência do gerador.

Em posse das ferramentas necessárias para o cálculo do LCOE relativo a cada uma das tecnologias empregadas no presente trabalho, deve-se focar na estrutura do código utilizado no projeto.

#### 4.2 ESTRUTURA DO CÓDIGO UTILIZADO NO PROJETO

O código empregado na elaboração do presente trabalho foi escrito na linguagem Python e consiste na aplicação de uma adaptação feita por Lima (2024) a partir do código fonte original do Onset. Optou-se pelo uso dessa adaptação em detrimento ao código em seu formato integral, pois ela dá ênfase ao cálculo do custo da geração de energia pela tecnologia descentralizada em uma determinada comunidade. A lógica de funcionamento do código em questão é exibida no diagrama da figura 9.

O ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) utilizado na elaboração do código em Python foi o Jupyter Notebook, uma vez que, tendo em vista a sua elevada extensão, optou-se por uma ferramenta que possibilitasse a exibição com maior facilidade, permitindo a divisão do código em células.

Definindo-se a linguagem e o ambiente em que o código foi escrito, buscou-se focar nas bibliotecas que seriam empregadas. E dentre elas, as mais importantes são Pandas, Geopandas, Fiona, numpy e Mathplotlib.

O Pandas, atualmente, consiste em uma das bibliotecas mais populares no que diz respeito à elaboração de projetos de ciência de dados, pois permite a criação e manipulação de DataFrames ajustáveis às necessidades do usuário (Pandas, 2025).

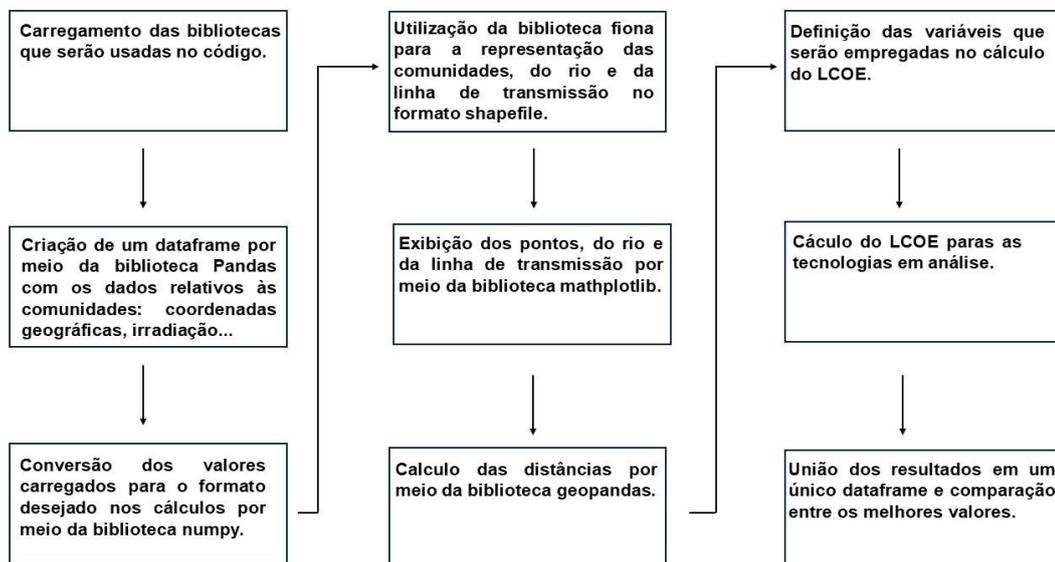
Já o Geopandas, por sua vez, é a biblioteca que torna possível a análise de informações espaciais em Python, ampliando os tipos de dados que podem ser usados pela biblioteca Pandas convencional, para que essa seja capaz de realizar operações espaciais, como cálculos de distâncias. Tais operações são realizadas pelo pacote shapely (Geopandas, 2025).

A biblioteca Fiona é a responsável por permitir a escrita de arquivos em formato de sistema de informações geográficas (GIS) com a linguagem Python, possibilitando a integração dos dados relativos a cada ponto de análise em um único arquivo no formato shapefile (Fiona, 2025). A biblioteca Numpy, por sua vez, realiza a conversão de valores e as operações com vetores ao longo do projeto (Numpy, 2025).

Posteriormente, buscou-se inserir as fórmulas do cálculo do LCOE adaptadas para cada uma das tecnologias em análise dentro da estrutura do código. Para que o resultado obtido incluísse o fator da passagem do tempo no custo e na geração descontada, foram utilizadas estruturas de controle características da linguagem Python como laços de repetição *for* e *while*.

E por fim, a biblioteca Mathplotlib torna possível a exibição dos dados em gráficos com uma tecnologia similar à da ferramenta Matlab, porém gratuita e adaptada à linguagem Python (Mathplotlib, 2025).

Figura 9 - Diagrama do funcionamento do código



Fonte: Autor (2025)

### 4.3 ESTUDO DE CASO

Diante do fato de uma parcela significativa da população amapaense não ter acesso à energia elétrica de maneira contínua, elaborou-se um estudo de caso com a finalidade aplicar o código em Python adaptado por Lima (2024) a uma situação hipotética de abastecimento de energia elétrica descentralizada em doze comunidades fictícias situadas próximo ao rio Matapi.

Para que a aplicação do código fosse realizada com êxito, além da necessidade do levantamento dos dados posicionais relativos a cada comunidade fictícia, foi definida a energia consumida anualmente, a velocidade dos ventos e a radiação anual

na localidade com a finalidade de obter-se um valor de LCOE que se aproximasse de um caso real para cada uma das tecnologias empregadas na análise.

Cabe mencionar também que o rio próximo às comunidades já teve o seu potencial hidrocínético avaliado por Cunha et al. (2009), tornando possível o estudo da geração de energia por meio de turbinas hidrocínéticas.

#### 4.3.1 Dados espaciais

De acordo com Lima (2024), para a aplicação do código baseado na ferramenta Onset é elementar que a região tomada como referência para o estudo obedeça determinadas premissas. E dentre elas, tem-se que as doze comunidades fictícias situadas no Estado do Amapá não devem ser posicionados a uma distância muito elevada entre si, como as comunidades situadas nos pontos exibidos na figura 10. Sendo estas, representadas por pontos que possuem coordenadas de latitude e longitude.

Outro elemento importante, tem a ver com fato de ser necessário o posicionamento de um ponto em uma cidade próxima às comunidades em análise, representado na figura 11, com o objetivo de tornar possível o cálculo do custo do transporte dos equipamentos. Deve-se representar o rio de onde será extraído o potencial hidrocínético e a linha de transmissão empregada no abastecimento da comunidade.

Figura 10 - Representação em GIS das comunidades fictícias

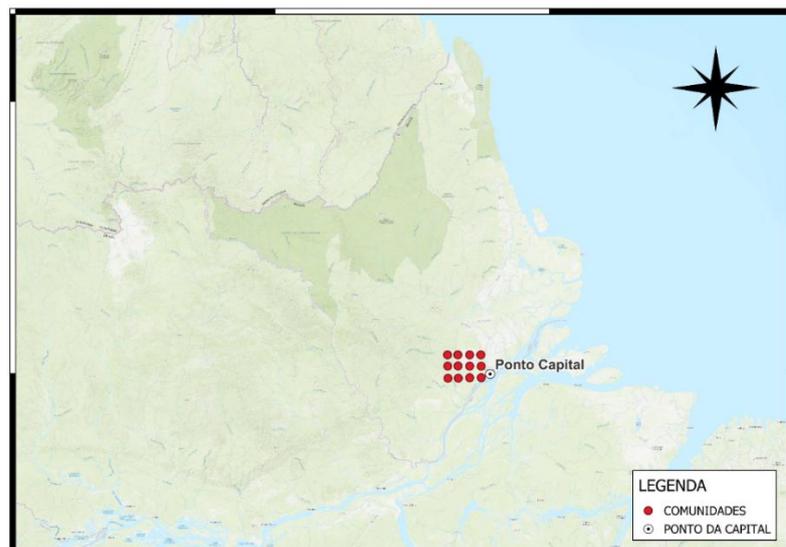
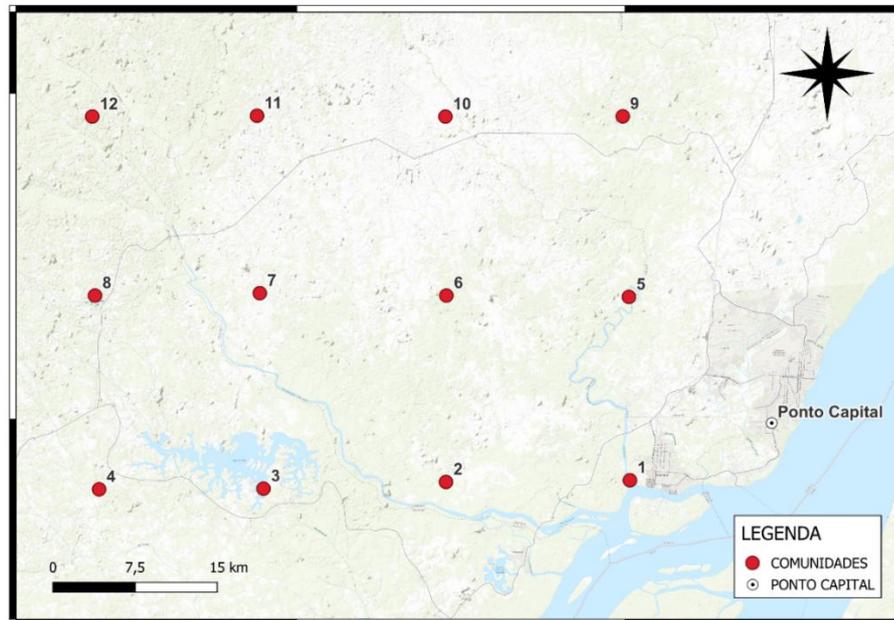
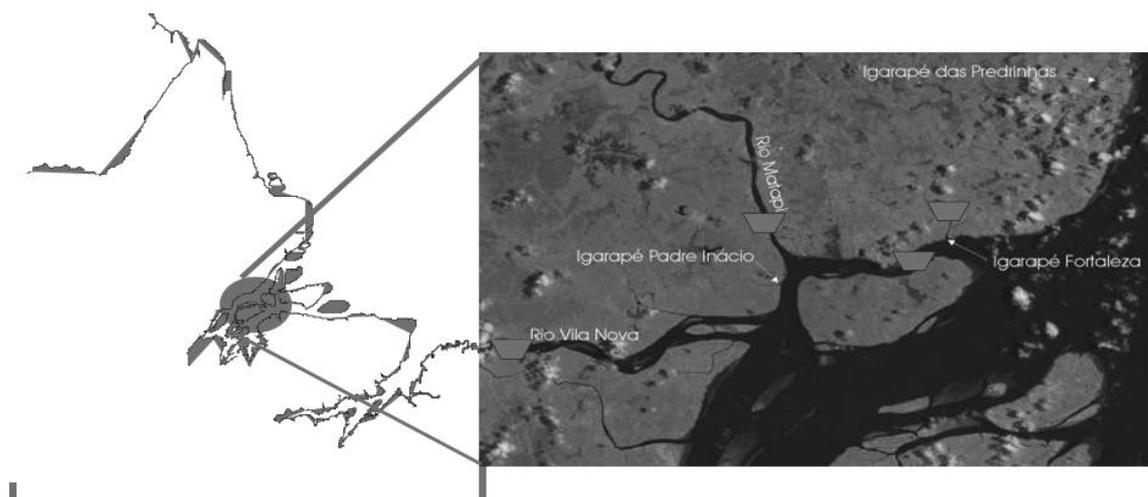


Figura 11 - Representação em GIS ampliada das comunidades fictícias



Fonte: Autor (2025)

Figura 12 - Representação da foz do Rio Matapi



Fonte: Da Cunha et al (2025)

Ao longo das próximas seções, serão demonstradas as coordenadas que foram utilizadas como base para a representação das comunidades, do rio representado na figura 12 e da linha de transmissão.

