



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

VITÓRIA BARBOSA PORTILHO

**INTEGRAÇÃO DE CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS EM PONTE-
BARRAGEM MULTIUSO NA AMAZÔNIA RURAL**

TUCURUÍ
2023

VITÓRIA BARBOSA PORTILHO

**INTEGRAÇÃO DE CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS EM PONTE-
BARRAGEM MULTIUSO NA AMAZÔNIA RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental

Orientador: Dr. Davi Edson Sales E Souza

Coorientador: Dr. André Luiz Amarante Mesquita

TUCURUÍ
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

B238i Barbosa Portilho, Vitoria.
INTEGRAÇÃO DE CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS EM
PONTE-BARRAGEM MULTIUSO NA
AMAZÔNIA RURAL / Vitoria Barbosa Portilho. — 2023.
43 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Davi Edson Sales E Souza Coorientador(a): Prof.
Dr. André Luiz Amarante Mesquita Trabalho de Conclusão de Curso
(Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de
Engenharia Sanitária e Ambiental, Tucuruí, 2023.

1. Pequenos rios Amazônicos. 2. Ponte-barragem. 3. Micro
central hidrelétrica . 4. Geração de energia. I. Título.

CDD 333.914

VITÓRIA BARBOSA PORTILHO

**INTEGRAÇÃO DE CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS EM PONTE-
BARRAGEM MULTIUSOS NA AMAZÔNIA RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, do Campus Universitário de Tucuruí, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Data da aprovação: 15/12/2023

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Davi Edson Sales e Souza
Orientador - FAESA/UFPA

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador – FEM/CAMTUC



Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa (FAESA/UFPA)
Examinador interno a FAESA/CAMTUC

Eng. Dr. Gilton Carlos de Andrade Furtado (ELETROBRAS/ELETRONORTE)
Examinador externo a FAESA/CAMTUC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir viver todas as experiências até aqui vividas e que Ele me permita a cada dia viver ainda mais. Sou grata a minha família que desde o início me apoiou, minha mãe, Francinilde Fernandes, que mesmo quando eu estava desmotivada nunca me deixou desistir. Ao meu pai, Ednaldo Portilho, por sempre se fazer presente me apoiando. E aos meus irmãozinhos, Vitor Guilherme e Gabriel, que mesmo não sabendo ou entendendo foram um sopro de amor, carinho e motivação durante toda a graduação.

Quero agradecer também aos meus amigos e colegas da faculdade, que tornaram tudo mais leve e divertido, foi ótimo viver esses cinco anos com vocês e sem vocês nada disso seria possível. Em especial ao meu grupo Lara Grazielle, Paloma Cardoso, Gabriele Ferreira por todos os surtos e choros compartilhados, vocês são incríveis. Também ao Felipe César e Breno Corrêa que mesmo de longe sempre se fizeram presente em tudo que foi possível.

Agradeço ao corpo docente da UFPA e aos servidores, por sempre se mostrarem tão solícitos e por todo o conhecimento que me foi passado durante esse ciclo. À Atlética Predadores da Engenharia que me permitiu me enturmar na universidade e me trouxe muitos amigos e muitas alegrias, destaco aqui a diretoria da qual fiz parte.

Em especial agradeço ao meu orientador Davi Sales, por sempre me motivar, me aconselhar e por acreditar em mim. Agradeço por todos os ensinamentos e oportunidades que me proporcionou viver. Ao meu Coorientador André Mesquita por todas as oportunidades que me deu e por todos os ensinamentos que me passou, obrigada por acreditar em mim.

Assim como agradeço ao CNPq, pela bolsa de iniciação científica, que teve como fruto esse TCC, e a toda equipe do projeto Sistemas Híbridos de Geração e Armazenamento de Energias Renováveis na Amazônia (PRO5604-2022), Prof. André Mesquita, Prof. Davi Sales, Prof. Claudio Blanco, Prof. Manoel Sena, Natalia Marcia e Rodolfo Vitorino. Gratidão por todos os ensinamentos, contribuições e apoio! Sem vocês não seria possível.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para essa conquista! Obrigada a todos, por tudo.

RESUMO

Mesmo com o crescimento dos últimos anos, o fornecimento de energia elétrica na Amazônia rural ainda é um grande problema, justificado pela dificuldade de acesso às comunidades, alto custo de transmissão e distribuição de energia para pequenas populações. Além disso, a rede rodoviária atravessa vários pequenos cursos de água, com acesso restrito a pequenas pontes de madeira, o que dificulta a logística do escoamento da produção agrícola das comunidades existentes. Para atender essa demanda energética, o modelo de fornecimento em pequena escala, principalmente com a implantação de centrais geradoras hidrelétricas (CGH), tem se mostrado uma boa alternativa. Este trabalho apresenta uma metodologia que objetiva substituir pontes de madeira por uma ponte/barragem de concreto, incluindo uma CGH integrada à estrutura da ponte. A metodologia proposta inicia pelo estudo hidrológico, com a análise da curva de permanência e curva chave, para então ser escolhido o arranjo operacional da usina e seus aspectos energéticos e para determinar o tamanho das máquinas, foi realizado a parametrização e similaridade das turbinas hidráulicas (TH), a partir de uma máquina existente da literatura. Finalmente, a metodologia foi aplicada em uma comunidade com demanda de energia de uma agroindústria. Foram parametrizadas duas turbinas hidráulicas do tipo hélice com número e tamanho definidos a partir de estudo hidrológico local, juntamente com a eficiência da turbina, para atender a demanda da comunidade onde será instalada. O esquema proposto foi capaz de gerar 47.244,94 kWh/ano, suprimindo a demanda do empreendimento que foi estimada em 41.045,36 kWh/ano. Essa mesma metodologia tem potencial para ser aplicada em várias áreas da região amazônica e similares, onde possui baixa queda e variação de vazão, com sucesso.

Palavras-chave: Pequenos rios Amazônicos; Ponte/barragem; Micro central hidrelétrica; Geração de energia.

ABSTRACT

Even with the growth of recent years, the supply of electricity in rural Amazonia is still a major problem, due to the difficulty of accessing communities, the high cost of transmitting and distributing energy to small populations. In addition, the road network crosses several small watercourses, with access restricted to small wooden bridges, which hinders the logistics of transporting agricultural production from existing communities. To meet this energy demand, the small-scale supply model, mainly with the implementation of hydroelectric generating stations (HGC), has proved to be a good alternative. This paper presents a methodology that aims to replace wooden bridges with a concrete bridge/dam, including a HGC integrated into the bridge structure. The proposed methodology begins with a hydrological study, analyzing the permanence curve and the key curve. In order to choose the plant's operational arrangement and its energy aspects, and to determine the size of the machines, the hydraulic turbines (HT) were parameterized and similarized using an existing machine from the literature. Finally, the methodology was applied to a community with energy demand from an agro-industry. Two propeller-type hydraulic turbines were parameterized with the number and size defined based on a local hydrological study, along with the turbine's efficiency, to meet the demand of the community where it will be installed. The proposed scheme was able to generate 47,244.94 kWh/year, meeting the project's demand, which was estimated at 41,045.36 kWh/year. This same methodology has the potential to be successfully applied in various areas of the Amazon region and similar, where there is a low drop and flow variation.

Keywords: Small Amazonian rivers; Bridge/dam; Micro hydroelectric plant; Energy generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de permanência do Rio Gurupi.....	15
Figura 2 - Curva chave do Igarapé São João	16
Figura 3 - Geração de eletricidade por fonte, Brasil 1990-2020	17
Figura 4 - Esquema de uma CGH.....	19
Figura 5 - Etapas da metodologia e sua aplicação	21
Figura 6 - Portal Hidroweb.....	22
Figura 7 - Tratamento dos dados na planilha.....	23
Figura 8 - Medidor de vazão	24
Figura 9 - Seções para o cálculo da vazão	25
Figura 10 - Relação entre vazão e altura manométrica (a), relação entre vazão e eficiência (b), relação entre vazão e velocidade de rotação (c), e relação entre vazão e potência mecânica (d), eficiência em função da vazão e velocidade de rotação (e), eficiência em função da vazão e altura manométrica (f)	27
Figura 11 - Localização do Pará e Janari no Brasil (a), detalhando Janari (b), córrego Água Preta e ponte de madeira (c) e casa de farinha (d).	28
Figura 12 - Área de drenagem Igarapé Água Preta.....	29
Figura 13 - Casa de farinha atualmente	29
Figura 14 - Exemplo de ponte de concreto para a instalação de TH.....	30
Figura 15 - Curva de permanência do Igarapé Água Preta	31
Figura 16 - Curva Chave do Igarapé Água Preta	32
Figura 17 - Inserindo as informações no medidor FlowTracker (a) e a Coleta dos dados do Igarapé Água Preta (b).	32
Figura 18 - Operação das TH	34
Figura 19 - Potência produzida.....	34
Figura 20 - Montante da CGH (a), Jusante da CGH (b), Período com vertimento (c) Período sem vertimento (d).....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Turbina Parametrizada neste estudo.	27
Tabela 2 - Faixa de operação.....	33
Tabela 3 - Turbinas parametrizadas.....	33
Tabela 4 - Energia gerada.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Água e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
TH	Turbina Hidráulica
IEA	International Energy Agency
MCH	Micro Central Hidrelétrica
TH	Turbina Hidráulica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
BH	Bacia Hidráulica
TH	Turbina Hidráulica
ADP	Área de drenagem pretendida
ADO	Área de drenagem observada
QRO	Vazão do rio observado
CP	Curva de permanência
CC	Curva chave
Qt	Vazão total
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência
Q	Vazão
ρ	Massa específica
H	Queda Bruta
g	Aceleração da gravidade
n	Eficiência da máquina
ψ	Coefficiente de pressão
ϕ	Coefficiente de vazão
λ	Coefficiente de potência da turbina
δ	Coefficiente de diâmetro
Y	Energia específica
u	Velocidade tangencial da pá
C_m	Velocidade meridiana
N	Velocidade de rotação
D	Diâmetro
$\dot{\gamma}$	Densidade do líquido
η	Eficiência da máquina

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	ESTUDO HIDROLÓGICO.....	15
2.2	ENERGIA HIDRELÉTRICA.....	16
2.3	PONTE-BARRAGEM.....	17
2.4	CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA.....	18
2.5	TURBINAS HIDRÁULICAS	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	ESTUDO HIDROLÓGICO.....	21
3.1.1	Curva de permanência (CP)	22
3.1.2	Curva chave (CC).....	23
3.2	ARRANJO OPERACIONAL E ASPECTOS ENERGÉTICOS.....	25
3.3	PARAMETRIZAÇÃO E SIMILARIDADE DAS TH	26
3.4	ESTUDO DE CASO	28
4	RESULTADOS	31
4.1	TURBINAS OPERANDO EM PARALELO	32
4.2	PRODUÇÃO DE ENERGIA PARA O EMPREENDIMENTO.....	35
4	CONCLUSÃO	38

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é reconhecida mundialmente como uma das regiões mais ricas em biodiversidade e recursos naturais do planeta. Sua extensa rede hidrográfica composta por grandes rios oferece grande potencial para geração de energia elétrica. Apesar disso, a região enfrenta grandes desafios em nível do acesso à eletricidade, sobretudo em zonas remotas e isoladas, devido aos custos de instalação do transporte e distribuição integrados na rede elétrica nacional (Duarte et al. 2010), assunto que é tema de diversas pesquisas de soluções sustentáveis e com menores impactos ao meio ambiente (Borges Júnior, P. et al. 2020).

Outro grande problema atrelado à Amazônia rural é a logística para a coleta e escoamento da produção. O difícil acesso e existência de estruturas adequadas para o transporte da produção prejudica, significativamente, a qualidade e valor do produto (Melo; Costa; Silva, 2021). Esses desafios criaram um grande obstáculo para as atividades produtivas, que estão principalmente relacionadas à produção primária de valor agregado, por exemplo, arroz, mandioca e frutas.