#### 4.3.2 Comunidades

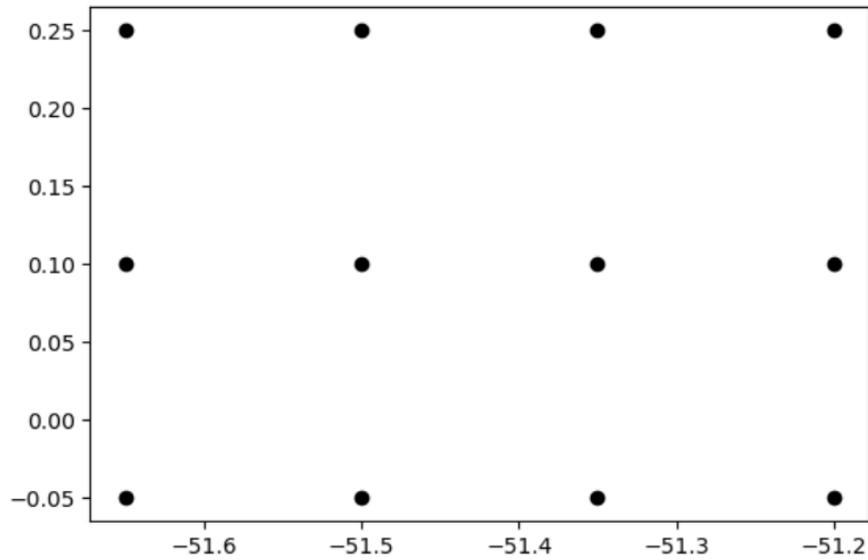
A escolha das comunidades foi feita de maneira que a distância entre elas, tanto longitudinalmente, quanto transversalmente fosse de aproximadamente 15 quilômetros. Para facilitar o cálculo das distâncias por meio da ferramenta do google maps, essas comunidades foram dispostas em um formato semelhante ao de uma matriz, com as coordenadas que representam a posição das últimas sendo exibidas na Tabela 1:

Tabela 1 - Coordenadas geográficas das comunidades

<b>Nome</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Comunidade 1	-0,05	-51,20
Comunidade 2	-0,05	-51,35
Comunidade 3	-0,05	-51,50
Comunidade 4	-0,05	-51,65
Comunidade 5	0,10	-51,20
Comunidade 6	0,10	-51,35
Comunidade 7	0,10	-51,50
Comunidade 8	0,10	-51,65
Comunidade 9	0,25	-51,20
Comunidade 10	0,25	-51,35
Comunidade 11	0,25	-51,50
Comunidade 12	0,25	-51,65

Fonte: Autor (2025)

Figura 13 - Representação das comunidades por meio da biblioteca Fiona no código Python



Fonte: Autor (2025)

### 4.3.3 Posicionamento do rio

Com a finalidade de representar o trecho do Rio Matapi analisado, de modo a guardar semelhança com a realidade, foram utilizados 94 pontos obtidos com o auxílio da ferramenta XYScan. Os pontos utilizados estão representados na Tabela 2. Todos os pontos estão disponíveis no Apêndice A.

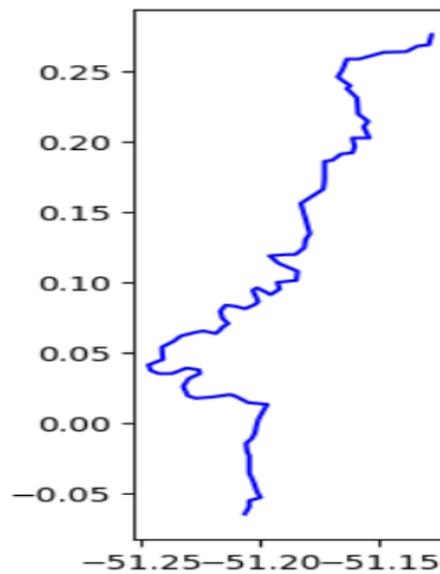
Tabela 2 - Coordenadas do rio Matapi obtidas com o XYscan

Ponto	Latitude	Longitude
1	-0,07	-51,21
2	-0,06	-51,20
3	-0,05	-51,20
4	-0,05	-51,20
5	-0,05	-51,20
6	-0,04	-51,20
7	-0,04	-51,20
8	-0,03	-51,20
9	-0,02	-51,20
10	-0,02	-51,21
11	-0,01	-51,21

12	-0,01	-51,20
13	-0,01	-51,20
14	0,00	-51,20
15	0,00	-51,20

Fonte: Autor (2025)

Figura 14 - Representação do rio por meio da biblioteca Fiona no código Python



Fonte: Autor (2025)

#### 4.3.4 Posicionamento da linha de transmissão

A ferramenta XYscan também foi utilizada para a obtenção dos pontos que descrevem a linha de transmissão que levará a energia gerada até as comunidades. Essa linha foi elaborada a partir de 124 pontos – representados parcialmente na Tabela 3 - para sua completa descrição. Todos os pontos estão representados no Apêndice B.

Tabela 3 - Coordenadas da linha de transmissão fictícia obtidas com o XYscan

Nome	Latitude	Longitude
1	0,11	-51,12
2	0,11	-51,12
3	0,12	-51,12

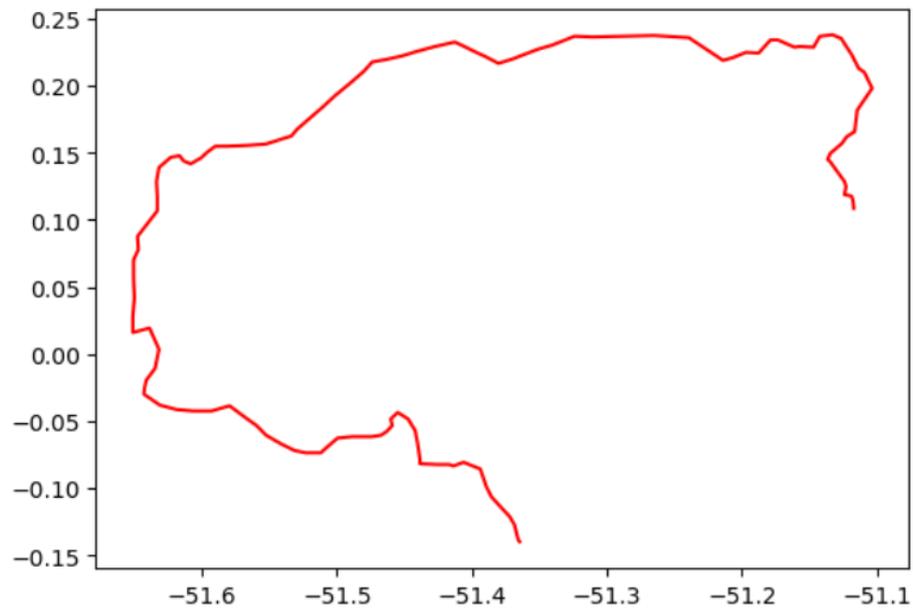
---

4	0,12	-51,12
5	0,12	-51,12
6	0,13	-51,12
7	0,14	-51,13
8	0,14	-51,13
9	0,15	-51,14
10	0,15	-51,13
11	0,16	-51,13
12	0,16	-51,12
13	0,17	-51,12
14	0,18	-51,11
15	0,20	-51,10

---

Fonte: Autor (2025)

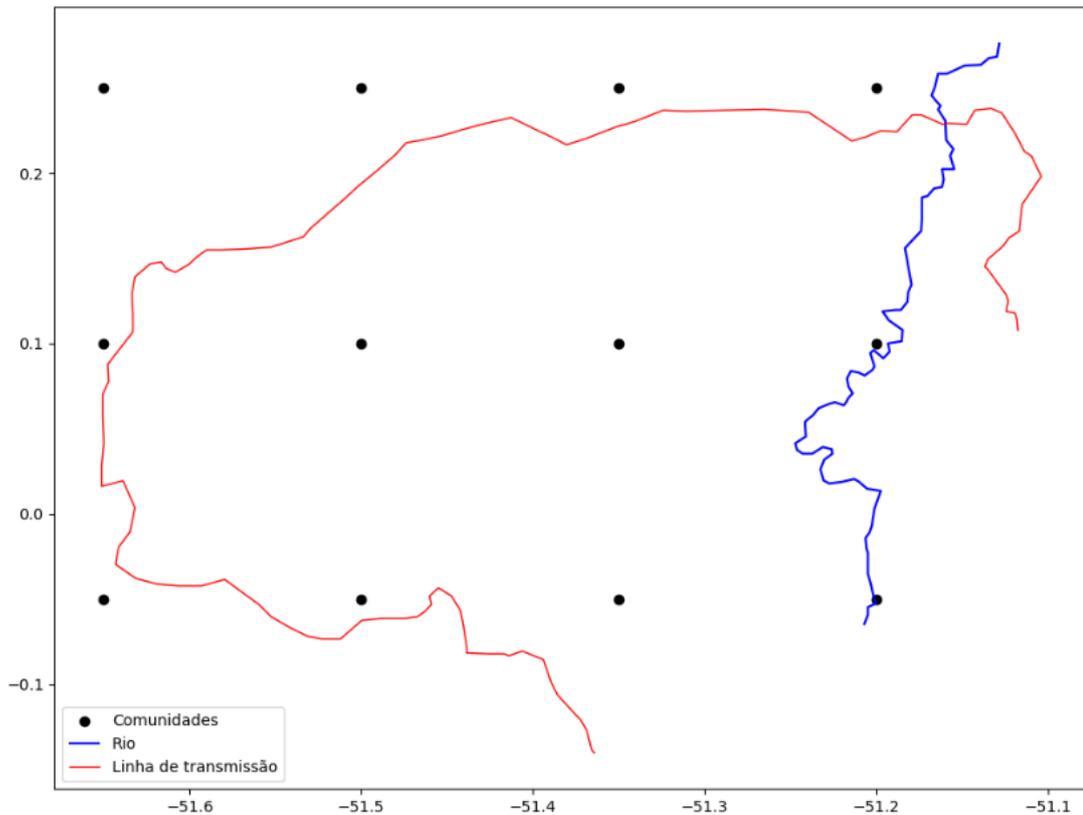
Figura 15 - Representação da linha de transmissão por meio da biblioteca Fiona no código Python



Fonte: Autor (2025)

Por último, tem-se a representação dos três elementos na figura 16 – comunidades, rio e linha de transmissão na mesma figura.

Figura 16 - Representação dos três elementos na mesma figura

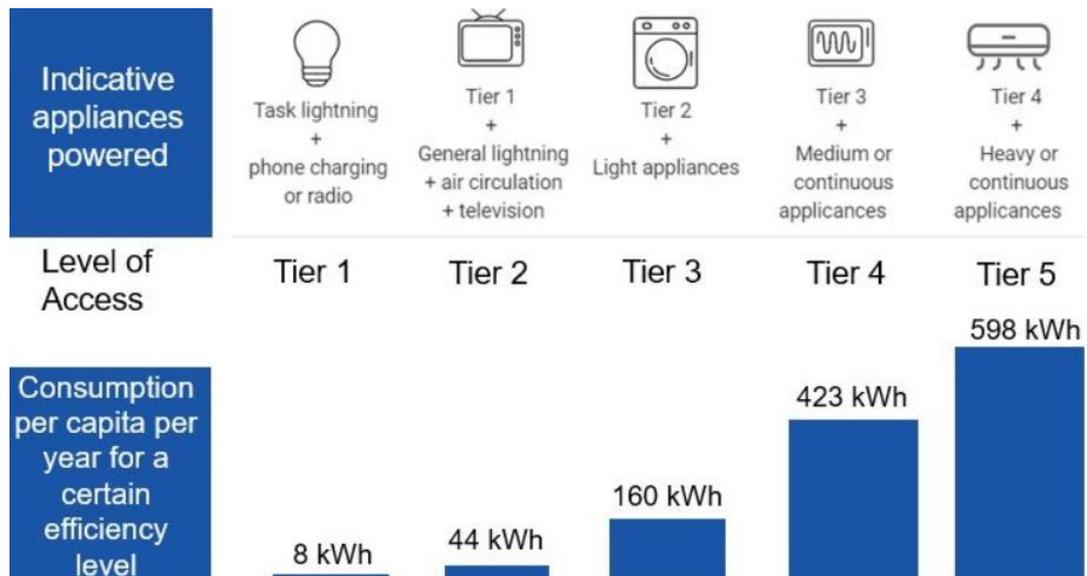


Fonte: Autor (2025)

#### 4.3.5 Carga anual

Com o intuito de determinar a carga anual demandada por cada comunidade, empregou-se a tabela elaborada por Sahlberg et al. (2019), a qual possui níveis de consumo de energia anual per capita medidos em quilowatt-hora. Os níveis variam de acordo com os aparelhos que serão utilizados pelos consumidores. Essa metodologia também é utilizada na ferramenta Onset e foi proposta pelo Global Tracking Framework com o objetivo de alcançar o sétimo objetivo da agenda 2030 da ONU.

Figura 17 - Níveis de consumo de energia per capita



Fonte: Sahlberg et al (2019)

A população das comunidades foi definida por meio da tendência de que o maior número de pessoas estivesse concentrado nas comunidades que ficam mais próximas à capital, por esse motivo, a população das comunidades 1 e 5 foi definida como sendo a que possui o maior número de indivíduos; ao passo que as comunidades 2,3,6,7,9,10 e 11 apresentam valores intermediários e as mais distantes – 4,8 e 12 -, o menor valor de população.

Outro fator, consiste no tier de energia no qual seus moradores estão agrupados, selecionando-se o tier 2 da Figura 16 (44 kWh), pelo fato de englobar serviços básicos como iluminação contínua, ventiladores e aparelhos de televisão. Dessa forma, a população de cada comunidade e a energia consumida ao longo de um ano estão representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - População e consumo anual de energia

Nome	Pessoas	Tier	Consumo per capita (kWh)	Consumo total (kWh)
Comunidade 1	200	2	44	8800
Comunidade 2	150	2	44	6600
Comunidade 3	100	2	44	4400

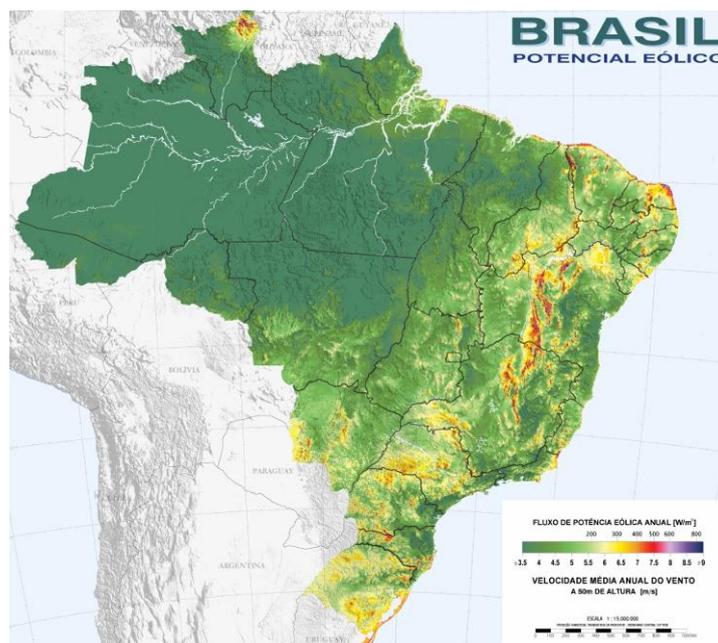
Comunidade 4	50	2	44	2200
Comunidade 5	200	2	44	8800
Comunidade 6	150	2	44	6600
Comunidade 7	100	2	44	4400
Comunidade 8	50	2	44	2200
Comunidade 9	150	2	44	6600
Comunidade 10	100	2	44	4400
Comunidade 11	100	2	44	4400
Comunidade 12	50	2	44	2200

Fonte: Autor (2025)

#### 4.3.6 Velocidade do vento na região

Para definir a velocidade do vento em um determinado ponto, diversos valores devem ser levados em consideração como: direção predominante dos ventos e as características de relevo da localidade em análise. Entretanto, tendo em vista que o presente projeto se trata de um estudo inicial, a velocidade do vento na região foi obtida a partir dos dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Crecesb, 2001).

Figura 18 - Atlas do potencial eólico brasileiro



Fonte: Crecesb (2001)

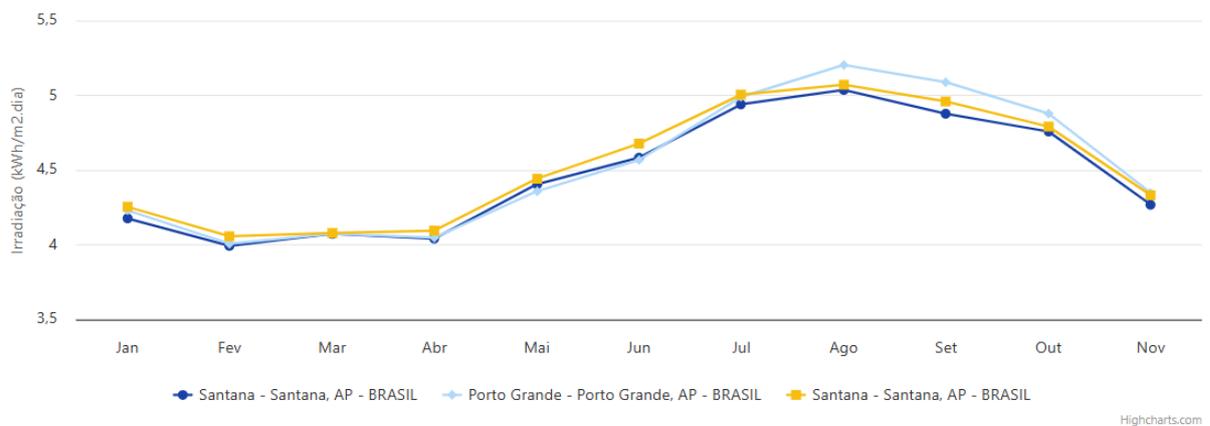
A partir do atlas, é possível constatar que a velocidade média anual do vento no local tomado como base para o estudo, corresponde a 3,5 m/s a uma altura de 50 metros. Dessa forma, considerou-se essa velocidade para cada uma das doze comunidades fictícias estudadas.

#### 4.3.7 Irradiação solar

A irradiação solar do local onde estão situadas as comunidades é útil na determinação da geração nominal anual de energia pelo sistema solar fotovoltaico de acordo com o método em análise proposto por Branker et al. (2011) e foi obtida por meio do Sundata do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRECESB).

Em um primeiro momento, determinou-se o valor médio da irradiação solar diária no plano horizontal para cada um dos pontos que representam as comunidades na Tabela 5.

Figura 19 - Irradiação solar mensal no plano horizontal na comunidade 9



Fonte: CRECESB (2025)

Tabela 5 - Irradiação solar diária no plano horizontal

Nome	Latitude	Longitude	Irradiação solar (kWh/m <sup>2</sup> .dia)
Comunidade 1	-0,05	-51,20	4,75
Comunidade 2	-0,05	-51,35	4,75

Comunidade 3	-0,05	-51,50	4,70
Comunidade 4	-0,05	-51,65	4,66
Comunidade 5	0,10	-51,20	4,73
Comunidade 6	0,10	-51,35	4,67
Comunidade 7	0,10	-51,50	4,58
Comunidade 8	0,10	-51,65	4,60
Comunidade 9	0,25	-51,20	4,69
Comunidade 10	0,25	-51,35	4,62
Comunidade 11	0,25	-51,50	4,49
Comunidade 12	0,25	-51,65	4,58

Fonte: Autor (2025)

Em seguida, multiplicou-se os valores de irradiação solar diários por 365, com o intuito de determinar-se esse valor para o intervalo de tempo correspondente a um ano, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - irradiação solar para o intervalo de tempo correspondente a um ano

<b>Nome</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Irradiação solar (kWh/m<sup>2</sup>.ano)</b>
Comunidade 1	-0,05	-51,20	1733,75
Comunidade 2	-0,05	-51,35	1733,75
Comunidade 3	-0,05	-51,50	1715,50
Comunidade 4	-0,05	-51,65	1700,90
Comunidade 5	0,10	-51,20	1726,45
Comunidade 6	0,10	-51,35	1704,55
Comunidade 7	0,10	-51,50	1671,70
Comunidade 8	0,10	-51,65	1679,00
Comunidade 9	0,25	-51,20	1711,85
Comunidade 10	0,25	-51,35	1686,30

Comunidade 11	0,25	-51,50	1638,85
Comunidade 12	0,25	-51,65	1671,70

Fonte: Autor (2025)

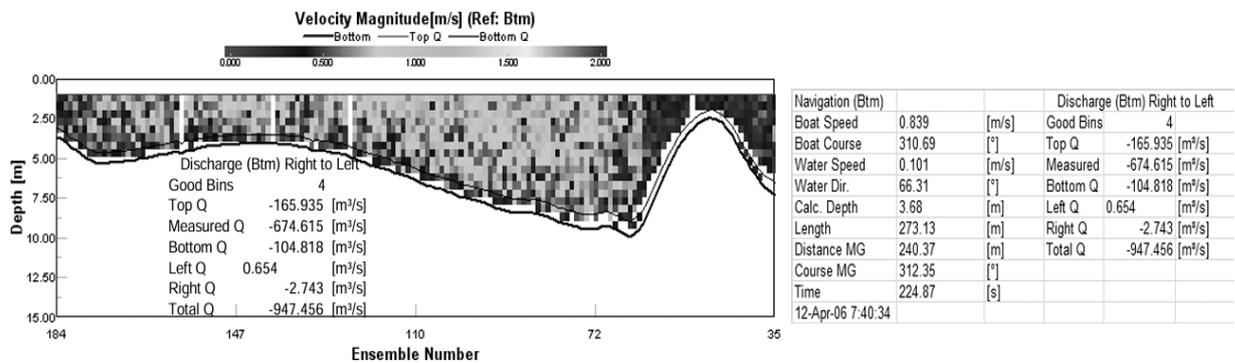
Obtendo-se, dessa forma, o valor de irradiação que será aplicado no código.

### 4.3.8 Velocidade do rio Matapi

A velocidade do rio próximo às comunidades - rio Matapi -, juntamente com a densidade da água e a sua profundidade, são fatores determinantes na análise da geração de energia por meio de turbinas hidrocínéticas.

Para tanto, os valores aplicados nesse projeto foram obtidos por Cunha et al. (2010), que por meio de um perfilador acústico doppler de corrente (ADCP) e do software de modelagem de escoamento CFX-11, constatou que a velocidade máxima do rio em análise a uma profundidade de 10 m chega em torno de 1 m/s.

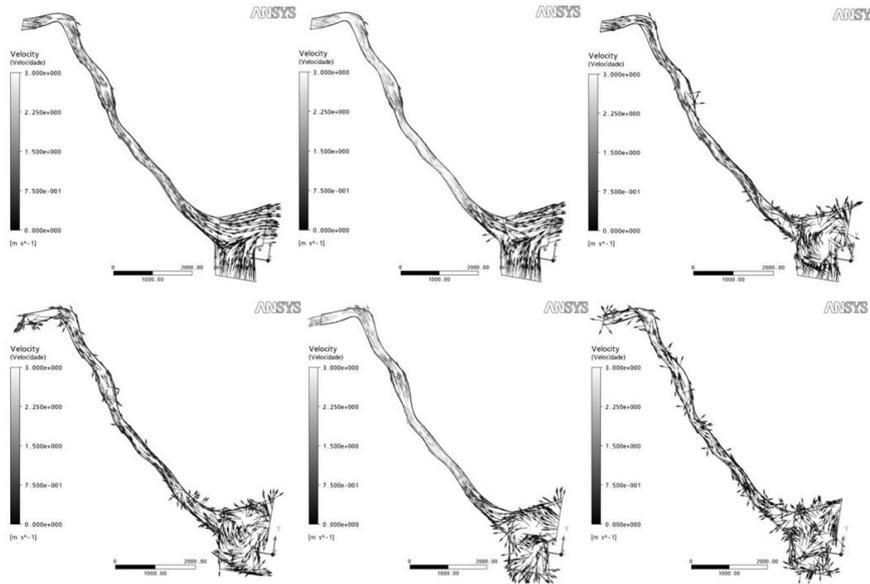
Figura 20 - Gráfico da velocidade do rio Matapi



Da Cunha et al (2025)

Pelo fato de um rio se tratar de um sistema físico complexo e a sua velocidade variar de acordo com os períodos de cheia e de vazão, adotou-se a velocidade de 1 m/s como referência para o presente estudo; e a densidade, por sua vez, foi estabelecida em 1000 kg/m³ para corresponder à densidade da água.

Figura 21 - Gráfico da velocidade na foz do rio Matapi



Da Cunha et al (2025)

**4.3.9 Localização e distância em relação à cidade mais próxima**

O Parâmetro da distância à cidade mais próxima influi no cálculo do LCOE para todas as tecnologias de geração em análise. As premissas empregadas basearam-se nas estipuladas por Lima (2024).