A infraestrutura viária da zona rural é constituída de estradas de terra com inúmeras pontes e pontilhões de madeira, que se encontram extremamente deterioradas, algumas em perigo de quebra iminente. Neste contexto, a construção e manutenção de pontes é imprescindível para a melhoria do transporte intermunicipal e interestadual (Fernández, 2010). Segundo Bernardo e Campos (2018), atualmente não são adotados procedimentos de inspeções e de manutenção nas pontes de madeira que compõem as malhas viárias. Logo, as mesmas estão em processo de deterioração e podem evoluir para colapsos e total inviabilidade.

Nesse contexto, nota-se duas problemáticas que se interseccionam em uma alternativa para contribuir à redução de ambas, de maneira viável em termos econômicos e de segurança: a substituição das antigas pontes de madeira por pontes de concreto acoplando Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), fazendo o uso sustentável dos recursos hídricos da imensa rede de pequenos rios e igarapés da região amazônica para a produção de eletricidade (Blanco; Secretan; Mesquita, 2008).

Pesquisadores e profissionais da área relataram projetos de CGHs para aproveitar o potencial dos pequenos rios da região, utilizando turbinas hidráulicas (TH) de fio d'água para gerar eletricidade. Blanco; Secretan; Mesquita (2008) que estudou a utilização de TH para pequenos aproveitamentos energéticos e Chaudhari et al., (2021) que afirma que a energia gerada por CGHs pode ser aproveitada com TH de baixa elevação.

Essas máquinas surgem como uma solução promissora para o aproveitamento do potencial hidroenergético da região. Ao contrário das grandes hidrelétricas, que exigem a

construção de grandes barragens e reservatórios, as TH's a fio d'água são projetadas para operar em rios com queda ultrabaixa e vazão variável.

Apesar dos resultados animadores das pesquisas realizadas, a substituição de antigas pontes de madeira por pontes de concreto, com uma estrutura anexa de uma CGH, composta por TH a fio d'água é um assunto pouco pesquisado e que merece atenção e mais pesquisas para utilizar essa tecnologia de forma eficiente.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que visa substituir pontes de madeira por uma ponte/barragem de concreto, incluindo uma CGH integrada em sua estrutura, para aproveitar o potencial dos pequenos rios da Amazônia, com baixíssimas quedas e grande variação de vazão, para geração e autonomia de energia elétrica em comunidades remotas, para maior segurança no transporte e escoamento da produção e desenvolvimento da região.

Para isso, foi necessário o estudo do sítio hidrológico onde se pretende construir a usina. Esta etapa é fundamental para definir as características do corpo hídrico (vazão e altura manométrica), que definirão as configurações específicas de operação do TH. Em seguida, são parametrizados dados de uma máquina real e, a partir da aplicação da lei de similaridade, é possível identificar a quantidade de turbinas de tamanho adequado ao potencial do local explorado. Esta metodologia foi implementada em uma comunidade remota da região norte do Brasil, que possui um empreendimento local com necessidade de energia elétrica e infraestrutura de acesso, com uma ponte de madeira em péssimo estado de conservação. Com a substituição da ponte, foi sugerida a operação de duas TH em paralelo para aproveitar o potencial do sítio hidrológico local. A energia gerada estimada excede a energia demandada pelo projeto. Além disso, a ponte/barragem de concreto proporciona segurança e agilidade no transporte da produção.

1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar uma metodologia para a substituição de pontes de madeira por pontes/barragem em concreto, com estrutura de uma CGH anexa, para a geração de energia e maior segurança de escoamento da produção de pequenas comunidades rurais da Amazônia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a hidrologia de pequenos rios da Amazônia para a elaboração da curva de permanência (CP) e curva chave (CC);

- Definir o esquema e a faixa de operação da CGH;
- Parametrizar uma turbina hidráulica real;
- Aplicar a metodologia em um estudo de caso;
- Suprir a demanda de energia elétrica do estudo de caso.

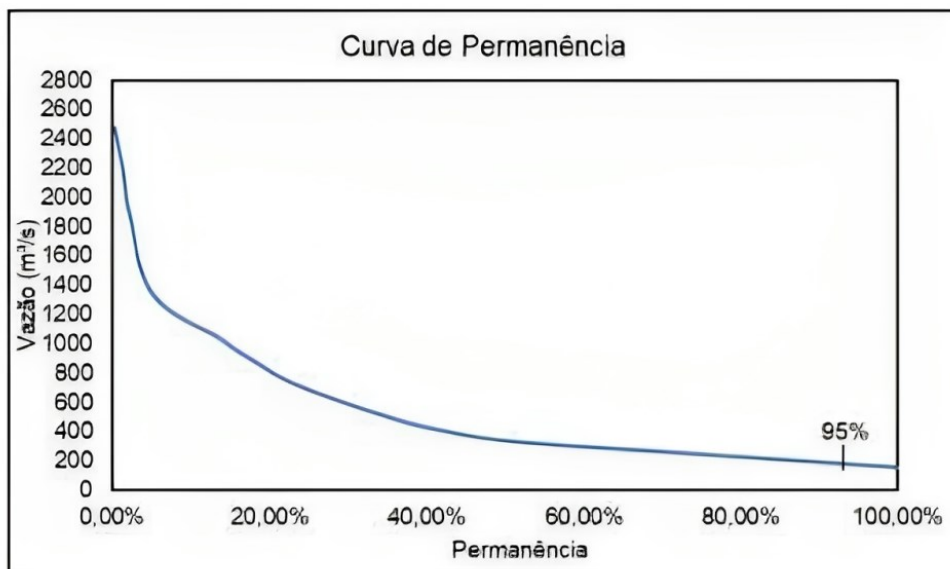
2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ESTUDO HIDROLÓGICO

O estudo hidrológico tem como objetivo determinar se o corpo d'água possui os pré requisitos indispensáveis para a implantação da CGH, como por exemplo; queda, vazão, topografia. Pois, com os dados de queda e vazão é possível estimar a potência, se a mesma for considerável é possível continuar com o estudo (Bezerra, F. 2007). Essa análise é realizada a partir das ferramentas hidrográficas, curva chave e curva de permanência.

A curva de permanência gera valores de vazões associados a suas probabilidades de permanência no tempo. Segundo Bezerra, F. (2007), esses valores podem ser utilizados para os estudos de operação de usinas hidrelétricas, estudos energéticos, estudo de enchimento de reservatórios, entre outros. Na Figura 1 observa-se afins de comparação um exemplo de curva de permanência do Rio Gurupi, pertencente ao município de Cachoeira do Piriá, no Estado do Pará, pertencendo assim a Amazônia Brasileira. A CP é utilizada em grande parte da gestão dos recursos hídricos, disponibilizando diferentes e diversas aplicações e enfoques (Ruthe, J. 2017). Entre eles, a otimização de sistemas hidrelétricos (De Albuquerque Vinagre *et al.*, 2016).

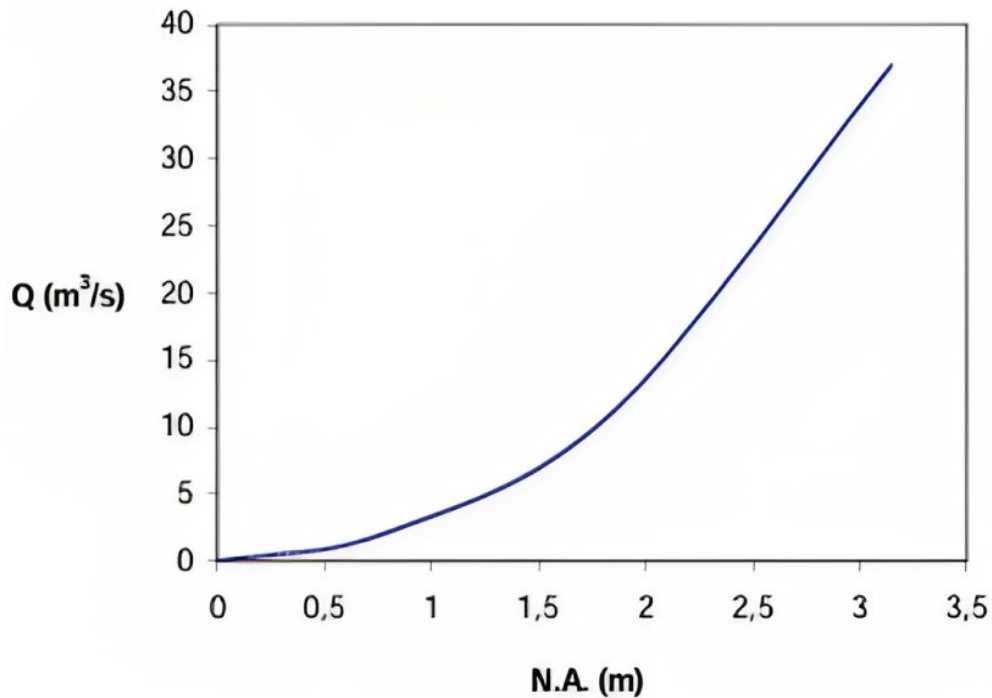
Figura 1 - Curva de permanência do Rio Gurupi



Fonte: Silva et al., 2021

Por sua vez, a curva chave estima os níveis d'água em relação as vazões correspondentes de determinado corpo d'água. Ela é capaz de auxiliar na simulação de áreas de inundação de pequenos corpos d'água (Bezerra, F. 2007). Na Figura 2 abaixo tem-se um exemplo de curva chave para o Igarapé São João em Anapu - PA.

Figura 2 - Curva chave do Igarapé São João



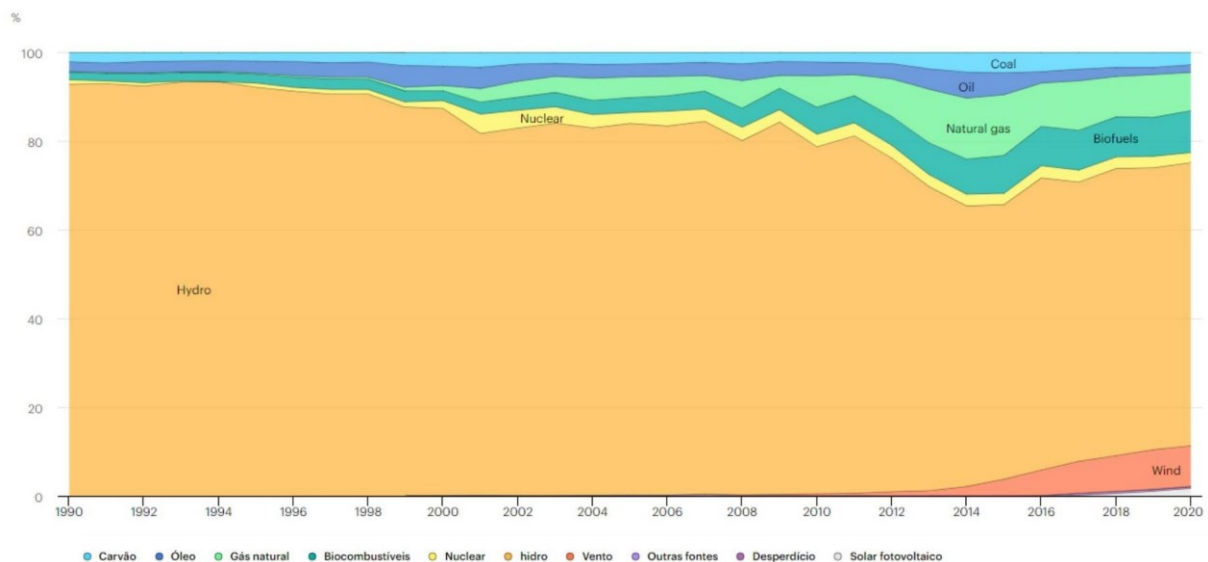
Fonte: Bezerra, F. 2007

2.2 ENERGIA HIDRELÉTRICA

Segundo o International Energy Agency – IEA (2022), a geração de energia elétrica no mundo sempre teve grande contribuição dos combustíveis fósseis, como carvão, óleo e gás natural. No entanto, esses combustíveis são limitados e a queima dos mesmos provoca diversas agressões ambientais em todo o mundo. Por esse motivo, a busca de novas fontes de energia é uma preocupação mundial. As fontes de energia renováveis se apresentam como uma alternativa promissora. Um exemplo disso, são as fontes hídricas, bastante utilizadas no Brasil, conforme a Figura 3, que podem ser aproveitadas por meio da Hidroeletricidade, como usinas hidrelétricas determinadas a partir da potência instalada. Segundo a ANEEL (2022) aproveitamentos de até 5MW são classificados como CGH, de 1 MW a 50 MW PCH e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) com mais de 50 MW de potência instalada.

No Brasil a matriz energética é dependente das fontes hídricas (Silva; Vieira, 2016). Com o pensamento voltado ao desenvolvimento sustentável e aos tratados internacionais a busca por alternativas que priorizassem o futuro do meio ambiente sofreu um aumento significativo. Logo as CGHs e PCHs foram consideradas boas alternativas para geração de energia limpa (Clauberg; Henkes; Becegatto, 2021). Em específico neste trabalho, o aproveitamento será através de uma CGH acoplada à uma ponte-barragem.

Figura 3 - Geração de eletricidade por fonte, Brasil 1990-2020



Fonte: IEA, 2022

2.3 PONTE-BARRAGEM

O Estado do Pará tem uma área de 1.253.164,49 km² e possui uma malha hidrográfica abundante e, aproximadamente, 19.253,35 km de estradas vicinais, que são cortadas por muitos rios. Neste contexto, a construção e manutenção de pontes é imprescindível para a melhoria do transporte intermunicipal e interestadual (Fernández, B.O. 2010).

Na região, a infraestrutura viária de acesso aos municípios distantes das capitais é típica de zona rural, constituída de estradas de terra com inúmeras pontes e pontilhões de madeira, que se encontram extremamente deterioradas, algumas em perigo de quebra iminente. A busca de substituição dessas obras por pontes em concreto é uma direção apontada pelos governantes municipais, pressionados por ações populares.

A instalação da micro central apresenta a inovação por utilizar plenamente as características típicas de igarapés no interior da Amazônia, baixíssima queda e com uma grande variação de vazão, trazendo ainda a substituição de uma ponte de madeira por uma ponte/barragem de concreto. O modelo de ponte-barragem de concreto em substituição às pontes de madeira, com tecnologia adequada à região, tem um alto potencial de se replicar. Trabalhos sobre a integração de micro centrais em ponte-barragens são escassos. No que se refere ao mais atual, De Almeida et al., (2011) realizaram um estudo para avaliar a viabilidade técnica e econômica da produção hidroelétrica na ponte-barragem já existente em Coimbra, Portugal onde demonstrou viabilidade técnica da adição hidrelétrica à ponte-barragem de Coimbra, mantendo a sua utilização como central multiusos. A eletricidade produzida é

suficiente para abastecer a demanda permitindo expansões. A micro central integrada a ponte-barragem contribuirá para um conceito de mobilidade limpa, sustentável e demonstra um resultado satisfatório.

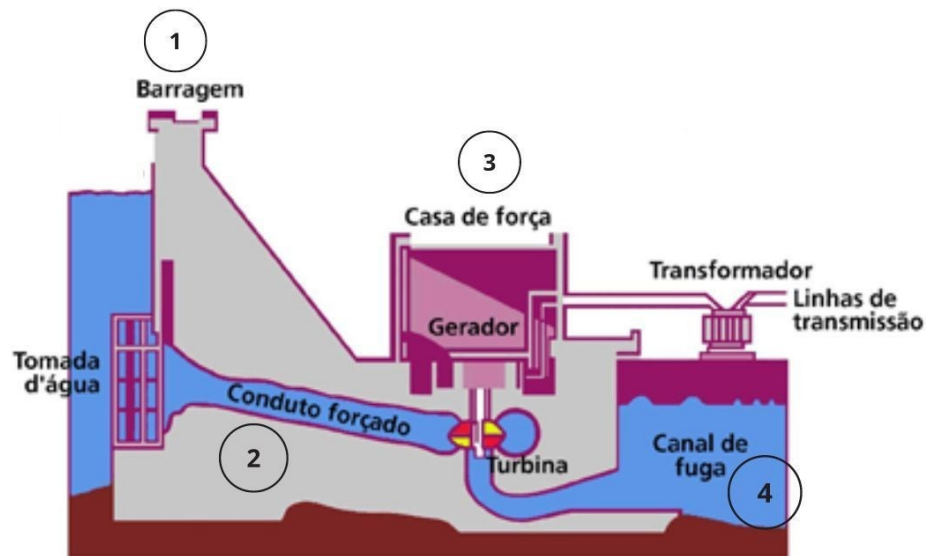
Devido a dispersão de pequenas comunidades rurais na região, é economicamente inviável a instalação de transmissão de distribuição integrada a rede elétrica nacional. Dessa forma, para atender pequenas comunidades com energia elétrica, uma boa alternativa seria um modelo de abastecimento de pequena escala, independente das grandes hidrelétricas (Fialho; Blanco; Mesquita, 2017). Para a construção da Micro central Hidrelétrica deve ser analisado acoplar uma CGH à ponte-barragem. Desta maneira, fazendo uso sustentável dos recursos hídricos da imensa rede de pequenos rios e igarapés da região amazônica para a produção de eletricidade (Blanco; Secretan; Mesquita, 2008).

2.4 CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA

Centrais Geradoras Hidrelétricas são como as usinas hidrelétricas, no entanto, com potência de geração de 1 MW a 5MW (ANEEL, 2022). É uma usina do tipo fio d'água, ou seja, não é necessário um reservatório pois o rio não é convertido em lago e a forma do fluxo não é alterada, aproveitando-se a queda livre natural do rio (Isa et al., 2021).

Segundo Fernandes (2019), as CGH têm quatro funções principais em sua estrutura: captação, adução, geração e restituição. A captação (1) é formada pelo barramento, vertedouro e tomada d'água. O barramento tem a função de garantir o funcionamento da tomada d'água que retém água para o desvio. A função da tomada d'água é desviar a água para a segunda etapa que é a adução (2), a água que é desviada é a responsável por girar a turbina, logo, gerar energia. Na segunda etapa a água é aduzida por um canal ou conduto de adução, nele a vazão do rio é reduzida até chegar na casa de força. A potência gerada depende da vazão que foi aduzida pelo conduto/canal. Quanto maior, maior é a potência da central hidrelétrica. Na terceira etapa, geração (3), acontece a chegada da água do conduto na casa de forças, sendo ela a responsável por girar a turbina, transformando a energia hidráulica em energia mecânica que por consequência ativa o gerador que a transforma em energia elétrica. Por fim tem-se a restituição (4) que é a devolução da água aduzida ao rio por meio de um canal de fuga, conforme ilustrado na Figura 4

Figura 4 - Esquema de uma CGH



Fonte: Associação brasileira de PCHs e CGHs – ABRAPCH (2023)

2.5 TURBINAS HIDRÁULICAS

Para a implantação da CGH a escolha da turbina a ser utilizada é de suma importância. A turbina é um conversor de energia utilizado para converter a energia potencial em energia mecânica, por meio de motores, que pode ainda ser convertida em eletricidade. A energia mecânica é convertida em energia elétrica por um gerador elétrico, com base no princípio de funcionamento da turbina para converter a energia potencial da água em um mecanismo de energia (Apriani et al., 2020).

A energia hidráulica pode ser aproveitada por diferentes tipos de turbinas, escolhidas de acordo com as características do local como: potencial hidráulico, carga e vazão (Do Nascimento et al., 2020). No que se refere aos tipos de turbinas convencionais há vários tipos comumente usadas em micro centrais hidrelétricas, sendo essas de impulso ou reação. Alguns exemplos são: a turbina Turgo, turbina Pelton, turbina de fluxo axial, turbina de fluxo cruzado e turbina Francis (Pascuetti, 2021).

A utilização de TH para pequenos aproveitamentos energéticos foi estudada por Blanco; Secretan; Mesquita (2008) que já indicavam essa tecnologia para geração de energia em áreas remotas da Amazônia, com base em estudo prévio da hidrologia do local proposto.

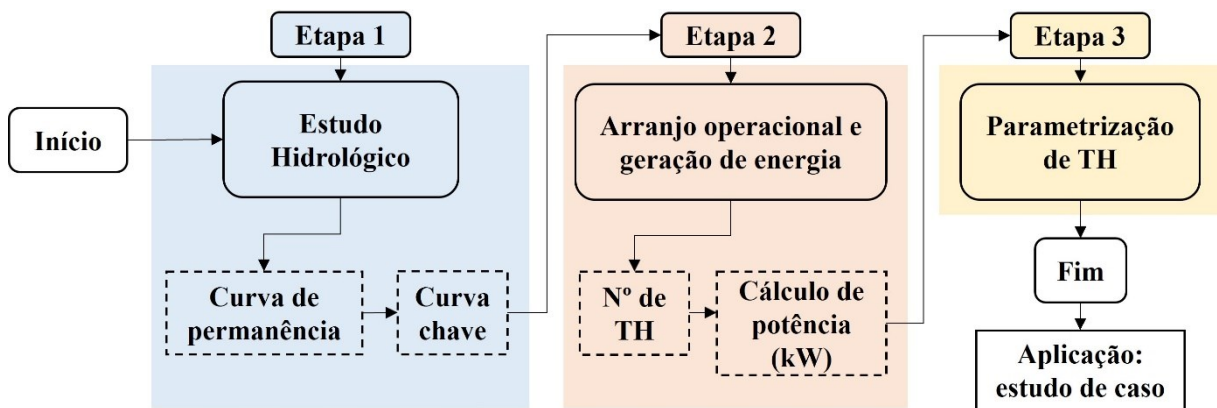
Mais tarde, Quintas; Blanco; Mesquita (2011) estudaram o fornecimento de energia elétrica para uma comunidade rural na Amazônia por meio da implantação de Micro Centrais Hidrelétricas (MCH) em pequenos rios da região, apresentando avaliações técnicas de custo-benefício. De Albuquerque Vinagre et al., (2016) estudou a otimização técnico-econômica da

geração elétrica de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) de baixa queda na Amazônia. Ismail e Lino (2015) investigaram uma turbina hidrocínética barata para uso em rios da Amazônia e garantir o acesso à eletricidade para comunidades remotas. Estudos mais recentes investigaram o potencial hidrocínético dos rios amazônicos (Santos et al., 2019; De Oliveira e Vestena, 2022) e afirmou que a energia gerada por CGHs convencionais na Amazônia poderia ser aproveitada com TH de baixa elevação (Chaudhari et al., 2021), incentivando a exploração de pequenos rios para atender comunidades isoladas.

3 METODOLOGIA

Este trabalho apresenta uma metodologia de aproveitamento do potencial de pequenos rios Amazônicos, de ultrabaixa queda e com vazões variáveis, para a geração de energia elétrica a partir da instalação de TH em instalações anexadas a pontes/barragens de concreto, as quais substituem pontes antigas em madeira. A Figura 5 ilustra a metodologia proposta e sua ordem de execução. A etapa 1 consistiu no estudo hidrológico de um corpo hídrico onde a MCH operaria, o qual consiste na elaboração da curva de permanência e da curva chave de um pequeno corpo d'água. Na etapa 2, o arranjo operacional e os aspectos energéticos do esquema adotado foram otimizados, considerando o estudo hidrológico da etapa 1. Para determinar o tamanho das máquinas para um aproveitamento específico, foi realizado a parametrização e similaridade das TH's, a partir de uma máquina existente na literatura (etapa 3). Finalmente, a metodologia foi aplicada em um estudo de caso.