Definiu-se que a primeira comunidade seria a mais próxima do local onde as ferramentas seriam armazenadas. Nesse caso, considerou-se que essas seriam armazenadas próximo ao Campus Marco-zero da Universidade Federal do Amapá, situada na capital Macapá (ponto capital). Sendo o tempo de viagem do local de armazenamento até a primeira comunidade igual a uma hora.

Em seguida, calculou-se a distância em linha reta do ponto da capital até cada uma das comunidades por meio de uma das ferramentas de geolocalização do google.

A partir disso, estabeleceu-se a distância e o tempo em horas na Tabela 7 necessários para chegar-se à cada comunidade com o material.

Tabela 7 - Distância e tempo de viagem em relação à cidade mais próxima

Nome	Distância (km)	Tempo (em horas)
Comunidade 1	13,96	1,00
Comunidade 2	30,18	2,20

Comunidade 3	46,72	3,20
Comunidade 4	61,63	4,20
Comunidade 5	17,42	1,25
Comunidade 6	31,89	2,29
Comunidade 7	48,17	3,40
Comunidade 8	62,8	4,35
Comunidade 9	31,26	2,27
Comunidade 10	40,94	2,90
Comunidade 11	54,75	3,80
Comunidade 12	68,04	4,80

Fonte: Autor (2025)

#### 4.4 DADOS APLICADOS AO CÁLCULO DO LCOE PARA CADA TECNOLOGIA

Para que o cálculo do LCOE referente a cada tecnologia fosse realizado com êxito, foi necessário o levantamento individualizado dos dados relativos a cada uma das tecnologias apresentadas.

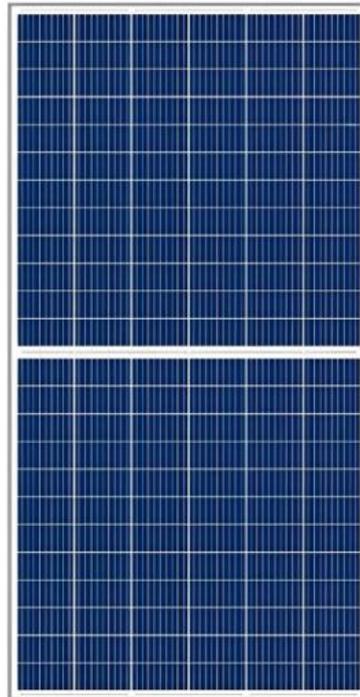
##### 4.4.1 Energia solar fotovoltaica

###### 4.4.1.1 Custo de Instalação

Para determinar o LCOE referente à energia solar fotovoltaica, primeiramente, foi necessário o dimensionamento do sistema a ser instalado. Para tanto, com o intuito de atender a demanda de cada comunidade, determinou-se que a potência gerada pelo sistema solar implantado seria de 3 kWp de acordo com a metodologia adotada por Lima (2024). Em seguida, definiu-se os módulos que seriam empregados.

O modelo de painel fotovoltaico selecionado para a pesquisa foi o painel policristalino da marca Canadian modelo 330 Wp – CS6U330, que possui as suas características descritas na Tabela 8:

Figura 22 - Painel Policristalino Canadian



Fonte: Canadian (2025)

Tabela 8 - Dados Painel Canadian

<b>Dados</b>	<b>Valor</b>
Potência (Wp)	330
Eficiência (%)	17,23
Área (m <sup>2</sup> )	1,94
Corrente de curto-circuito (A)	9,45
Tempo de vida (anos)	10
Preço (US\$)	146

Fonte: Canadian (2025)

Como a potência de cada painel da marca Canadian consiste em 330 Wp, a quantidade de painéis necessários para atender à demanda de 3 kWp corresponde a 10 painéis policristalinos.

A bateria empregada, por sua vez, foi a estacionária de chumbo-carbono, modelo 12V162AH da fabricante Moura. As suas especificações estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados da bateria utilizada

Dados	Valor
Tensão (V)	12
Capacidade Nominal (Ah)	162
Profundidade de carga (%)	60
Massa (kg)	42,60
Tempo de vida (anos)	5
Preço (US\$)	283

Fonte: Moura (2025)

Em seguida, foi calculado a energia armazenada pelo sistema por meio da equação:

$$E_a = \frac{E_c}{P_d} \quad (4.13)$$

Onde  $E_a$ : Energia armazenada pelo banco de baterias em kWh;  $E_c$ : Energia consumida diariamente kWh;  $P_d$ : Profundidade de carga da bateria em %.

A bateria em análise, apresenta uma profundidade de carga de 60%, de acordo com as especificações do fabricante. Esse fator, leva a uma energia armazenada igual a 10,185 kWh.

Tendo em vista a intermitência intrínseca aos sistemas solares fotovoltaicos, considerou-se que o sistema possui uma autonomia de dois dias, dessa forma, a energia armazenada corresponderá a 20,370 kWh.

Com o valor da energia armazenada, posteriormente, foi determinada a capacidade do banco de baterias:

$$C_B = \frac{E_a}{V_b} \quad (4.1)$$

Em que  $C_B$ : Capacidade do banco em Ah;  $E_a$ : Energia armazenada em kWh;  $V_b$ : Tensão do banco de baterias e V.

Com a finalidade de trabalhar-se com menores valores de corrente, estabeleceu-se que a tensão do banco de baterias ficaria em 24 V, dessa maneira, para o caso em tela, o valor da capacidade seria de 848,765 Ah.

Como a tensão do banco corresponde a 24 V, será necessário o emprego de duas baterias em série, haja vista que cada bateria apresenta uma tensão de 12 V. Já a determinação do número de baterias conectadas em paralelo, será obtida por meio da divisão da capacidade do banco pela capacidade individual de cada bateria, ou seja, 162 Ah. Esse valor corresponde a um número de 5 baterias em paralelo.

E por fim, para determinar o número total de baterias, basta multiplicar a quantidade de baterias demandadas em série pela quantidade de baterias demandadas em paralelo, o que resulta em um total de 10 baterias.

Como o valor individual de cada bateria fica em torno de US\$ 283,30, o custo total da construção do banco resulta em torno de US\$ 2.833,00.

Como a potência de cada painel consiste em 330 Wp, e serão empregados 10 painéis na consecução do projeto, a potência do inversor será obtida por meio do produto desses dois valores, resultado em 3.300 Wp. Contudo, de acordo com Ribeiro (2020), deve-se considerar um fator de segurança de 30 % no dimensionamento do inversor, o que resulta em um valor de 4.290 Wp.

Um inversor que atende a essa necessidade, é o Inversor 4210063 Primo 5.0 kW Monofásico 220V da fabricante Fronius.

Figura 23 - Inversor Fronius 4210063 Primo 5.0



Fonte: Fronius (2025)

Tabela 10 - Dados inversor Fronius

<b>Dados</b>	<b>Valor</b>
Potência (KW)	5
Corrente de curto-circuito (A)	18

Tensão monofásico (V)	220
Tempo de vida (anos)	5
Peso (KG)	21,5
Preço (US\$)	1538,40

Fonte: Fronius (2025)

É importante destacar que o investimento em placas solares, banco de baterias e inversor de frequência compreende o capital de instalação do projeto. Entretanto, na ausência de informações sobre a mão de obra de instalação e do suporte que será empregado na sustentação das placas, definiu-se o valor de US\$ 956,52 para essas despesas. Assim, o valor do custo de instalação pode ser observado na tabela 11:

Tabela 11 - Custo com equipamentos de instalação do sistema solar

<b>Equipamento</b>	<b>Custo (US\$)</b>
Placas solares	876,00
Banco de baterias	2.833,00
Inversor	1538,40
Suporte para as placas	434,78
Mão de obra de instalação	521,73

Fonte: Autor (2025)

De onde se tira que o custo total com a instalação do sistema resulta em US\$ 6.203,91.

#### 4.4.1.2 Custo de operação

Para o cálculo do custo de operação, utilizou-se o mesmo critério adotado por Lima (2024), o qual considerou o gasto anual com a operação do sistema igual a 5 % do valor do capital de instalação, o que resulta em US\$ 310,20 por ano. Além disso, esse custo também engloba os gastos com as trocas de Bateiras e inversores a cada cinco anos, o que resulta em um custo adicional de US\$ 4.371,40 ao final do tempo de vidas desses componentes.

#### 4.4.2 Energia eólica

Para a determinação do LCOE referente à geração de energia descentralizada por meio de turbinas eólicas, foram utilizados os dados presentes no artigo produzido por Kolhe et al. (2015) que apresenta o valor do custo de instalação, bem como o custo de operação de cada componente de um sistema de geração eólico de energia de 10 kW baseado nas turbinas da marca Hummer H8.0–10 kW. Assim, os dados referentes ao sistema e ao custo de instalação consistem em, segundo a Tabela 12:

Tabela 12 - Dados da turbina Hummer H8.0–10 kW

<b>Dados</b>	<b>Valor</b>
Potência (kW)	10
Área da seção do rotor (m <sup>2</sup> )	50
Tempo de vida (anos)	20

Fonte: Kolhe et al (2015)

Tabela 13 - Custo dos componentes da turbina Hummer H8.0–10 kW

<b>Componente</b>	<b>Valor (US\$)</b>
Turbina	20.000,00
Bateria	1.400,00
Inversor	4.000,00
Instalação	480,00

Fonte: Kolhe et al (2015)

O custo total de instalação resulta em US\$ 25.880,00. Já o custo anual de operação do sistema, também determinado de acordo com Kolhe et al. (2015), foi estabelecido em US\$ 500,00.

#### 4.4.3 Geração por meio de turbinas hidrocínéticas

A determinação do LCOE para a geração por meio de turbinas hidrocínéticas foi feita com base nos trabalhos de Nunes et al. (2023) e de Lima (2024). Nessas pesquisas, tomou-se como base a microturbina do modelo Geração 2 desenvolvida na

Universidade de Brasília (UNB). De acordo com Nunes et al. (2023), os dados da turbina empregada estão na Tabela 14:

Tabela 14 – Dados da microturbina Geração 2

<b>Dados</b>	<b>Valor</b>
Fator de potência (%)	55
Eficiência de transmissão (%)	98
Eficiência dos rolamentos (%)	98
Eficiência do gerador (%)	98
Tempo de vida (anos)	10
Área da seção do rotor (m <sup>2</sup> )	7,07

Fonte: Nunes et al (2023)

Posteriormente, ainda segundo Nunes et al. (2023), o valor relativo ao custo de instalação para o modelo de microturbina considerado é de US\$ 13.000,00, sendo exibido na Tabela 15:

Tabela 15 - Custos de instalação da turbina Geração 2

<b>Componente</b>	<b>Valor (US\$)</b>
Turbina	4.000,00
Estrutura	3.000,00
Agenda ambiental	3.000,00
Montagem	1.500,00
Mão de obra	1.500,00

Fonte: Nunes et al (2023)

Já os valores anuais do custo de operação, também foram determinados a partir de Nunes et al. (2023), totalizando US\$ 4.553,95, de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Custo de operação da turbina Geração 2

<b>Componente</b>	<b>Valor (US\$)</b>
Operador	3.883,83
Seguro	250,00

Manutenção	315,00
Suprimentos	105,00

Fonte: Nunes et al (2023)

Um dado que chama atenção é o elevado fator de potência da máquina. Isso ocorre, segundo Nunes et al. (2023), pois a microturbina faz uso de um difusor. Outra característica importante, foi que se considerou o custo de instalação de uma linha de transmissão que partiria da estrutura de geração com a microturbina até cada uma das comunidades em análise. Sendo o custo dessa linha, fixado em US\$ 2.500,00.

#### 4.4.4 Geração a diesel

No cálculo do LCOE da tecnologia de geração a diesel, foram utilizados os dados disponíveis nos artigos de Bacha et al. (2024), Nadimi et al. (2023) e da própria ferramenta Onset (2020). De acordo com Bacha et al. (2024), o gerador a diesel analisado possui as seguintes especificações disponíveis na Tabela 17:

Tabela 17 - Dados do gerador

Componente	Valor
Potência (kW)	4
Tempo de vida (horas)	24.000

Fonte: Bacha et al (2024)

Considerando que o gerador a diesel implantado nas comunidades opera durante 16 horas por dia, seu tempo de vida útil consiste em aproximadamente 4 anos. Assumiu-se para a máquina uma eficiência correspondente a 30 %, equivalente à adotada no código original do Onset. Já o custo de instalação, bem como o valor de operação, foi estabelecido em, respectivamente, US\$ 4.000,00 e US\$ 992,8. Essas informações foram obtidas com base no trabalho de Nadimi et al. (2023). Já os valores referentes ao poder calorífico do combustível, preço pago por litro, volume máximo transportado por viagem e consumo durante o transporte foram extraídos da ferramenta Onset, representado na Tabela 18.

Tabela 18 - Dados do transporte de combustível

Dado	Valor
Poder calorífico (kWh/L)	2,52
Preço do combustível (US\$/L)	1,00
Volume transportado por viagem (L)	300
Consumo durante o transporte (L/h)	140

Fonte: Onssset (2020)

#### 4.4.5 Dados relativos ao transporte das tecnologias off-grid

Nesta etapa do projeto, foi considerado o custo do transporte das tecnologias do ponto onde elas foram armazenadas, ou seja, na capital Macapá, até cada uma das comunidades. Em virtude da possibilidade de acesso por meio de vias terrestres, foi definido, de acordo com os dados do código fonte da ferramenta Onssset (2020), que o transporte por terra consistiria em US\$ 3.000,00 por quilometro.

#### 4.4.6 Taxa de desconto

Os valores dos custos de instalação e de operação de cada projeto na metodologia LCOE variam de acordo com o tempo de funcionamento, sendo denominados, portanto, de instalação e de operação descontadas. Dessa forma, no presente trabalho, considerou-se como taxa de desconto a taxa Selic vigente no mês de fevereiro de 2025, a qual consiste em 14,25 % ao ano de acordo com o Banco Central do Brasil (BCB).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados relativos às características geográficas das comunidades e às especificações de cada tecnologia empregada foram aplicados ao código em Python adaptado por Lima (2023) a partir do código fonte do Onset (2023), com a finalidade de determinar a melhor alternativa de geração para cada comunidade.

Dessa forma, buscou-se focar primeiramente nas melhores opções de geração de energia segundo o indicador custo nivelado de energia (LCOE); e posteriormente, fez-se uma análise mais abrangente sobre cada uma das tecnologias utilizadas.

### 5.1 MELHORES OPÇÕES PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA EM CADA COMUNIDADE SEGUNDO A METODOLOGIA LCOE

De acordo com os resultados gerados a partir do código em Python, a melhor opção de geração para cada uma das comunidades foi representada na Tabela 19:

Tabela 19 - Resultado Melhor opção de geração para as comunidades

<b>Local</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Equipamento</b>	<b>LCOE (US\$/kWh)</b>
Comunidade 1	Solar	Canadian CS6U330	2,45
Comunidade 2	Turb. Hidrocinética	Generation2	4,17
Comunidade 3	Turb. Hidrocinética	Generation2	6,59
Comunidade 4	Solar	Canadian CS6U330	9,37
Comunidade 5	Solar	Canadian CS6U330	2,96
Comunidade 6	Turb. Hidrocinética	Generation2	4,05
Comunidade 7	Turb. Hidrocinética	Generation2	6,49
Comunidade 8	Solar	Canadian CS6U330	9,67
Comunidade 9	Turb. Hidrocinética	Generation2	3,48
Comunidade 10	Turb. Hidrocinética	Generation2	5,62

Comunidade 11	Turb. Hidrocinética	Generation2	7,21
Comunidade 12	Solar	Canadian CS6U330	10,48

Fonte: Autor (2025)

A partir da tabela, é possível perceber que no universo das doze comunidades analisadas, sete apresentam o melhor valor de LCOE para a energia gerada a partir da tecnologia hidrocinética, ao passo que cinco, por sua vez, apresentam o melhor resultado para a tecnologia solar fotovoltaica. Fato que já era esperado, pois a energia hidrocinética e a solar apresentam um menor custo de instalação em relação às demais, além de possuir um baixo valor de manutenção anual. Observa-se também que os pontos com menores valores de irradiação, tem como melhor tecnologia de a hidrocinética, pelo fato de a energia gerada pelos módulos ser menor, de acordo os parâmetros empregados.

É importante destacar também, a influência da distância no valor obtido para LCOE. Pois, nota-se que os menores valores de LCOE determinados pelo código em Python foram para as comunidades mais próximas ao ponto de armazenamento do material, situado na cidade de Macapá, tendo-se uma diferença de 3,73 US\$/kWh em relação ao maior valor (comunidade 11) e o menor valor (comunidade 9) - para as turbinas hidrocinéticas; e 8,02 US\$/kWh em relação ao maior valor (comunidade 12) e o menor valor (comunidade 1) - para a energia solar.

## 5.2 VALORES DE LCOE OBTIDOS PARA AS DEMAIS TECNOLOGIAS

A presente seção busca apresentar os resultados de LCOE referentes às demais tecnologias empregadas na análise. Para tanto, elaborou-se a Tabela 20 com os valores médios de LCOE para cada tecnologia:

Tabela 20 - Valor médio de LCOE par a cada uma das tecnologias empregadas

<b>Tecnologia</b>	<b>Valo médio LCOE (US\$/kWh)</b>
Diesel	75,77
Hidrocinética	6,44
Solar	6,63

Eólica	37,64
--------	-------

Fonte: Autor (2025)

Por meio da análise dos valores médios, é possível constatar que as gerações a diesel e de turbinas eólicas apresentaram um pior desempenho em relação à solar e à hidrocínética. Tal fato se deve, no caso da energia a diesel, ao elevado custo de operação em virtude do gasto com o combustível e com o seu transporte. Já na eólica, esse baixo desempenho ocorre por conta das turbinas utilizadas no estudo não serem as mais adequadas para o atendimento da energia consumida nas comunidades. Além disso, outro fator que contribui negativamente para o uso dessa tecnologia, tem a ver com a baixa velocidade dos ventos predominante nessa localidade.

Destaca-se também a proximidade entre os valores médios de LCOE para as tecnologias hidrocínética e solar. E que caso houvesse uma aplicação em uma perspectiva prática, as últimas seriam as melhores opções.

E por fim, tem-se a Tabela 21 que representa o valor de LCOE para cada uma das tecnologias analisadas:

Tabela 21 - Valor de LCOE para cada tecnologia

<b>Comunidade</b>	<b>LCOE diesel (US\$/kWh)</b>	<b>LCOE hidrocínética (US\$/kWh)</b>	<b>LCOE solar (US\$/kWh)</b>	<b>LCOE eólica (US\$/kWh)</b>
Comunidade 1	26,56	3,18	2,45	14,41
Comunidade 2	54,74	4,17	4,75	27,70
Comunidade 3	83,38	6,59	7,16	41,25
Comunidade 4	109,24	10,93	9,37	53,46
Comunidade 5	32,57	3,20	2,96	17,25
Comunidade 6	57,70	4,05	5,08	29,10
Comunidade 7	85,94	6,49	7,56	42,44
Comunidade 8	111,30	10,83	9,67	54,42
Comunidade 9	56,62	3,48	4,96	28,58

---

Comunidade 10	73,40	5,62	6,45	36,51
Comunidade 11	97,34	7,21	8,70	47,83
Comunidade 12	120,44	11,59	10,48	58,71

---

Fonte: Autor (2025)

## 6 CONCLUSÃO

Em um primeiro momento, constata-se que somente as tecnologias de geração descentralizada solar e hidrocínética apresentam um custo-benefício que torna viável a sua aplicação nas comunidades em análise. Assim, o processo de eletrificação na localidade, em uma perspectiva prática, ficaria entre a tecnologia solar e a hidrocínética. Portanto, para o caso em tela, infere-se que os modelos de geração a diesel e de turbinas eólicas não apresentam viabilidade por conta do elevado custo na sua aplicação e um baixo retorno na geração de energia.

Tomando-se como referência os sistemas solares e de turbinas hidrocínéticas, é possível perceber por mais que o modelo baseado em turbinas hidrocínéticas seja o que possui menor valor de LCOE para a maioria das comunidades, a diferença desse modelo para solar não é significativa, chegando a 0,24 US\$/kWh na comunidade 5. Dessa maneira, a escolha da tecnologia de eletrificação a ser empregada nas comunidades não fica restrita ao LCOE para esses dois métodos, de forma que outros fatores precisariam ser considerados para os pontos que representam as comunidades.

No que diz respeito ao LCOE referente à tecnologia eólica e à diesel, percebe-se que o elevado valor desse parâmetro para a primeira tecnologia tem a ver com a velocidade do vento observada na localidade, uma vez que essa não é satisfatória para o modelo de turbina eólica empregada, sendo necessárias diversas turbinas do modelo Hummer H8.0–10 kW para gerar a energia consumida demandados por cada comunidade, o que contribui de maneira significativa para o custo de instalação e conseqüentemente, aumento do LCOE. Já no caso da tecnologia baseada em gerador a diesel, constata-se que a maior parte do custo tem a ver com o consumo e com o transporte do combustível necessário para a operação do gerador, que torna esse método o menos indicado para a eletrificação das comunidades.

Posteriormente, deve-se mencionar as melhorias que podem ser implementadas no código em seu formato atual. Uma delas, consiste na utilização de informações de comunidades reais existentes no Estado, haja vista que o projeto atual é integralmente baseado em um caso hipotético. Soma-se a isso, a necessidade de um maior refinamento nos dados da velocidade do rio em análise, uma vez que o seu valor na prática não é constante e varia de acordo com a profundidade e o horário do dia. Essas variações poderiam futuramente ser incorporadas à estrutura do código

com o intuito de garantir um valor mais preciso de LCOE para as turbinas hidrocinéticas.

Outra melhoria, está relacionada à construção de uma interface mais favorável à inserção de dados por parte do usuário, pois no estado atual do código, a sua modificação requer uma noção de programação em Python e de suas bibliotecas. Portanto, a criação dessa interface tornaria mais simples a análise de LCOE para outros pontos e por um maior número de pessoas.

## REFERÊNCIAS

ANEEL. Acompanhamento das centrais geradoras eólicas, 2024. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br>. Acesso em: 25 Março 2025.

ANEEL. Micro e minigeração distribuída de energia elétrica cresceu 8,85 GW em 2024, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025>. Acesso em: 28 de Abril 2025.

BACHA, B. *et al.* Optimal sizing of a hybrid microgrid system using solar, wind, diesel, and battery energy storage to alleviate energy poverty in a rural area of Biskra, Algeria. **Journal of Energy Storage**, Fevereiro 2024.

BCB. Taxa Selic, 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 25 Março 2025.

BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Dezembro 2011., p. 4470-4482

CRECESB. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. Disponível em: [https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf). Acesso em: 25 Março 2025.

CRECESB. Sundata, 2025. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 25 Março 2025.

DA CUNHA, A. C. *et al.* SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO: ESTUDO DA FOZ DO RIO MATAPI NO BAIXO RIO. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Setembro 2010., p. 139-148

ELS, R. H. V.; JUNIOR, A. C. P.; VIANNA, J. N. D. S. INSTALAÇÃO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS: VIABILIDADE. **Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, Salvador, 30 Maio 2008.

ELS, R. V.; VIANNA, J.; BRASIL, A. The Brazilian experience of rural electrification in the Amazon with decentralized generation - The need to change the paradigm from electrification to development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012., p. 1450-1461

FIONA. User Manual, 2025. Disponível em: <https://fiona.readthedocs.io/en/stable/manual.html>. Acesso em: 25 Março 2025.

GOPANDAS. User Guide, 2025. Disponível em: <https://geopandas.org/en/stable/docs.html>. Acesso em: 25 Março 2025.

HARRY, J. H. Protótipo de um cata-àgua que gera 1 Kw de eletricidade. **Acta Amazonica**, Dezembro 1985., p. 403–412

IEMA. Amapá tem 25,5 mil pessoas sem acesso à energia elétrica todos os dias, 2021. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/>. Acesso em: 25 Março 2025.

IRENA. Renewable energy technologies: Cost analysis series volume 1: Power sector-hydropower. **Green Energy and Technology**, 2012.

KOLHE, M. L.; RANAWEERA, K. M. I. U.; GUNAWARDANA, A. G. B. S. Techno-economic sizing of off-grid hybrid renewable energy system for. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 22 Março 2015., p. 53–64

LIMA, T. Z. F. Desenvolvimento de código computacional de planejamento geoespacial para implantação de tecnologias off-grid em assentamentos na Amazônia (Tese). **Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UNB**, 2024.

MATHPLOLIB. Quick User Guide, 2025. Disponível em: [https://matplotlib.org/stable/users/explain/quick\\_start.html](https://matplotlib.org/stable/users/explain/quick_start.html). Acesso em: 25 Março 2025.

MATSUMOTO, R.; SANTOS, E. Dibb – Dimensionador De Banco De Baterias (TESE). **Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná – UFPR**, 2010.