Figura 5 - Etapas da metodologia e sua aplicação



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 ESTUDO HIDROLÓGICO

O estudo hidrológico é observado a partir de séries históricas obtidas em estações fluviométricas instaladas em BH (Bacias Hidrográficas). Esses dados são organizados e expressos em curvas que representam um corpo d'água de uma determinada BH. Infelizmente, dados hidrológicos, em muitos casos, são difíceis ou inexistentes, devido aos altos custos inerentes à implantação, operação e manutenção de redes hidrométricas, principalmente na região Amazônica, onde logística e barreiras naturais encarecem esses sistemas (Costa et al., 2012). Para contornar essa dificuldade, este estudo utilizou um modelo desenvolvido por Blanco et al. (2005) de chuva-vazão adaptado para pequenas BH da Amazônia, para

determinação das curvas chuva-vazão, importantes no dimensionamento da produção de energia em Micro centrais Hidrelétricas.

Trata-se de explorar ao máximo as informações existentes realizando a regionalização das vazões, geralmente de estações fluviométricas da mesma BH e mais próximas ao corpo d'água analisado, permitindo estimar variáveis hidrológicas em locais com insuficiência de dados. A Equação 1 mostra como regionalizar vazões, onde **ADP** é a área de drenagem da BH pretendida, **ADO** é área de drenagem observada e **Q_{RO}** é a vazão do rio observado.

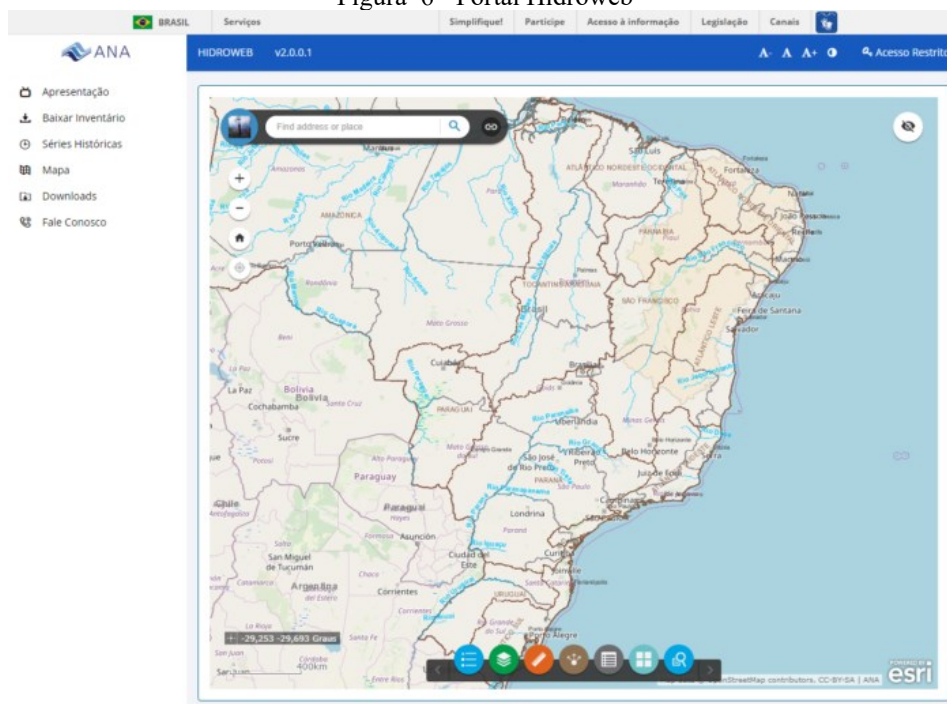
$$\frac{ADP}{ADO} \times Q_{RO} = 0$$

Equação 1

3.1.1 Curva de permanência (CP)

A relação entre a magnitude e a frequência das vazões de uma BH é chamada de curva de permanência (CP), que fornece uma estimativa do percentual de tempo que a vazão pode ser igualada ou superada no período histórico. Para ser construída, deve-se selecionar estações fluviométricas em operação localizadas na BH analisada, considerando séries históricas de vazões para o maior período de observações possível. Quando disponíveis, esses dados podem ser facilmente obtidos no banco de dados hidrometeorológicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), no portal HidroWeb, conforme observado na Figura 6.

Figura 6 - Portal Hidroweb



Fonte: Hidroweb, 2022

Em planilhas eletrônicas, os dados de vazões devem ser organizados de forma decrescente, associando a cada valor uma frequência excedente e uma possibilidade de plotagem empírica, conforme exemplificado na Figura 7

Figura 7 - Tratamento dos dados na planilha

	%	Q - Cachoeira Tracambeua (m3/s)	Q - Janari(m3/s)
1	0,01234	615,4	2,58468
2	0,024679	612,7	2,57334
3	0,037019	607,3	2,55066
4	0,049358	607	2,5494
5	0,061698	606,4	2,54688
6	0,074038	605,4	2,54268
7	0,086377	604,2	2,53764
8	0,098717	603,8	2,53596
9	0,111056	603,7	2,53554
10	0,123396	603,7	2,53554
11	0,135735	601	2,5242
12	0,148075	599,65	2,51853
13	0,160415	596,95	2,50719
14	0,172754	593,8	2,49396
15	0,185094	592	2,4864
16	0,197433	590,2	2,47884
17	0,209773	588,8	2,47296
18	0,222113	586,8	2,46456
19	0,234452	586,6	2,46372
20	0,246792	583	2,4486

Fonte: Elaborado pela autora

O método consiste em atribuir a cada vazão q uma probabilidade de excedência associada p , conforme apresentado na Equação 2, onde p é a frequência de excedência, q é a vazão, P é a função de probabilidade e $F_Q(q)$ é a função densidade cumulativa de probabilidade de vazões (Vogel E Fennessey, 1994).

$$p = 1 - F_Q(q) \quad \text{Equação 2}$$

3.1.2 Curva chave (CC)

A curva chave (CC) de um rio relaciona a altura do lençol freático ao seu fluxo correspondente em um determinado ponto ao longo do tempo (Maleki et al., 2020). A sua elaboração requer dados coletados em campo ou em estações hidrométricas que registram a vazão e a altura (altitude) da água ao longo do tempo, os quais, neste trabalho, foram coletados com medidor de vazão e velocidade Flow Tracker, do tipo ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), apresentado na Figura 8, e uma trena de fibra de vidro.

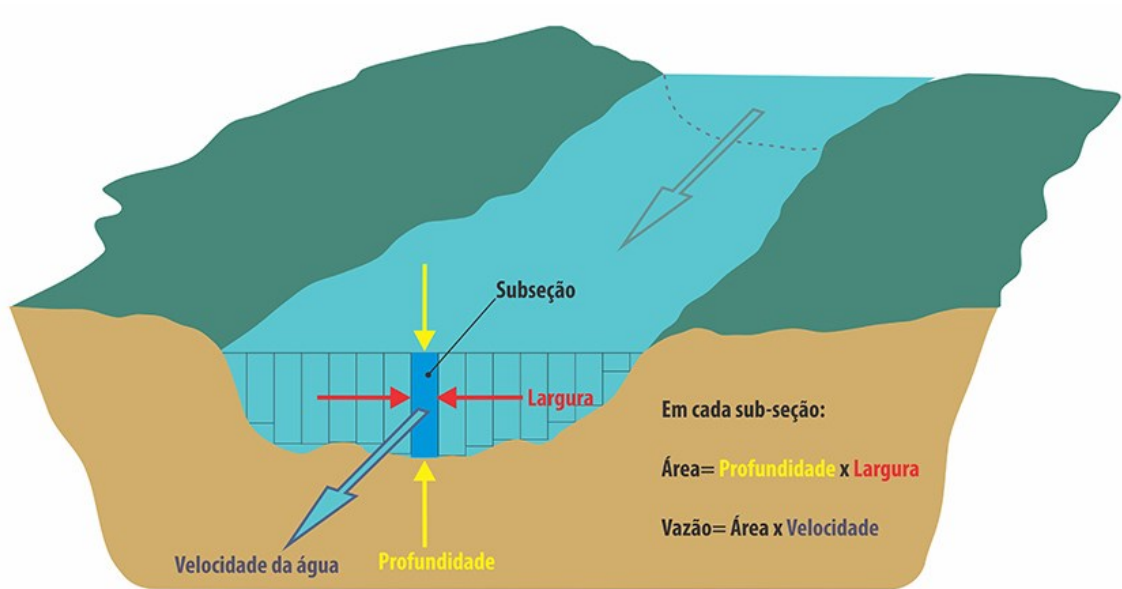
Figura 8 - Medidor de vazão



Fonte: Xylem, 2023

Na Figura 9 pode ser observado os procedimentos para a elaboração da CC de um corpo hídrico. Para medir a vazão, divide-se o rio em várias secções entre uma margem e outra, em cada secção é medida a profundidade e a velocidade em determinado ponto. Após, com todas as secções combinadas, a vazão total pode ser calculada. O procedimento de levantamento de dados se inicia na seleção do local com o fundo mais uniforme possível, e que seja seguro atravessar. Estica-se a fita métrica da trena de uma margem à outra de maneira que fique perpendicular às margens. Começando em uma das margens e digitando a localização e a profundidade no aparelho de medição, mede-se a velocidade em uma ou mais profundidades diferentes. Durante toda a medição a sonda do aparelho deve estar perpendicular à fita métrica e longe de qualquer obstáculo que possa causar distúrbio no fluxo do rio. De acordo com a profundidade, a velocidade média e a largura da estação, a vazão da estação é calculada, sendo a vazão total a soma de todas as estações. (Coelho, L. S.; Silva, J.F.R; Farias, J.A.M. 2013.)

Figura 9 - Seções para o cálculo da vazão



Fonte: InfoSãoFrancisco, 2021

Os dados coletados para cada período de medição são então organizados em planilhas eletrônicas para traçar um gráfico QxH (vazão e altura bruta). Em seguida, a curva deve ser ajustada por regressão matemática, utilizando a função que melhor se ajusta aos dados coletados. Por fim, pode-se utilizar a relação para prever os níveis de água com base no fluxo ou na altura.

3.2 ARRANJO OPERACIONAL E ASPECTOS ENERGÉTICOS

Com base na análise das curvas hidrológicas, o tipo de esquema da CGH pôde ser escolhido. Neste caso, foi considerado um esquema a fio d'água com turbinas paralelas visando um melhor aproveitamento da sazonalidade da região (Blanco et al. 2008). Essa configuração utiliza uma pequena barragem anexada à ponte para garantir a altura mínima para geração de energia, além de evitar o alagamento de grandes áreas e a simplicidade do projeto de baixo custo. A vazão excedente do rio segue por um vertedouro, que teve seu dimensionamento desconsiderado. As TH foram consideradas operando permanentemente, sendo a vazão de projeto (Q_T) a somas das vazões das TH, conforme a Equação 3. Se a vazão do rio permitir, o arranjo funciona com as turbinas de maiores potências operando no período entre o final da cheia e o início da seca, enquanto as turbinas menores operam na seca. Todas as turbinas aproveitam o potencial de pequenos rios para produzir energia elétrica.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \dots \dots + Q_n$$

Equação 3

É preciso ficar atento à faixa de operação da turbina, que pode influenciar à eficiência da máquina e, portanto, na geração de energia. A potência gerada com a operação da turbina é determinada pela Equação 4, onde P é a potência da turbina [kW], Q é a vazão [m³/s], ρ é a massa específica [kg/m³], H é a queda bruta [m] (definida em CC), g é a aceleração da gravidade [m/s²] e η é a eficiência da máquina. Para estimar a energia gerada, foram descontados 5% dos dias de um ano de operação para eventual manutenção.

$$P = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta}{1000} \quad \text{Equação 4}$$

3.3 PARAMETRIZAÇÃO E SIMILARIDADE DAS TH

Para definir os parâmetros e características adimensionais essenciais para o projeto e operação eficientes, reduzindo o número de variáveis experimentais que afetam um determinado fenômeno físico, deve-se utilizar a técnica de parametrização. Portanto, se fez necessário parametrizar uma TH para otimizar o desempenho e a eficiência em diferentes tamanhos, garantindo a operação segura e confiável do sistema para uma situação específica (Morani, 2018). A Equação 5 mostra os parâmetros adimensionais, onde ψ é o coeficiente de pressão, ϕ é o coeficiente de vazão, λ é o coeficiente de potência da turbina, δ é o coeficiente de diâmetro, Y é a energia específica, u é a velocidade tangencial da pá e C_m é a velocidade meridiana.

$$\psi = \frac{2Y}{u^2}; \quad \phi = \frac{C_m}{u}; \quad \lambda = \psi \times \phi \times \eta; \quad \delta = \frac{\psi^{\frac{1}{4}}}{\phi^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Equação 5}$$

Para esta metodologia, foram parametrizados dados de uma turbina experimentada por Samora (2016), tipo hélice tubular de cinco pás com fluxo axial, com parâmetros dimensionais apresentados na Tabela 1 e a relação dos parâmetros apresentados nas curvas de colina da turbina (Figura 10). Uma vez parametrizada, para definir o tamanho da máquina para explorar um local específico, foi aplicada a lei de similaridade, que se baseia no princípio de que o comportamento hidrodinâmico de uma TH em escala reduzida é semelhante ao comportamento de outra em escala real, desde que atendidas as condições de similaridade, ou seja, geometria, velocidade específica e número de Reynolds. A Equação 6 expressa a lei de similaridade, onde

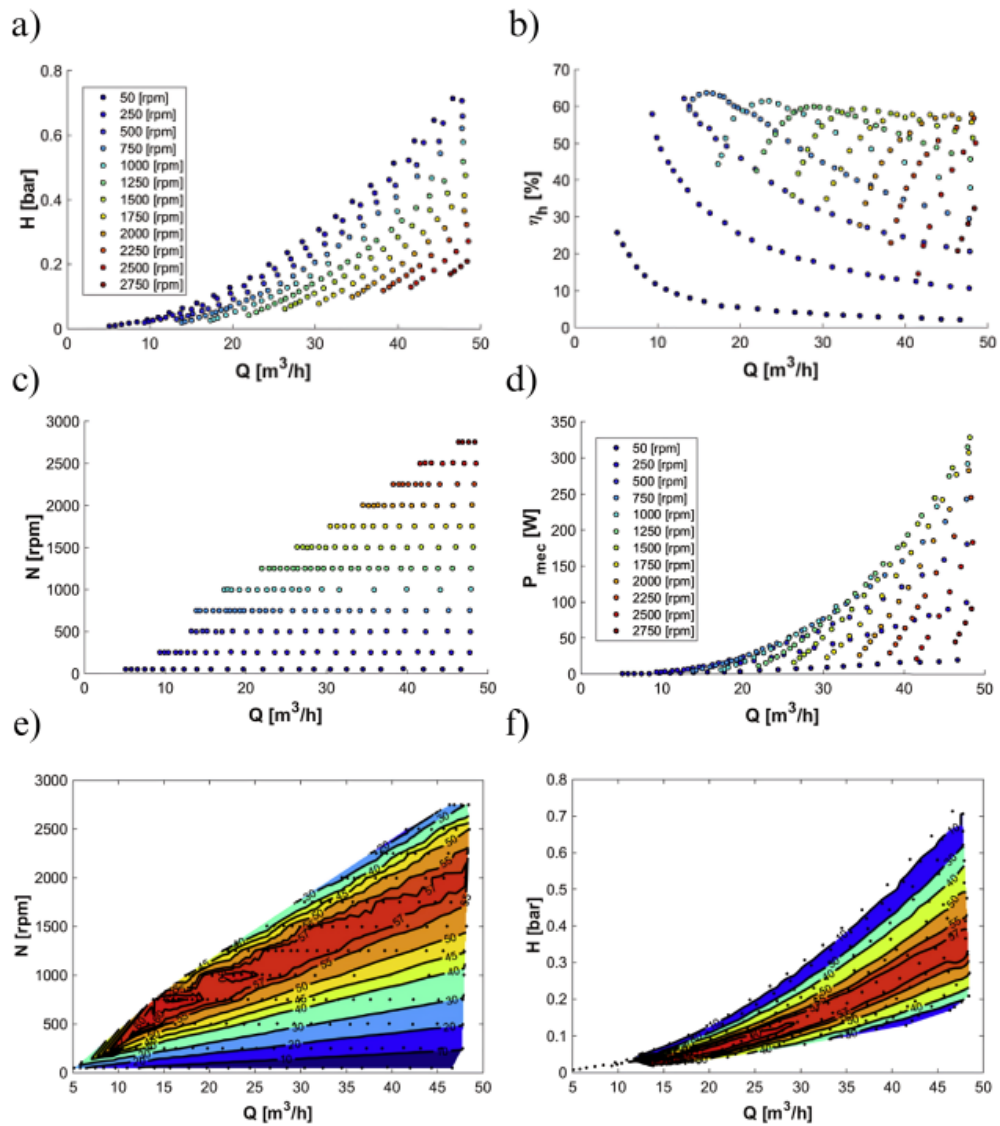
Q é a vazão, N a velocidade de rotação, D o diâmetro, P a potência, γ a densidade do líquido e η a eficiência da máquina.

Tabela 1 - Turbina Parametrizada neste estudo.

PARÂMETROS DIMENSIONAIS	
D [m]	0,0848
N [rpm]	1000
Q [m ³ /h]	35
H [m]	2,55
η [%]	49

Fonte: Samora et al. (2016)

Figura 10 - Relação entre vazão e altura manométrica (a), relação entre vazão e eficiência (b), relação entre vazão e velocidade de rotação (c), e relação entre vazão e potência mecânica (d), eficiência em função da vazão e velocidade de rotação (e), eficiência em função da vazão e altura manométrica (f)



Fonte: Samora et al. (2016)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad \frac{Y_1}{Y_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \quad \text{Equação 6}$$

3.4 ESTUDO DE CASO

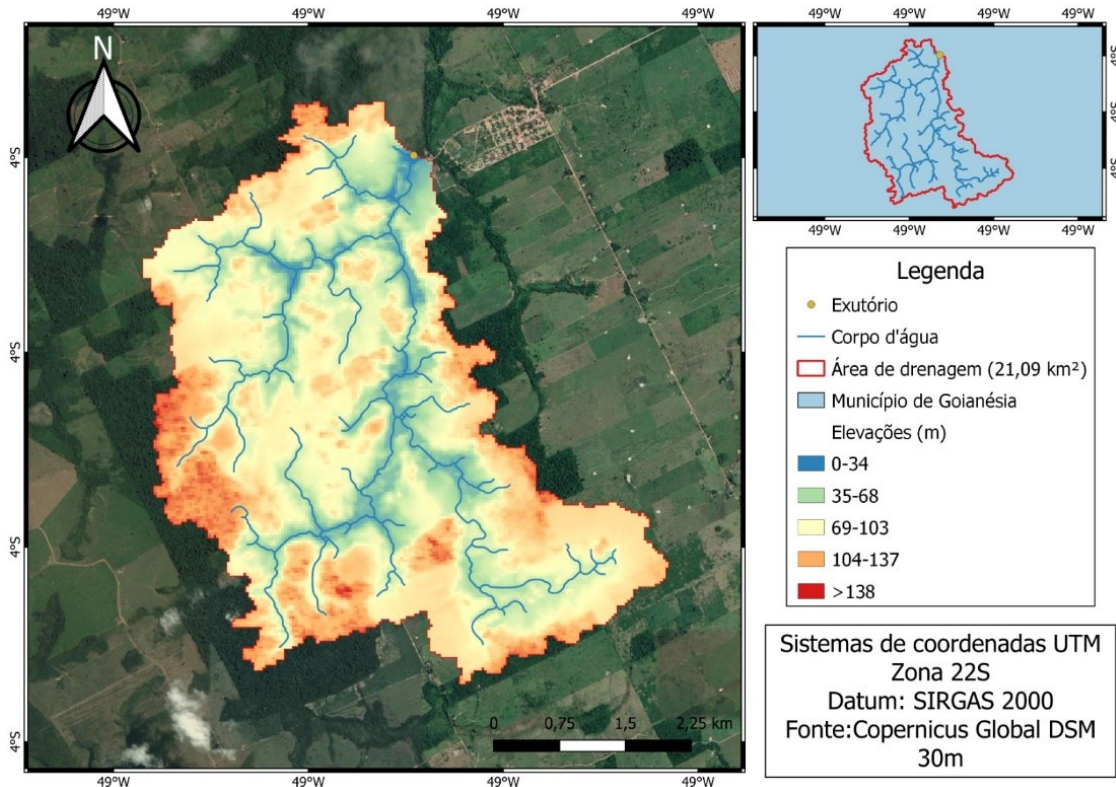
A metodologia proposta foi aplicada ao Igarapé água preta, corpo d'água da comunidade de Janari, distrito de Janari, localizado a 70 km de sua sede, município de Goianésia do Pará, sudeste do Pará, região Amazônica. O distrito tem uma área total de 2.138 km² e uma população de 5.000 habitantes. A Figura 11 mostra a localização do Pará no Brasil e do Janari no Pará (a), o detalhe do Janari (b), o Igarapé água preta sob a ponte de madeira (c) e a casa de farinha local. O corpo d'água possui alta vazão e baixa queda e pertence à bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, com área de drenagem total de 21 km² (Figura 12). O Janari possui uma pequena agroindústria de farinha de mandioca, que é administrada por uma associação local.

Figura 11 - Localização do Pará e Janari no Brasil (a), detalhando Janari (b), córrego Água Preta e ponte de madeira (c) e casa de farinha (d).



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 12 - Área de drenagem Igarapé Água Preta



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 13 apresenta parte da casa de farinha. Atualmente, este empreendimento é constituído por prensa de massa, forno, ralador e triturador, desintegrador e empacotador. Segundo a associação, pretende-se modernizá-la, recuperando os equipamentos que se encontram deteriorados e adquirindo equipamentos novos e mais modernos, sendo estes: descascador, lavador, peneira elétrica, prensa elétrica e balança. A partir da modernização do maquinário, a demanda industrial anual de energia elétrica foi estimada em 41.045 kWh/ano.

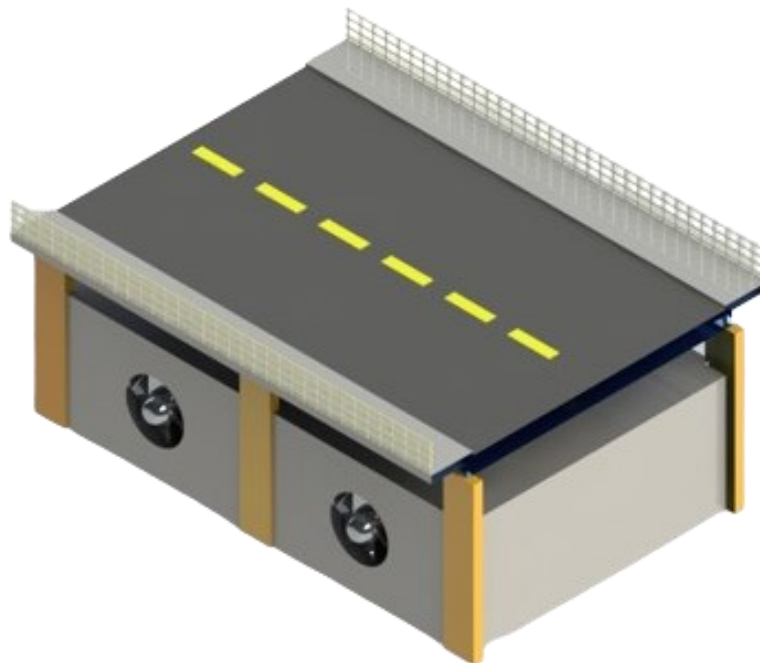
Figura 13 - Casa de farinha atualmente



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a substituição da ponte de madeira por uma de concreto, com infraestrutura anexa para uma CGH, pretende-se dar autonomia elétrica e maior competitividade ao empreendimento e garantir o escoamento seguro da produção e transporte em geral. A Figura 14 mostra um exemplo de uma ponte de concreto adequada para receber uma instalação de hidroturbina. O espaço abaixo da ponte é utilizado para instalar as turbinas, os quais estarão continuamente submersos até um certo nível. Dependendo das condições do fluxo do rio, comportas também podem ser instaladas para manter a água em um determinado nível mínimo.