MENTIS, D. Lighting the World: the first application of an open source, spatial electrification tool (OnSSET) on Sub-Saharan Africa, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa7b29>. Acesso em: 2025 Março 2025.

NADIMI, R.; GOTO, M.; TOKIMATSU, K. The impact of diesel operation time constraint on total cost of diesel-based hybrid renewable power system simulation model. **Renewable Energy Focus**, 2023., p. 40–55

NATIONAL GEOGRAPHIC. GIS (Geographic Information System), 2024. Disponível em: <https://education.nationalgeographic.org/resource/geographic-information-system-gis/>. Acesso em: 25 Março 2025.

NUMPY. Numpy User Guide. Disponível em: <https://numpy.org/doc/2.2/user/index.html>. Acesso em: 25 Março 2025.

NUNES, M. M. *et al.* Levelized cost of electricity for hydrokinetic turbines. **IEEE Latin America Transaction**, Setembro 2023.

ONSSET. The ONSSET Model, 2020. Disponível em: [https://onsset.readthedocs.io/en/latest/OnSSET\\_model.html](https://onsset.readthedocs.io/en/latest/OnSSET_model.html). Acesso em: 25 Março 2025.

PANDAS. Getting Started, 2025. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>. Acesso em: 25 Março 2025.

PINHEIRO, G. *et al.* Eletrificação rural de consumidores isolados – um modelo de gestão sustentável baseado em biomassa de resíduos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, Julho 2012., p. 78-85

RIBEIRO, V. Dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico das áreas comuns de um condomínio multifamiliar (TESE). **Universidade Candido Mendes Graduação Em Engenharia Civil**, 2020.

SAHLBERG, A.; KHAVARI, B. Application of GIS in electrification analysis in the OnSSET tool, 2019. Disponível em: [https://onsset.github.io/teaching\\_kit/courses/module\\_2/Lecture%203/](https://onsset.github.io/teaching_kit/courses/module_2/Lecture%203/). Acesso em: 25 Março 2025.

SOARES, D. Análise de projetos de montagem de turbinas eólicas (tese). Departamento de Engenharia Mecânica (Tese). **Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará - UFC**, 2017.

UN. Sustainable Development Goal 7, 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals/goal7#overview>. Acesso em: 25 Março 2025.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – COORDENADAS DO RIO

Nome	Latitude	Longitude
1	-0,0653	-51,2070
2	-0,0592	-51,2047
3	-0,0548	-51,2047
4	-0,0526	-51,2000
5	-0,0487	-51,2014
6	-0,0421	-51,2028
7	-0,0351	-51,2047
8	-0,0290	-51,2047
9	-0,0229	-51,2047
10	-0,0203	-51,2056
11	-0,0141	-51,2061
12	-0,0111	-51,2038
13	-0,0067	-51,2023
14	-0,0032	-51,2019
15	0,0029	-51,2009
16	0,0095	-51,1986
17	0,0134	-51,1972
18	0,0147	-51,2052
19	0,0191	-51,2103
20	0,0204	-51,2127
21	0,0187	-51,2202
22	0,0178	-51,2272
23	0,0195	-51,2305
24	0,0261	-51,2324
25	0,0318	-51,2301
26	0,0353	-51,2254
27	0,0379	-51,2258
28	0,0392	-51,2310

---

29	0,0353	-51,2371
30	0,0353	-51,2427
31	0,0375	-51,2460
32	0,0414	-51,2470
33	0,0453	-51,2409
34	0,0515	-51,2413
35	0,0541	-51,2413
36	0,0580	-51,2366
37	0,0620	-51,2334
38	0,0646	-51,2272
39	0,0655	-51,2240
40	0,0646	-51,2211
41	0,0637	-51,2188
42	0,0655	-51,2174
43	0,0681	-51,2160
44	0,0707	-51,2136
45	0,0746	-51,2160
46	0,0768	-51,2164
47	0,0794	-51,2169
48	0,0838	-51,2146
49	0,0829	-51,2103
50	0,0812	-51,2066
51	0,0843	-51,2023
52	0,0864	-51,2009
53	0,0943	-51,2033
54	0,0961	-51,2014
55	0,0930	-51,1977
56	0,0913	-51,1958
57	0,0952	-51,1920
58	0,1000	-51,1930
59	0,1013	-51,1850
60	0,1079	-51,1845
61	0,1136	-51,1925

---

---

62	0,1188	-51,1962
63	0,1197	-51,1887
64	0,1197	-51,1854
65	0,1245	-51,1817
66	0,1302	-51,1812
67	0,1345	-51,1793
68	0,1560	-51,1831
69	0,1660	-51,1737
70	0,1730	-51,1732
71	0,1800	-51,1732
72	0,1857	-51,1732
73	0,1866	-51,1699
74	0,1910	-51,1662
75	0,1918	-51,1615
76	0,1962	-51,1605
77	0,2023	-51,1615
78	0,2023	-51,1544
79	0,2102	-51,1568
80	0,2141	-51,1549
81	0,2194	-51,1591
82	0,2308	-51,1596
83	0,2373	-51,1638
84	0,2395	-51,1624
85	0,2426	-51,1652
86	0,2456	-51,1676
87	0,2504	-51,1657
88	0,2583	-51,1638
89	0,2583	-51,1587
90	0,2631	-51,1483
91	0,2636	-51,1389
92	0,2675	-51,1342
93	0,2684	-51,1295
94	0,2767	-51,1281

---

## APÊNDICE B – COORDEANDAS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Nome	Latitude	Longitude
1	0,1074	-51,1172
2	0,1139	-51,1178
3	0,1178	-51,1189
4	0,1189	-51,1242
5	0,1249	-51,1230
6	0,1287	-51,1242
7	0,1369	-51,1301
8	0,1434	-51,1348
9	0,1451	-51,1366
10	0,1495	-51,1348
11	0,1571	-51,1260
12	0,1620	-51,1225
13	0,1658	-51,1166
14	0,1817	-51,1148
15	0,1981	-51,1037
16	0,2101	-51,1095
17	0,2128	-51,1136
18	0,2232	-51,1189
19	0,2314	-51,1242
20	0,2352	-51,1266
21	0,2380	-51,1330
22	0,2369	-51,1424
23	0,2287	-51,1471
24	0,2292	-51,1577
25	0,2287	-51,1612
26	0,2342	-51,1736
27	0,2342	-51,1789
28	0,2270	-51,1853
29	0,2243	-51,1877
30	0,2249	-51,1971

---

31	0,2210	-51,2065
32	0,2189	-51,2141
33	0,2358	-51,2394
34	0,2374	-51,2652
35	0,2363	-51,3104
36	0,2369	-51,3240
37	0,2303	-51,3404
38	0,2270	-51,3516
39	0,2243	-51,3586
40	0,2199	-51,3698
41	0,2167	-51,3804
42	0,2216	-51,3898
43	0,2254	-51,3980
44	0,2298	-51,4068
45	0,2325	-51,4127
46	0,2292	-51,4273
47	0,2254	-51,4414
48	0,2221	-51,4520
49	0,2194	-51,4644
50	0,2178	-51,4738
51	0,2107	-51,4802
52	0,2019	-51,4902
53	0,1926	-51,5014
54	0,1839	-51,5108
55	0,1773	-51,5184
56	0,1675	-51,5296
57	0,1626	-51,5337
58	0,1566	-51,5525
59	0,1555	-51,5678
60	0,1549	-51,5813
61	0,1549	-51,5901
62	0,1505	-51,5960
63	0,1462	-51,6007

---

---

64	0,1418	-51,6083
65	0,1440	-51,6136
66	0,1478	-51,6165
67	0,1467	-51,6230
68	0,1391	-51,6318
69	0,1287	-51,6336
70	0,1172	-51,6330
71	0,1068	-51,6330
72	0,0877	-51,6477
73	0,0779	-51,6471
74	0,0702	-51,6506
75	0,0566	-51,6506
76	0,0418	-51,6500
77	0,0281	-51,6512
78	0,0216	-51,6512
79	0,0161	-51,6512
80	0,0194	-51,6388
81	0,0036	-51,6318
82	-0,0107	-51,6347
83	-0,0194	-51,6412
84	-0,0249	-51,6424
85	-0,0298	-51,6430
86	-0,0380	-51,6312
87	-0,0413	-51,6189
88	-0,0423	-51,6065
89	-0,0423	-51,5983
90	-0,0423	-51,5930
91	-0,0385	-51,5795
92	-0,0473	-51,5678
93	-0,0533	-51,5595
94	-0,0604	-51,5525
95	-0,0669	-51,5413
96	-0,0719	-51,5313

---

---

97	-0,0735	-51,5231
98	-0,0735	-51,5119
99	-0,0713	-51,5096
100	-0,0626	-51,4996
101	-0,0615	-51,4884
102	-0,0615	-51,4743
103	-0,0604	-51,4673
104	-0,0577	-51,4632
105	-0,0533	-51,4591
106	-0,0484	-51,4602
107	-0,0434	-51,4550
108	-0,0484	-51,4473
109	-0,0571	-51,4420
110	-0,0664	-51,4403
111	-0,0784	-51,4385
112	-0,0817	-51,4385
113	-0,0822	-51,4256
114	-0,0822	-51,4168
115	-0,0833	-51,4138
116	-0,0806	-51,4062
117	-0,0855	-51,3939
118	-0,0992	-51,3892
119	-0,1063	-51,3856
120	-0,1134	-51,3792
121	-0,1210	-51,3721
122	-0,1270	-51,3686
123	-0,1385	-51,3657
124	-0,1407	-51,3639

---

## APÊNDICE C - TABELA COM TODOS OS CUSTOS NIVELADOS CALCULADOS

<b>Comunidade</b>	<b>Tecnologia</b>	<b>Número de sistemas</b>	<b>LCOE</b>
Comunidade 1	Diesel	1	26,5560
Comunidade 1	Turb. Hidrocinética	6	3,1809
Comunidade 1	Solar	2	2,4547
Comunidade 1	Turbina Eólica	20	14,4109
Comunidade 2	Diesel	1	54,7442
Comunidade 2	Turb. Hidrocinética	5	4,1681
Comunidade 2	Solar	2	4,7483
Comunidade 2	Turbina Eólica	15	27,6983
Comunidade 3	Diesel	1	83,3790
Comunidade 3	Turb. Hidrocinética	3	6,5875
Comunidade 3	Solar	1	7,1626
Comunidade 3	Turbina Eólica	10	41,2479
Comunidade 4	Diesel	1	109,2402
Comunidade 4	Turb. Hidrocinética	2	10,9259
Comunidade 4	Solar	1	9,3731
Comunidade 4	Turbina Eólica	5	53,4622
Comunidade 5	Diesel	1	32,5661
Comunidade 5	Turb. Hidrocinética	6	3,1993
Comunidade 5	Solar	2	2,9564
Comunidade 5	Turbina Eólica	20	17,2453
Comunidade 6	Diesel	1	57,6981
Comunidade 6	Turb. Hidrocinética	5	4,0493
Comunidade 6	Solar	2	5,0756
Comunidade 6	Turbina Eólica	15	29,0992
Comunidade 7	Diesel	1	85,9444
Comunidade 7	Turb. Hidrocinética	3	6,4884
Comunidade 7	Solar	1	7,5629
Comunidade 7	Turbina Eólica	10	42,4358

Comunidade 8	Diesel	1	111,3046
Comunidade 8	Turb. Hidrocinética	2	10,8262
Comunidade 8	Solar	1	9,6662
Comunidade 8	Turbina Eólica	5	54,4207
Comunidade 9	Diesel	1	56,6163
Comunidade 9	Turb. Hidrocinética	5	3,4765
Comunidade 9	Solar	2	4,9638
Comunidade 9	Turbina Eólica	15	28,5831
Comunidade 10	Diesel	1	73,3967
Comunidade 10	Turb. Hidrocinética	3	5,6238
Comunidade 10	Solar	1	6,4463
Comunidade 10	Turbina Eólica	10	36,5129
Comunidade 11	Diesel	1	97,3371
Comunidade 11	Turb. Hidrocinética	3	7,2079
Comunidade 11	Solar	1	8,6988
Comunidade 11	Turbina Eólica	10	47,8261
Comunidade 12	Diesel	1	120,4416
Comunidade 12	Turb. Hidrocinética	2	11,5918
Comunidade 12	Solar	1	10,4769
Comunidade 12	Turbina Eólica	5	58,7133

## APÊNDICE D - CÓDIGO UTILIZADO NO PROJETO

O código utilizado no projeto está disponível no google colab por meio do link: [https://colab.research.google.com/drive/118AL4fOOcY0xHik3a\\_ZyWwWbz6FE\\_O5O?usp=sharing](https://colab.research.google.com/drive/118AL4fOOcY0xHik3a_ZyWwWbz6FE_O5O?usp=sharing). Os arquivos .csv necessários ao funcionamento do código estão disponíveis em: [https://drive.google.com/drive/folders/1IyHdYfPasGHQMMGIbL-vtFx53M1bl4ke?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1IyHdYfPasGHQMMGIbL-vtFx53M1bl4ke?usp=drive_link). É necessário que código e arquivo estejam em uma mesma pasta para o correto funcionamento.