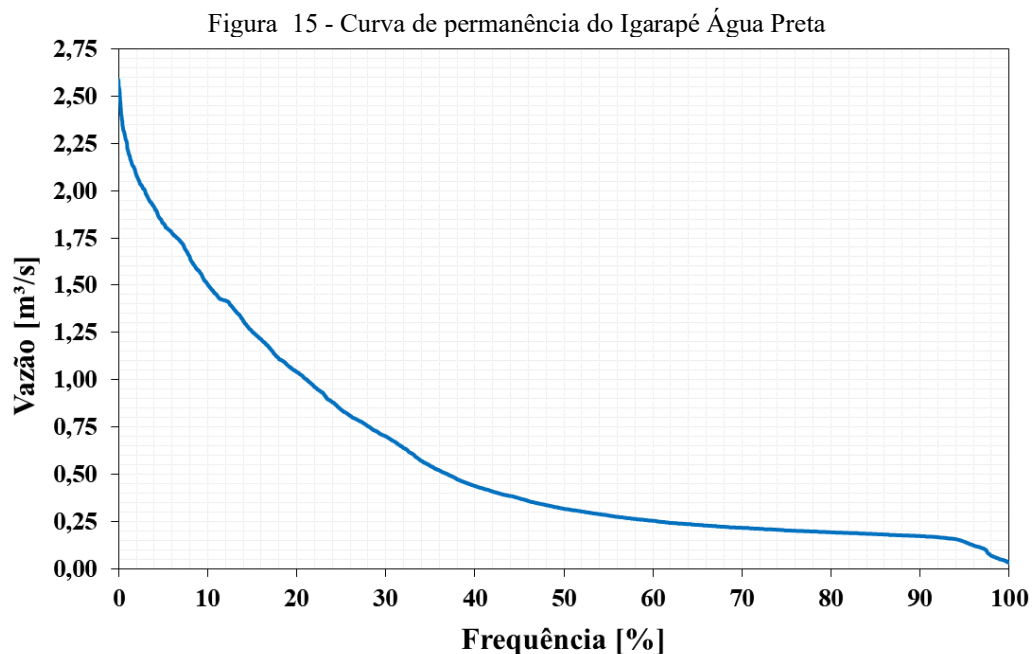
Figura 14 - Exemplo de ponte de concreto para a instalação de TH



Fonte: Elaborado pela autora

4 RESULTADOS

A Figura 15 apresenta a CP do Igarapé Água Preta. Para sua criação, por não haver Estação Fluviométrica que disponibilizasse dados de séries históricas do Igarapé Água Preta, foram selecionados dados da estação fluviométrica nº 31020000, no portal HidroWeb, Cachoeira Tracambeua, localizada no rio Moju, município de Moju no Pará. Foi utilizada uma série histórica de 20 anos e realizado a regionalização das vazões para a bacia em questão. Na Figura 15 podemos observar as vazões e frequência correspondentes do Igarapé, serão de suma importância para as próximas etapas a serem cumpridas da metodologia adotada.



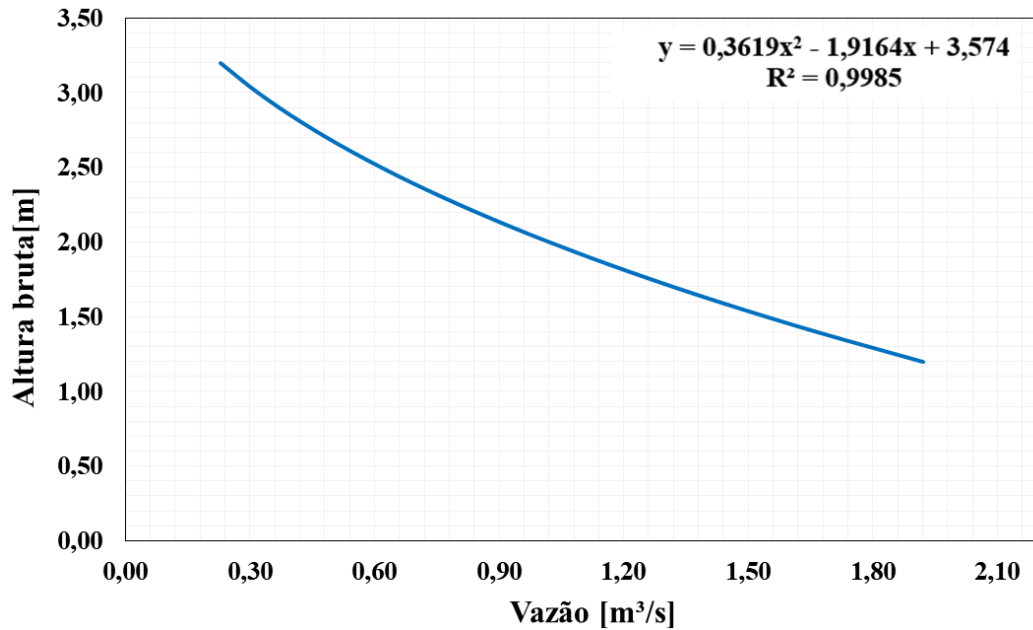
Fonte: Elaborado pela autora

Observa-se na figura a frequências das vazões para o Igarapé Água Preta e vê-se que as vazões mais altas são aquelas que menos ocorrem, como por exemplo, a vazão de 1,5 m³/s, com uma frequência de somente 10%. Por outro lado, o inverso ocorre para as vazões menores, por exemplo, com 95% das vazões igual a 0,15m³/s. A máxima vazão observada foi de 2,58 m³/s e a mínima de 0,032 m³/s com uma média de vazões de 0,30 m³/s.

A Figura 16 apresenta a CC do Igarapé Água Preta, que foi elaborada a partir das visitas ao Janarí e o estudo deste pequeno rio. A equipe de pesquisadores e residentes monitoraram o Igarapé com o medidor de vazão flow Tracker (a) e a coleta dos dados foi realizada (b), conforme mostrado na Figura 17. Na CC, é possível observar as cotas de altura bruta em relação a sua vazão correspondente. Com a instalação da ponte/barragem, foi fixado a cota a montante de 4,20 m, a partir da instalação da ponte/barragem. A sugestão de substituição da ponte de

madeira definiu a localização da ponte/barragem de concreto. No estudo de Quintas; Blanco; Mesquita, (2011), os autores decidiram o local da micro central com base no nivelamento do terreno, diferente do presente estudo.

Figura 16 - Curva Chave do Igarapé Água Preta



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 17 - Inserindo as informações no medidor FlowTracker (a) e a Coleta dos dados do Igarapé Água Preta (b).



Fonte: Elaborado pela autora

Pelas Figura 16 e Figura 17, é possível notar o pequeno porte do igarapé água preta. Embora o corpo hídrico tenha essa condição, ainda sim oferece um grande potencial que pode ser recuperado por TH.

4.1 TURBINAS OPERANDO EM PARALELO

Duas turbinas foram parametrizadas. A faixa operacional escolhida definiu que a vazão mínima é de 75% da vazão turbinada pela máquina e a máxima de 115% (Tabela 2), para uma

eficiência máxima de 60% (Samora et al. 2016). O sistema foi projetado com duas turbinas operando em paralelo, para melhor aproveitar a sazonalidade característica da região amazônica. A vazão total, Q_T , é a soma das duas turbinas. Além disso, o sistema continuará operando quando a vazão do Igarapé diminuir assumindo Q_T igual a vazão Q_2 .

Tabela 2 - Faixa de operação

Q₁		Q₂	
Q ₁ [m ³ /s]	0,31	Q ₂ [m ³ /s]	0,20
Q- [m ³ /s]	0,21	Q- [m ³ /s]	0,14
Q+ [m ³ /s]	0,35	Q+ [m ³ /s]	0,23

Fonte: Elaborado pela autora

Quando a vazão do Igarapé Água Preta estiver acima do valor superior (Q^+) na faixa de operação adotada de Q_1 , a usina terá as duas turbinas operando em paralelo, de janeiro a maio. Após esse período, quando a vazão do Igarapé for menor que o valor mínimo de Q_1 , esta será desligada e Q_2 operará sozinha de junho a dezembro. Toda a vazão não turbinada é despejada pelo extravasor.

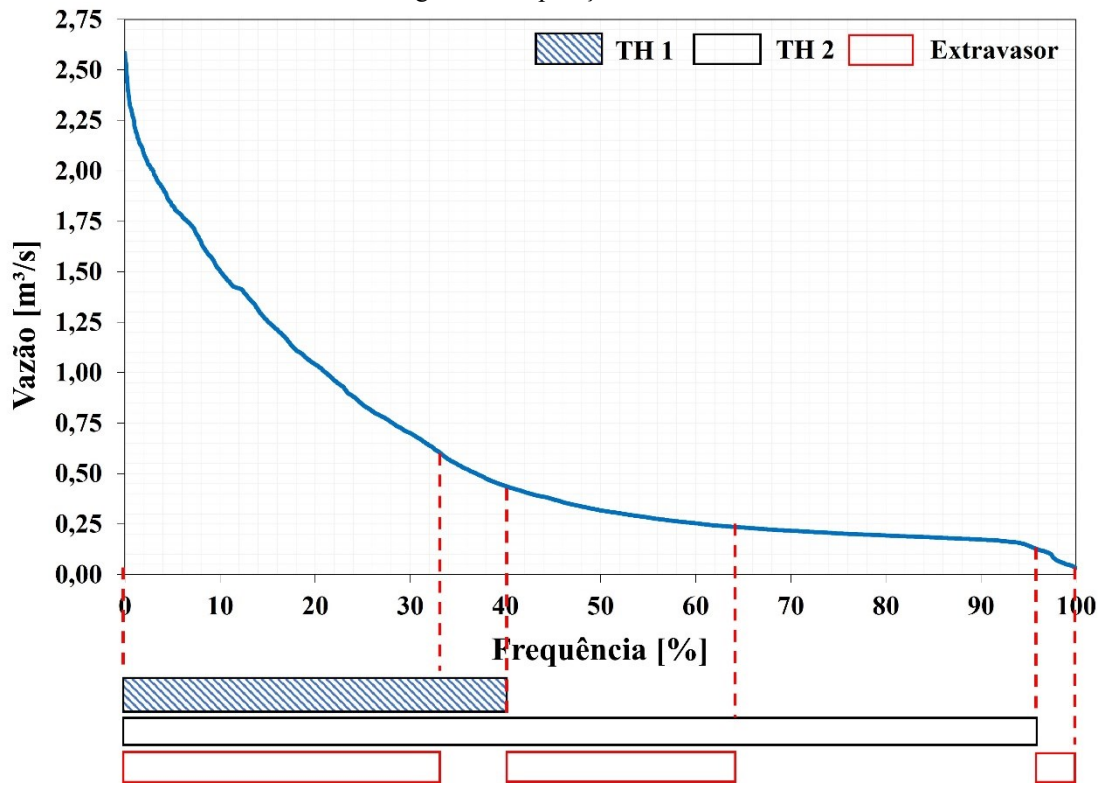
Os parâmetros das novas turbinas são apresentados como **D** diâmetro externo, **d** diâmetro interno, **R** raio, **A** a área, **N** velocidade rotacional, ω o coeficiente angular, **u** a velocidade tangencial, **C_m** a velocidade meridiana, **Q** vazão, **Y** a energia específica e **H** a queda bruta, relatados na Tabela 3. A operação das TH, em conjunto com o extravasor, e a potência gerada de acordo com a operação são exemplificadas na Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

Tabela 3 - Turbinas parametrizadas.