### #Bibliotecas

```
import os
import fiona
import pandas as pd
import geopandas as gpd
import itertools
import logging
import numpy as np
import matplotlib
import math
from matplotlib import pyplot as plt
from math import ceil, pi, exp, log, sqrt, radians, cos, sin, asin
from collections import defaultdict

import folium
import tabulate

from dash import Dash, html, dash_table, dcc, callback, Output, Input
import pandas as pd
import plotly.express as px

#Dados relativos às comunidades
```

```
comunidades_df = pd.read_csv('Comunidades.csv', header = 0)
```

```
comunidades_df
```

```
comunidades_df.dtypes
```

```
# Informações de posicionamento das comunidades
```

```
posicao_df = pd.read_csv('Comunidades.csv', header = 0)
```

```
posicao_df
```

```
# Definição do schema que será utilizado para a manipulação dos pontos que  
representam as comunidades
```

```
schema = {
```

```
    'geometry':'Point',
```

```
    'properties':[('Nome', 'str'),
```

```
                  ('Ins_kWhm2', 'str'),
```

```
                  ('Wind_ms', 'str'),
```

```
                  ('DistCidade', 'str'),
```

```
                  ('Carga', 'str')]
```

```
}
```

```
# Criação de um arquivo .shp em branco por meio da biblioteca fiona
```

```
pointShp = fiona.open('Comunidades.shp', mode='w', driver='ESRI Shapefile',  
                    schema = schema, crs = "EPSG:4326")
```

```
#Iteração de cada linha e armazenamento dos dados
```

```

for index, row in posicao_df.iterrows():
    rowDict = {
        'geometry': {'type':'Point',
                    'coordinates': (row.X,row.Y)},
        'properties': {'Nome' : row.Nome, 'Ins_kWhm2': row.Ins_kWhm2, 'Wind_ms' :
row.Wind_ms, 'DistCidade' : row.DistCidade, 'Carga' : row.Carga},
    }
    pointShp.write(rowDict)

pointShp.close()

# Mapa com a disposição adotada para as comunidades

shapedot=gpd.read_file('Comunidades.shp')
shapedot.plot(color = 'black')

# Leitura dos pontos que representam o rio e criação do arquivo .shp relativo ao
último

lineDf = pd.read_csv('River.csv',header=0)
lineDf.head()

lineDf.dtypes

schema = {
    'geometry':'LineString',
    'properties':[('Name','str')]
}

lineShp = fiona.open('Rio.shp', mode='w', driver='ESRI Shapefile',
                    schema = schema, crs = "EPSG:4326")

xyList = []

```



```
xyList = []
rowName = ""
for index, row in lineDf.iterrows():
    xyList.append((row.X,row.Y))
    rowName = row.Name
xyList[:5]

rowDict = {
'geometry' : {'type':'LineString',
              'coordinates': xyList},
'properties': {'Name' : rowName},
}
lineShp.write(rowDict)

lineShp.close()

shapeline=gpd.read_file('Transmissao.shp')
shapeline.plot(color='red')

# Unindo os arquivos .shp das comunidades, rio e linha de transmissão

gdf1 = gpd.read_file('Comunidades.shp')
gdf2 = gpd.read_file('Rio.shp')
gdf3 = gpd.read_file('Transmissao.shp')

gdf = gpd.GeoDataFrame(pd.concat([gdf1, gdf2, gdf3]))

# Ajustando os valores:

#Irradiação:

gdf.iat[0,1] = 1733.75
```

```
gdf.iat[1,1] = 1733.75
gdf.iat[2,1] = 1715.5
gdf.iat[3,1] = 1700.9
gdf.iat[4,1] = 1726.45
gdf.iat[5,1] = 1704.55
gdf.iat[6,1] = 1671.7
gdf.iat[7,1] = 1679
gdf.iat[8,1] = 1711.85
gdf.iat[9,1] = 1686.3
gdf.iat[10,1] = 1638.85
gdf.iat[11,1] = 1671.7
```

#Dist cidade:

```
gdf.iat[0,3] = 1.00
gdf.iat[1,3] = 2.20
gdf.iat[2,3] = 3.20
gdf.iat[3,3] = 4.20
gdf.iat[4,3] = 1.25
gdf.iat[5,3] = 2.29
gdf.iat[6,3] = 3.40
gdf.iat[7,3] = 4.35
gdf.iat[8,3] = 2.27
gdf.iat[9,3] = 2.90
gdf.iat[10,3] = 3.80
gdf.iat[11,3] = 4.80
```

#Carga:

```
gdf.iat[0,4] = 8800
gdf.iat[1,4] = 6600
gdf.iat[2,4] = 4400
gdf.iat[3,4] = 2200
```

```
gdf.iat[4,4] = 8800
gdf.iat[5,4] = 6600
gdf.iat[6,4] = 4400
gdf.iat[7,4] = 2200
gdf.iat[8,4] = 6600
gdf.iat[9,4] = 4400
gdf.iat[10,4] = 4400
gdf.iat[11,4] = 2200

gdf.plot(figsize = (5,5));
gdf.head()

# Ajustando o gráfico:

caminho_shp1 = "Comunidades.shp"
caminho_shp2 = "Rio.shp"
caminho_shp3 = "Transmissao.shp"

# Legendas e cores para cada camada
legenda1 = "Comunidades"
cor1 = 'black'
legenda2 = "Rio"
cor2 = 'blue'
legenda3 = "Linha de transmissão"
cor3 = 'red'

try:
    gdf1 = gpd.read_file(caminho_shp1)
    gdf2 = gpd.read_file(caminho_shp2)
    gdf3 = gpd.read_file(caminho_shp3)
except FileNotFoundError as e:
    print(f"Erro ao abrir um dos arquivos shapefile: {e}")
    exit()
```

```
fig, ax = plt.subplots(1, 1, figsize=(10, 10))

gdf1.plot(ax=ax, color=cor1, label=legenda1)
gdf2.plot(ax=ax, marker='o', color=cor2, markersize=5, label=legenda2)
gdf3.plot(ax=ax, color=cor3, linewidth=1, label=legenda3)

ax.legend()
plt.tight_layout() # Ajusta o layout para evitar sobreposição
plt.show()

# Calculando a distância em linha reta de cada comunidade até o rio e a linha de
transmissão

river_line = gpd.read_file('Rio.shp')
transmission_line = gpd.read_file('Transmissao.shp')
pop_points = gpd.read_file('Comunidades.shp')

# Aplicando o mesmo fator de projeção a cada um dos entes em análise:

common_crs = 'EPSG:5530'
river_line = river_line.to_crs(common_crs)
transmission_line = transmission_line.to_crs(common_crs)
pop_points = pop_points.to_crs(common_crs)
single_transmission_line = transmission_line.union_all()
single_river_line = river_line.union_all()

# Cálculo da distância de cada comunidade ao rio e a linha de transmissão:

pop_points['dist_transmission_km']=
pop_points.distance(single_transmission_line)/1000
pop_points['dist_rio_km'] = pop_points.distance(single_river_line)/1000
```

```
# Criação de um DataFrame contendo as distâncias calculadas:
```

```
df_distance_to_river = pd.DataFrame(pop_points)
df_distance_to_transmission = pd.DataFrame(pop_points)
```

```
df_distance_to_river = pd.read_csv('Pop_points.csv', header = 0)
df_distance_to_river.to_csv('Pop_points.csv', index=False)
df_distance_to_river
```

```
df_distance_to_river.dtypes
```

```
# Adição dos valores em linha reta de distância até o ponto da capital:
```

```
df_distance_to_river_2 = pd.read_csv('Pop_points.csv', header = 0)
df_distance_to_river_2['dist_capital_km'] = 13.96
df_distance_to_river_2.iat[1,8] = 30.18
df_distance_to_river_2.iat[2,8] = 46.72
df_distance_to_river_2.iat[3,8] = 61.63
df_distance_to_river_2.iat[4,8] = 17.42
df_distance_to_river_2.iat[5,8] = 31.89
df_distance_to_river_2.iat[6,8] = 48.17
df_distance_to_river_2.iat[7,8] = 62.80
df_distance_to_river_2.iat[8,8] = 31.26
df_distance_to_river_2.iat[9,8] = 40.94
df_distance_to_river_2.iat[10,8] = 54.75
df_distance_to_river_2.iat[11,8] = 68.04
df_distance_to_river_2.to_csv('Pop_points_1.csv', index = 0)
```

```
# Cálculo do LCOE
```

```
# Definições de variáveis
```

```
numero_comunidades = 12
```

```
qtde_gerador_diesel = 1
```

```
qtde_turbina_hidrocinetica = 1
```

```
qtde_tech_solar = 1
```

```
qtde_tech_eolica = 1
```

```
densidade_rio = 1000 # Densidade em kg/m3
```

```
velocidade_rio = 1.0 # velocidade em m/s
```

```
densidade_ar = 1.293 # densidade do ar puro e seco em kg/m3
```

```
custo_mv = 9000 # custo da expansão da rede em US$/km
```

```
custo_lv = 2500 # custo de expansão de uma linha de baixa voltagem em US$/km
```

```
custo_transporte_terra = 3000 # custo calculado em US$/km
```

```
# Cálculo do LCOE para as tecnologias empregadas na análise:
```

```
info_comunidades = pd.read_csv('Pop_points.csv', header = 0)
```

```
tabela_custos = {'Comunidade': [],  
                 'Tecnologia': [],  
                 'Nome': [],  
                 'Quantidade de equipamentos': [],  
                 'LCOE': [],  
                 'Posicao': []}
```

```
tabela_custos_df = pd.DataFrame(tabela_custos)
```

```
info_comunidades
```

```

for comunidades in range (0, numero_comunidades):
    info_cada_comunidade = info_comunidades.loc[comunidades]
    tempo_cidade_mais_proxima = info_cada_comunidade.DistCidade
    radiacao_global = info_cada_comunidade.Ins_kWhm2
    velocidade_vento = info_cada_comunidade.Wind_ms
    distancia_para_rio = info_cada_comunidade.dist_rio_km
    posicao = info_cada_comunidade.geometry
    distancia_capital = info_cada_comunidade.dist_capital_km
    potencia_instalada = float(info_cada_comunidade.Carga)

# LCOE para gerador a diesel
dados_diesel = pd.read_csv('Diesel.csv', header = 0)

for numero_diesel in range(0, qtde_gerador_diesel):
    linha_diesel = dados_diesel.loc[numero_diesel]
    eficiencia_gerador = (linha_diesel.Eficiencia) / 100
    fator_capacidade = linha_diesel.FatorCapacidade
    custo_capital = linha_diesel.Custo_capital
    custo_transporte_terra = linha_diesel.Custo_transporte
    potencial_instalado = linha_diesel.PotencialInstalado_kW
    custo_operacao = linha_diesel.Custo_operacao
    custo_manutencao = linha_diesel.Custo_manutencao
    custo_combustivel = linha_diesel.Custo_combustível
    consumo_transporte = linha_diesel.Consumo_transporte
    volume_transportado = linha_diesel.Volume_transportado
    taxa_de_combustao = linha_diesel.Energia_por_litro
    tempo_de_vida = linha_diesel.Tempo_vida
    tempo_de_vida_gerador = linha_diesel.Tempo_vida_gerador
    taxa_desconto = linha_diesel.Taxa_desconto
    geracao_anual = linha_diesel.GeracaoAnual_kWh

    custo_transporte = custo_transporte_terra*distancia_capital