Q₁		Q₂	
D [mm]	460	D [mm]	365
d [mm]	230,54	d [mm]	182,93
R [m]	0,23	R [m]	0,18
A [m ²]	0,12	A [m ²]	0,078
N [rpm]	200	N [rpm]	260
ω	20,95	ω	27,22
u	4,82	u	4,97
C _m	2,50	C _m	2,57
Q [m ³ /s]	0,31	Q [m ³ /s]	0,20
Y [m ² /s]	29,43	Y [m ² /s]	31,31
H [m]	3	H [m]	3,20

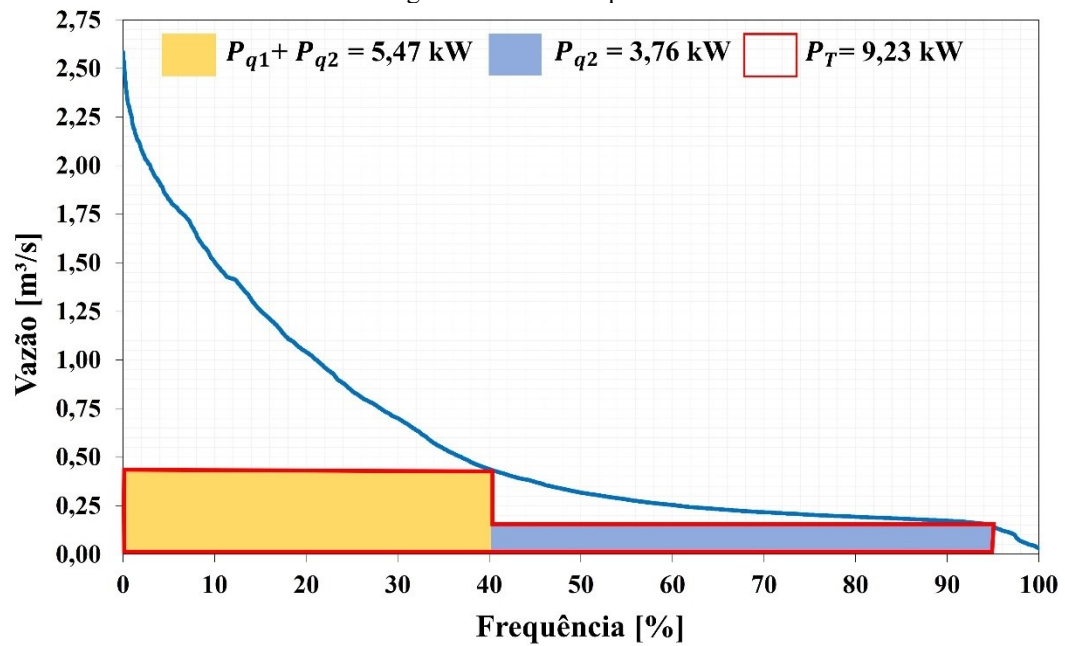
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 - Operação das TH



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 19 - Potência produzida

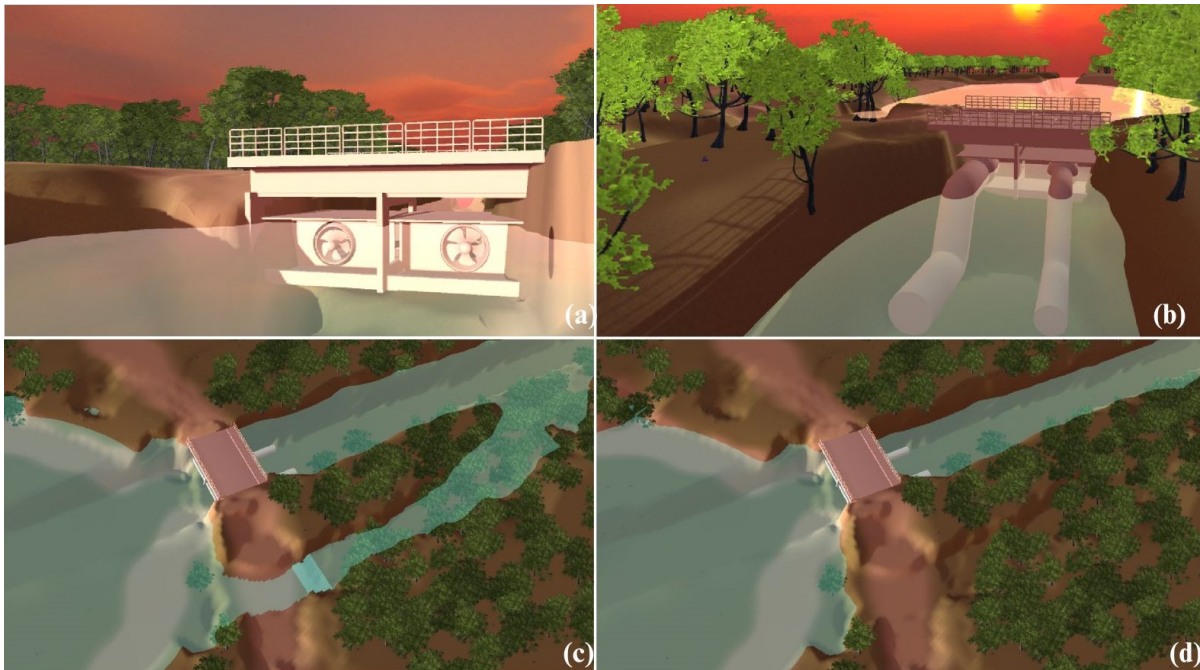


Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 18, como dito anteriormente, apresenta as maiores vazões Q_1 e Q_2 operando em conjunto paralelamente e o excesso de vazão sendo vertido. Conforme a vazão do Igarapé

for diminuindo e não atingir mais o intervalo de operação de Q_1 , esta máquina é desligada e Q_2 passará a operar sozinha. Na Figura 19 é possível observar as diferentes potências produzidas em função de quais turbinas estão em funcionamento. Observa-se que o período que o esquema estará operando com maior potência será nas cheias (vazão elevada), onde as duas turbinas estarão operando paralelamente, chegando a máxima de 9,22kW de potência produzida. A menor potência será atingida no período de estiagem (baixas vazões), onde estará em funcionamento somente a turbina Q_2 de tamanho menor, produzindo 3,72 kW de potência.

Figura 20 - Montante da CGH (a), Jusante da CGH (b), Período com vertimento (c) Período sem vertimento (d)



Fonte: Elaborado pela autora

É possível observar na Figura 20 um exemplo do sistema proposto, sendo apresentada a vista da montante da ponte-barragem e CGH com as duas turbinas submersas (a), a vista da jusante (b) e a ilustração da CGH operando com o excesso de vazão sendo extrasado pelo vertedoudo natural (c). Assim como o funcionamento sem vertimento de vazões.

4.2 PRODUÇÃO DE ENERGIA PARA O EMPREENDIMENTO

A demanda energética da casa de farinha foi estimada com base na demanda máxima, ou seja, com todos os equipamentos funcionando simultaneamente. A CGH opera 95% dos dias do ano, com intervalo de 18 dias (5%) para eventuais manutenções. A geração de energia estimada foi de 47.244,94 kWh/ano, conforme relatada na Tabela 4. Esse total, é o suficiente

para o atendimento da demanda de energia da casa de farinha do Janarí, que foi estimada em 41.045,36 kWh/ano.

O excedente, 6.190,57 Wh/ano, pode atender expansões na indústria ou casa locais. Por exemplo, se considerarmos a classificação da Equatorial Energia, concessionária atuante no estado do Pará, para residências de baixa renda, com o consumo de até 220 kWh/mês, a energia sobressalente poderia atender de três à quatro casas por ano (Equatorial, 2023). Caso o esquema necessitar de manutenção por um período prolongado, Quintas et al. (2011) sugerem que a comunidade seja abastecida por outras fontes de energia, como eólica, solar ou geradores. Evidentemente, o terceiro não é atraente pela queima de combustível fóssil.

Tabela 4 - Energia gerada.

	Q ₁ [m ³ /s]	Q ₂ [m ³ /s]	Total
P [kW]	5,47	3,76	9,23
E [kWh/ano]	23.623,49	24.334,14	47.244,94
Demanda de energia da casa de farinha [kWh/ano]			41.045,36
Excedente de energia [kWh/ano]			6.190,57

Fonte: Elaborado pela autora

Além disso, a utilização da micro central é a opção mais favorável para esses casos, pois é uma tecnologia já consolidada e, além disso, uma fonte mais concentrada do que a energia eólica e solar. Ao mesmo tempo, sua instalação em áreas rurais oferece benefícios às comunidades atendidas (Blanco et al. 2008), como autonomia elétrica para o empreendimento, proporcionando maior competitividade no mercado, alavancando a economia e o desenvolvimento comunitário.

A instalação da CGH também causa impactos ambientais negativos com sua instalação, sendo um grande impacto de ordem ambiental os alagamentos para a construção de reservatórios de acumulação e para regularização de vazões, advindo dele ocorrem alterações no regime das águas, podendo ocorrer a formação de microclimas que prejudicam a diversidade biológica presente, podendo chegar a extinguir algumas espécies da fauna e flora (Terrin e Blanchet, 2023). Entretanto, seus efeitos são minimizados pelo tamanho do projeto instalado, por se tratar de uma usina de pequeno porte, Perszel Junior *et al.* (2020) sugerem que a CGH a fio d'água, apesar de muitas das vezes ter um aproveitamento mais baixo pela não utilização de reservatórios de acumulação, possui a vantagem do baixo impacto ambiental, como também a dispensabilidade de estudos hidrológicos mais aprofundados e menor investimento de capital.

A escolha da turbina utilizada também apresenta vantagens adicionais. Segundo Barruso Recuero (2020), a turbina axial apresenta vantagens como a redução dos impactos ambientais e redução de custos por ser específica para baixas quedas, como é o caso tratado aqui.

No que diz respeito aos impactos de ordem social, há um grande impacto negativo à população ribeirinha e que vive ao entorno dessas obras, por sofrerem deslocamentos da população, perda de plantações e áreas agricultáveis. Inclusive, a população afetada por esses projetos muitas das vezes não se beneficiam deles, tendo por exemplo uma diminuição do custo da energia. Na usina de Belo Monte no Pará a linha de transmissão vai para as regiões Sul e Sudeste (Terrin e Blanchet, 2023). Diferentemente do que ocorrerá neste projeto, onde o aproveitamento energético servirá a comunidade, suprimindo as necessidades do empreendimento da região e de casas locais, além de gerar empregos que alavancarão a economia.

Também ocorre o aumento da população que traz outras problemáticas como o aumento de resíduos sólidos, esgoto sanitário, entre outros. Todavia, esse crescimento populacional também traz um crescimento na economia.