```

```

qntd_min = 1

while True:
    if potencia_instalada <= (qntd_min*geracao_anual):
        break
    else:
        qntd_min = qntd_min + 1

preco_combustivel_local=
2*((custo_combustivel*consumo_transporte*tempo_cidade_mais_proxima)/(volum
e_transportado))*(1/taxa_de_combustao)

preco_combustivel_anual=(geracao_anual*
preco_combustivel_local)/(taxa_de_combustao * eficiencia_gerador)
custo_inicial = ((custo_capital+custo_transporte)*qntd_min)
geracao_inicial = 0

for i in range(1, tempo_de_vida+1):
    if (i % (tempo_de_vida_gerador+1) == 0):
        custo_anual_descontado=
(((custo_operacao+custo_manutencao+preco_combustivel_anual+(custo_capital*q
ntd_min))*qntd_min)/(taxa_desconto)**i)
        custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
        custo_inicial = custo_descontado

    else:
        custo_anual_descontado=
(((custo_operacao+custo_manutencao+preco_combustivel_anual)*qntd_min)/(taxa
_desconto)**i)
        custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
        custo_inicial = custo_descontado

geracao_anual_descontada= (geracao_anual*qntd_min)/(taxa_desconto**i)

```

```

geracao_descontada = geracao_inicial + geracao_anual_descontada
geracao_inicial = geracao_descontada

```

```

lcoe = custo_descontado/geracao_descontada
lcoe
num_comunidades = comunidades+1
tabela_custos_df.loc[len(tabela_custos_df.index)]=['Comunidade
{}'.format(num_comunidades), 'Diesel', linha_diesel.Tecnologia, qntd_min, lcoe,
posicao]

```

```

#Cálculo LCOE para turbina hidrocinetica

```

```

dados_hidro = pd.read_csv('Hidrocinetica.csv', header = 0)

```

```

for numero_hidro in range (0, qtde_turbina_hidrocinetica):
    linha_hidro = dados_hidro.loc[numero_hidro]
    fator_capacidade = linha_hidro.Fator_Capacidade
    potencial_instalado = linha_hidro.Capac_Instalada
    secao_rotor = linha_hidro.SecaoTransvRotor_m2
    coef_perf = linha_hidro.CoeffPerf_porcento
    efic_rolamento = (linha_hidro.EficienciaRolamento_porcento /100)
    efic_transmissao = (linha_hidro.EficienciaRolamento_porcento /100)
    efic_gerador = (linha_hidro.EficienciaGerador_porcento /100)
    tempo_operacao = linha_hidro.TempoOperacao_h
    capex_turbina = linha_hidro.CapexTurbina_dollars
    capex_estrutura = linha_hidro.CapexEstrutura_dollars
    capex_ambiental = linha_hidro.CapexAmbiental_dollars
    capex_transporte = linha_hidro.CapexTransporte_dollars
    capex_montagem = linha_hidro.CapexMontagem_dollars
    capex_maodeobra = linha_hidro.CapexMaoObra_dollars
    capex_embarcacao = linha_hidro.CapexEmbarcacao_dollars
    opex_operador = linha_hidro.OpexOperador
    opex_seguro = linha_hidro.OpexSeguro

```

```

opex_manutencao = linha_hidro.OpexManutencao
opex_suprimentos = linha_hidro.OpexSuprimentos
opex_embarcacao = linha_hidro.OpexEmbarcacao
tempo_vida = linha_hidro.Tempo_vida
taxa_desconto = 1 + (linha_hidro.Taxa_desconto / 100)

pot_media_eixo=
(1/2)*(densidade_rio)*(velocidade_rio**3)*(coef_perf)*secao_rotor
pot_media_turbina=
(efic_rolamento)*(efic_transmissao)*(efic_gerador)*pot_media_eixo
geracao_anual = (pot_media_turbina*tempo_operacao)/10000

qntd_min = 1

while True:
    if potencia_instalada <= (qntd_min*geracao_anual):
        break
    else:
        qntd_min = qntd_min + 1

capex_linha = distancia_para_rio*custo_lv
capex_total = ((capex_turbina + capex_estrutura +
                capex_ambiental + capex_transporte +
                capex_montagem + capex_maodeobra +
                capex_embarcacao) * qntd_min + capex_linha)
custo_inicial = capex_total
geracao_inicial = 0

for i in range(1, tempo_vida+1):
    custo_anual_descontado = ((opex_operador + opex_seguro +
opex_manutencao +opex_suprimentos + opex_embarcacao) / (taxa_desconto) ** i)
    custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
    custo_inicial = custo_descontado

```

```

geracao_anual_descontada= (qntd_min*geracao_anual)/(taxa_desconto**i)
geracao_descontada = geracao_inicial + geracao_anual_descontada
geracao_inicial = geracao_descontada

```

```
#LCOE energia solar
```

```
dados_solar = pd.read_csv('Solar.csv', header = 0)
```

```
for numero_solar in range(0, qtde_tech_solar):
```

```
    linha_solar = dados_solar.loc[numero_solar]
```

```
    fator_capacidade = linha_solar.Fator_Capacidade
```

```
    potencial_instalado = linha_solar.Capac_Instalada
```

```
    area_painel = linha_solar.AreaPainel_m2
```

```
    eficiencia_painel = (linha_solar.EficienciaPainel_porcento / 100)
```

```
    fator_degradacao = (linha_solar.FatorDegradacao / 100)
```

```
    capex_painel = linha_solar.CapexPainel
```

```
    capex_inversor = linha_solar.CapexInversor
```

```
    capex_bateria = linha_solar.CapexBateria
```

```
    capex_transporte_terra = linha_solar.CapexTransporte
```

```
    capex_instalacao = linha_solar.CapexInstalacao
```

```
    opex_operacao = linha_solar.OpexOperacao
```

```
    opex_manutencao = linha_solar.OpexManutencao
```

```
    opex_troca_bateria = linha_solar.OpexTrocaBateria
```

```
    tempo_vida_bateria = linha_solar.TempoVidaBateria
```

```
    opex_troca_inversor = linha_solar.OpexTrocaInversor
```

```
    tempo_vida_inversor = linha_solar.TempoVidaInversor
```

```
    tempo_de_vida = linha_solar.Tempo_vida
```

```
    taxa_desconto = 1 + (linha_solar.Taxa_desconto / 100)
```

```
    capex_transporte = capex_transporte_terra*distancia_capital
```

```
    geracao_anual_painel = (radiacao_global)*(eficiencia_painel)*(area_painel)
```

```

qntd_painel = (potencia_instalada / geracao_anual_painel)

if (qntd_painel < 1):
    qntd_painel = 1
else:
    qntd_painel = 2

geracao_anual_teorica = geracao_anual_painel*qntd_painel

capex_total = (capex_painel + capex_inversor +
               capex_bateria + capex_transporte +
               capex_instalacao) * qntd_painel
custo_inicial = capex_total
geracao_inicial = 0

for i in range(1, tempo_de_vida+1):
    if (i % (tempo_vida_bateria+1) == 0):
        if (i % (tempo_vida_inversor+1) == 0):
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao+
opex_troca_bateria + opex_troca_inversor)*qntd_painel)/(taxa_desconto)**i)
            custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
            custo_inicial = custo_descontado

        else:
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao +
opex_troca_bateria)*qntd_painel)/(taxa_desconto)**i)
            custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
            custo_inicial = custo_descontado

    else:
        if (i % (tempo_vida_inversor+1) == 0):
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao
+ opex_troca_inversor)*qntd_painel)/(taxa_desconto)**i)

```

```

        custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
        custo_inicial = custo_descontado
    else:

custo_anual_descontado=(((opex_operacao+opex_manutencao)*qntd_painel)/(tax
a_desconto)**i)
        custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
        custo_inicial = custo_descontado
geracao_anual_descontada=(geracao_anual_teorica*(1fator_degradacao)**i)/(taxa
_desconto**i)
        geracao_descontada = geracao_inicial + geracao_anual_descontada
        geracao_inicial = geracao_descontada

lcoe = custo_descontado/geracao_descontada
lcoe
num_comunidades = comunidades+1
tabela_custos_df.loc[len(tabela_custos_df.index)]=['Comunidade
{}'.format(num_comunidades), 'Solar', linha_solar.Tecnologia, qntd_painel, lcoe,
posicao]

lcoe = custo_descontado/geracao_descontada
lcoe
num_comunidades = comunidades+1

tabela_custos_df.loc[len(tabela_custos_df.index)]=['Comunidade{}'.format(num_co
munidades), 'Turb. Hidrocinética', linha_hidro.Tecnologia, qntd_min, lcoe, posicao]

#LCOE energia eólica
dados_eolica = pd.read_csv('Eolica.csv', header = 0)

for numero_hidro in range(0, qtde_tech_eolica):

```

```

linha_eolica = dados_eolica.loc[numero_hidro]
secao_rotor = linha_eolica.SecaoTransvRotor_m2
coef_perf = linha_eolica.CoeffPerf_porcento
fator_capacidade = linha_eolica.FatorCapacidade_porcento
potencial_instalado = linha_eolica.Capac_Instalada
efic_rolamento = (linha_eolica.EficienciaRolamento_porcento / 100)
efic_transmissao = (linha_eolica.EficienciaTransmissao_porcento / 100)
efic_gerador = (linha_eolica.EficienciaGerador_porcento / 100)
tempo_operacao = linha_eolica.TempoOperacao_h
capex_turbina = linha_eolica.CapexTurbina_dollars
capex_estrutura = linha_eolica.CapexEstrutura_dollars
capex_transporte_terra = linha_eolica.CapexTransporte_dollars
capex_montagem = linha_eolica.CapexMontagem_dollars
capex_maodeobra = linha_eolica.CapexMaoObra_dollars
capex_inversor = linha_eolica.CapexInversor
capex_bateria = linha_eolica.CapexBateria
opex_operacao = linha_eolica.OpexOperacao
opex_manutencao = linha_eolica.OpexManutencao
opex_troca_bateria = linha_eolica.OpexTrocaBateria
tempo_vida_bateria = linha_eolica.TempoVidaBateria
opex_troca_inversor = linha_eolica.OpexTrocaInversor
tempo_vida_inversor = linha_eolica.TempoVidaInversor
tempo_de_vida = linha_eolica.Tempo_vida
taxa_desconto = 1 + (linha_eolica.Taxa_desconto / 100)

```

```

capex_trasporte = custo_transporte_terra*distancia_capital

```

```

pot_media_eixo=
(1/2)*(densidade_ar)*(velocidade_vento**3)*(coef_perf)*secao_rotor
pot_media_turbina=
(efic_rolamento)*(efic_transmissao)*(efic_gerador)*pot_media_eixo
geracao_anual_turbina = (pot_media_turbina*tempo_operacao)/10000

```

```

qntd_min = 1
while True:
    if potencia_instalada <= (qntd_min*geracao_anual_turbina):
        break
    else:
        qntd_min = qntd_min + 1

capex_total = (capex_turbina + capex_estrutura + capex_transporte +
               capex_montagem + capex_maodeobra)*qntd_min
custo_inicial = capex_total
geracao_inicial = 0

geracao_anual_total = geracao_anual_turbina*qntd_min

for i in range(1, tempo_de_vida+1):
    if (i % (tempo_vida_bateria+1) == 0):
        if (i % (tempo_vida_inversor+1) == 0):
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao
+opex_troca_bateria+ opex_troca_inversor)*qntd_min)/(taxa_desconto)**i)
            custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
            custo_inicial = custo_descontado

        else:
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao
                + opex_troca_bateria)*qntd_min)/(taxa_desconto)**i)
            custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
            custo_inicial = custo_descontado

    else:
        if (i % (tempo_vida_inversor+1) == 0):
            custo_anual_descontado = (((opex_operacao + opex_manutencao
+opex_troca_inversor)*qntd_min)/(taxa_desconto)**i)
            custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado

```

```

custo_inicial = custo_descontado

else:
    custo_anual_descontado=((opex_operacao+
opex_manutencao)*qntd_min)/(taxa_desconto**i)
    custo_descontado = custo_inicial + custo_anual_descontado
    custo_inicial = custo_descontado

    geracao_anual_descontada = (geracao_anual_total)/(taxa_desconto**i)
    geracao_descontada = geracao_inicial + geracao_anual_descontada
    geracao_inicial = geracao_descontada

lcoe = custo_descontado/geracao_descontada
lcoe
num_comunidades = comunidades+1
tabela_custos_df.loc[len(tabela_custos_df.index)]=['Comunidade
{}'.format(num_comunidades), 'Turbina Eólica', linha_eolica.Tecnologia, qntd_min,
lcoe, posicao]

tabela_custos_df

# Convertendo a tabela com os resultados do cálculo para um arquivo .xlsx para que
sejam aplicados os filtros destinados a análise dos melhores resultados:

tabela_custos_df.to_excel('Tabela_custos.xlsx', index = False)

```