A utilização dessa usina também traz benefícios relacionados ao cumprimento da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU) no Brasil, que propõe 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a ser cumpridas até 2030. A CGH contribui com o ODS de número 7, que aborda sobre a energia limpa e acessível e tem como metas: assegurar o acesso a fontes de energias confiáveis e sustentáveis para todos, aumentar a utilização de energias renováveis na matriz energética, garantir o acesso universal e a preços acessíveis do serviço, entre outros que com a implantação desse sistema auxiliariam o cumprimento da Agenda 2030.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de substituição de pontes em madeira por pontes/barragens em concreto com a instalação de CGHs integradas, com o uso de múltiplas micro turbinas hidráulicas, para aproveitar o potencial de pequenos rios amazônicos com ultrabaixa queda e vazões variáveis, gerando energia para comunidades isoladas na Amazônia rural. Com a aplicação da metodologia, foi gerado a CP e a CC do Igarapé água preta, necessárias para identificar as turbinas adequadas para aproveitar o potencial do sítio. De acordo com a análise das curvas, o sistema proposto vai operar com duas turbinas hidráulicas em paralelo de janeiro a maio. Após esse período Q_1 será desligada e a usina funcionará apenas com Q_2 pelo restante do ano. Q_2 operará sozinha de junho a dezembro.

As duas turbinas foram parametrizadas de forma a se adaptar à realidade do pequeno rio. No entanto, conseguiram apresentar resultados operacionais satisfatórios. Esse esquema pode gerar a potência de 5,47 kW e energia de 17.953,85 kWh/ano em T1, em T2 3,76 kW de potência e 29.291,09 kWh/ano de energia, totalizando 47.244,94 kWh/ano, suficiente para suprir a demanda de energia elétrica do empreendimento do Janari, de 41.045,36 kWh/ano, em sua totalidade ao longo do ano. O excedente pode ser utilizado para alimentar expansões na indústria ou quatro casas locais por um ano. Quando for necessário manutenções prolongadas que excedam os 18 dias estipulados, a demanda pode ser atendida por outras alternativas, como energia solar, eólica ou queima de combustíveis fósseis, sendo as usinas a melhor opção porque já é uma tecnologia consolidada e em maior concentração.

O mesmo sistema pode ser implantado com sucesso em diversas áreas da região amazônica ou similares. Atualmente, inúmeras pontes da região encontram-se no mesmo estado de degradação e necessidade de substituição, onde se pode avaliar a possibilidade de implementar trabalhos futuros semelhantes a este projeto. A substituição trará maior segurança no transporte e escoamento da produção e desenvolvimento para a região. Do ponto de vista do desenvolvimento sustentável, é uma boa alternativa, gerando energia de fonte renovável, causando baixo impacto ao meio ambiente e gerando empregos que contribuem para alavancar a economia e o desenvolvimento social da região, além de ajudar na execução dos objetivos da ODS.

Os impactos negativos gerados ao meio que será inserido devem ser minimizados, sendo necessário alguns meios de intervenção e prevenção. Entre eles, seguir a Política Nacional de Segurança de Barragens estabelecida pela Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que trata sobre a acumulação de água para quaisquer usos e tem como objetivo garantir a observação de

padrões de segurança que devem ser seguidos afim de reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências. Além disso, realizar o licenciamento da usina de maneira correta e realizando o Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e o Relatórios de Impactos Ambientais (RIMA). E a realização de campanhas de Educação Ambiental na comunidade.

Como estudos futuros, pretende-se otimizar o número de turbinas para o aproveitar a sazonalidade do local ou de outro corpo hídrico da Amazônia rural e realizar o estudo de viabilidade econômica da implantação da usina.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA), **HIDROWEB**, www.ana.gov.br, acessado em Março de 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Indicadores de qualidade**. Disponível em <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao/outorgas>. Acesso em: 03 jan. 2023.
- APRIANI, Y. et al. Analysis of the local energy potential connection with power plants based on archimedes turbine 10 kW. **Journal of Robotics and Control (JRC)**, v. 1, n. 5, p. 162–166, 1 set. 2020.
- BARRUSO RECUERO, M.A. **APROVECHAMIENTO DE SALTO DE AGUA MEDIANTE TURBINA EN POBLADO DE ZIMBABWE**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Tecnologías Industriais) - ICAI – Universidad Pontificia Comillas. Madri, 2020.
- BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y.; MESQUITA, A. L. A. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. **Energy for Sustainable Development**, v. 12, n. 3, p. 25–33, 2008.
- BLANCO, C. J. C.; SECRETAN, Y.; MESQUITA, A. L. A. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. **Energy for Sustainable Development**, v. 12, n. 3, p. 25–33, 2008.
- BERNARDO, A.; CAMPOS, J. **DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE VIABILIDADE DE UMA PONTE COM PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará. Tucuruí, 2018.
- BEZERRA, F. **IMPLANTAÇÃO DE CGH'S NA AMAZÔNIA UMA VISÃO GLOBAL COM ÊNFASE NOS ASPECTOS HIDROLÓGICOS, TECNOLÓGICOS, AMBIENTAIS E FINANCEIROS**. Dissertação (Concentração em energia) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Belém, 2007.
- BORGES JUNIOR, P.; MONTEIRO, M.C.S. ; BARROS, N.J. ; BORGES, Q.F. ; NEBOT, P.C. Distribuição de energia elétrica e políticas públicas: uma breve análise teórica na amazônia. **Revista de Ciências Humanas**, [S. l.], v. 2019, n. 2, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/RCH/article/view/11464>. Acesso em: 12 jun. 2023
- CHAUDHARI, S. et al. In-stream turbines for rethinking hydropower development in the Amazon basin. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 8, p. 680–687, 1 ago. 2021.
- CLAUBERG, A. P. C. .; HENKES, J. A. .; BECEGATTO, V. A. . FONTES HÍDRICAS: SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO E O INCREMENTO DAS PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. **Revista Brasileira de Meio Ambiente & Sustentabilidade**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 134–174, 2021.
- COSTA, A. S. et al. **REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA DE VAZÃO DE REGIÕES HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO PARÁ** *Revista Brasileira de Meteorologia*. [s.l: s.n.].

COELHO, L. S.; SILVA, J. F. R.; FARIAS, J. A. M. **Análise comparativa dos medidores descarga convencional (molinete) e medidores acústicos Flowtracker – ADV (Velocímetro Acústico Doppler) em medições a vau, nas subbacias 35 e 36 no estado do Ceará.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió, Anais XIX Simpósio brasileiro de recursos hídricos, ABRH: Maceió-AL, 2011.

DE ALBUQUERQUE VINAGRE, M. V. et al. Otimização do uso de turbinas axiais em pequenas centrais hidrelétricas da Amazônia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 88–98, 2016.

DE ALMEIDA, A. T. et al. **Small-hydropower integration in a multi-purpose dam-bridge for sustainable urban mobility.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2011.

DE OLIVEIRA, J. R.; VESTENA, L. R. Estimativa de disponibilidade hídrica para operação de uma central geradora hidrelétrica no Estado do Paraná. **Latin American Journal of Development**, v. 4, n. 1, p. 55–67, 20 jan. 2022.

DO NASCIMENTO, E. O. et al. Performance assessment of an Indalma hydro-turbine. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 12, 1 dez. 2020.

DISCHARGE - ULTRASONIC DOPPLER FLOWTRACKER. **Experimental hydrology**. Disponível em: https://experimental-hydrology.net/wiki/index.php?title=Discharge_-_ultrasonic_Doppler_FlowTracker. Acesso em: 01/11/2023.

DUARTE, A. R. C. L.; BEZERRA, U. H.; TOSTES, M. E. L.; DUARTE, A. M.; ROCHA FILHO, G. N. A proposal of electrical power supply to Brazilian Amazon remote communities. **Biomass Bioenergy**, v. 34, n. 9, p. 1314-1320, Sept. 2010

ENTENDA O QUE É: SÉRIE HISTÓRICA DE VAZÕES DE UM RIO. **InfoSãoFrancisco**, 2021. Disponível em: <https://infosaofrancisco.canoadetolda.org.br/artigos/explicando/entenda-o-que-e-serie-historica-de-vazoes-de-um-rio/>. Acesso em: 01/11/2023

FERNANDES, G. S. **CENTRAIS GERADORAS HIDRELÉTRICAS: UMA ANÁLISE PROCEDIMENTAL DE SUA APROVAÇÃO E VIABILIDADE.** Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.

FERNÁNDEZ, B.O. Sistemas de treliças modulares para pontes de madeira: uma boa alternativa para o Estado do Pará. 2010. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, **Universidade de São Paulo**, São Carlos, 2010. doi:10.11606/D.18.2010.tde-30082010-090913. Acesso em: 12/06/2023.

FIALHO, H. C. P.; BLANCO, C. J. C.; MESQUITA, A. L. A. Software proposal for small hydro power set up analysis. **American Journal of Hydropower, Water and Environment Sytems**, v. 2, p. 31–37, 15 jun. 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Statistics Data Browser**. 18 Aug 2022. Disponível em < <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=BRAZIL&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>> Acesso em 25 fev. 2023

ISA, M. A. et al. Assessing the sustainable development of micro-hydro power plants in an isolated traditional village west java, indonesia. **Energies**, v. 14, n. 20, 2 out. 2021.

ISMAIL, K. A. R.; LINO, F. A. M. **Hydrokinetic turbines for electricity generation in isolated areas in the Brazilian Amazon Performance Prediction of Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines View project Instrumentation for thermal and fluid area View project** Article in *International Journal of Engineering and Technical Research*. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/281407131>>.

MALEKI, A. et al. Numerical study on the effect of viscosity on a multistage pump running in reverse mode. *Renewable Energy*, v. 150, p. 234–254, 1 maio 2020.

MELO, G. DA S.; COSTA, F. S.; SILVA, L. C. DA. O cenário da produção do açaí (*Euterpe spp.*) no estado do Amazonas/ The production scenario of açaí (*Euterpe spp.*) in the state of Amazonas. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 7, p. 71536–71549, 15 jul. 2021.

O que são PCH's e CGH's?. **Associação Brasileira de PCH e CGH (ABRAPCH)**. Acesso em: 01/11/2023. Disponível em: <https://abrapch.org.br/2014/03/o-que-sao-pchs-e-cghs/>

PASCUETTI, D. Y. L. **Alternativas para regulação de velocidade de turbinas em micro centrais hidrelétricas**. Pato Branco: [s.n.]. Disponível em: <<https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/705717>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

PERSZEL JUNIOR, Alceu Luiz et al. ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE UMA MICROCENTRAL HIDRELÉTRICA A FIO D'ÁGUA. *Anais da Engenharia Mecânica / ISSN 2594-4649*, [S.l.], v. 5, n. 1, p. 81 - 99, dec. 2020. ISSN 2594-4649. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/392>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

QUINTAS, M.; BLANCO, C.; MESQUITA, A. **Projetos sustentáveis de CGH para pequenas comunidades isoladas da Amazônia**. , 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284463357>

RUTHES, J. **A CURVA DE PERMANÊNCIA E A DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA NO ESTADO DO PARANÁ**. Dissertação (Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2017.

SANTOS, I. F. S. DOS et al. Energy potential and economic analysis of hydrokinetic turbines implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. *Renewable Energy*, v. 143, p. 648–662, 1 dez. 2019.

SILVA, A. M.; VIEIRA, R. M. F. Energia eólica: conceitos e características basilares para uma possível suplementação da matriz energética brasileira. *Revista Direito Ambiental e Sociedade*, Caxias do Sul, v.6, n.2, p. 53-76, 2016.

SILVA, G. R. A. DA et al. Análise de tendências nas séries históricas de precipitação e curva de permanência de vazão no município Cachoeira do Piriá, Pará. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 6, p. e38210615850, 4 jun. 2021.

SonTek FlowTracker® Handheld-ADV. **Xylem Let's Solve Water**. Disponível em: <https://www.xylem-analytics.no/sontek-flowtrackerreg-handheld-advreg/>. Acesso em: 01/12/2023.

TERRIN, K. A. P.; BLANCHET, L. A. Direito de energia e sustentabilidade: uma análise dos impactos negativos das usinas hidrelétricas no Brasil. *Revista Videre*, [S. l.], v. 11, n. 22, p.

47–63, 2019. DOI: 10.30612/videre.v11i22.11215. Disponível em:
<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/videre/article/view/11215>. Acesso em: 05 dez. 2023.

VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 120, n. 4, p. 485-504, 1994.