

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KATIA BUSSOLO

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA PARA
GERAÇÃO HÍDRICA NO RIO ALEGRIA**

MEDIANEIRA

2023

KATIA BUSSOLO

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA PARA
GERAÇÃO HÍDRICA NO RIO ALEGRIA**

Implementation study of a small hydroelectric plant for water generation in rio alegria

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Marcos Fischborn

Coorientador: Evandro André Konopatzki

MEDIANEIRA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KATIA BUSSOLO

**ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PEQUENA CENTRAL HIDRELÉTRICA PARA
GERAÇÃO HÍDRICA NO RIO ALEGRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/junho/2023

Marcos Fischborn
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Evandro Andre Konopatzki
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Estor Gnoatto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Yuri Ferruzzi
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por todo suporte, apoio e ajuda que deram durante esses anos, por ensinar a sempre persistir para alcançar os objetivos. Em especial agradeço a meu pai José Coan Bussolo por me ajudar a levantar os dados desse estudo. A minha irmã Kacieli e meu namorado Gyovani pelo apoio e ajuda na realização deste trabalho.

Aos professores orientadores Marcos Fischborn e Evandro André Konopatzki pelos ensinamentos, ajuda, orientação e compreensão durante o desenvolvimento do trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a formação acadêmica durante esses anos.

RESUMO

A utilização da energia hídrica como fonte de geração para a energia elétrica vem desde a antiguidade. Conforme o passar dos anos e com o desenvolvimento da tecnologia o aumento do consumo dessa energia aumentou consideravelmente, sendo necessário a ampliação do setor energético. O Brasil é um país privilegiado geograficamente, com montanhas e planaltos, facilitando a formação de rios e quedas que são utilizados para geração hidrelétrica. Esse recurso tão abundante não é usado em sua totalidade, mas ainda assim é a principal fonte para geração elétrica, destacando as grandes centrais geradoras, as usinas hidrelétricas – UHE, porém as pequenas centrais hidrelétricas – PCH's também são importantes para exploração dos recursos hídricos de rios menores, como é o caso do Rio Alegria, situado na cidade de Medianeira. Neste trabalho será proposto o estudo do potencial elétrico do Rio Alegria para instalação de uma PCH.

Palavras-chave: energia elétrica – produção; usinas hidrelétricas; estudo de viabilidade.

ABSTRACT

The use of hydropower as the generation of electricity comes from antiquity. Over the years and with the development of technology, the consumption of this energy has increased considerably, requiring a source of energy from the energy sector. Brazil is a geographically privileged country, with mountains and plateaus and still not its formation of the main hydroelectric generators that its formation of rivers. Although the main source of generation is highlighted as large plants, hydroelectric plants - UHE, but small plants hydroelectric plants – PCH's, are also important for the exploitation of water resources in smaller cases, such as the Rio Alegria, located in the city of Medianeira. In this work, the study of the electrical potential of the Rio Alegria will be proposed for the installation of a PCH.

Keywords: electric power production; hydroelectric power plants; feasibility studies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Capacidade instalada SIN 2023	13
Figura 2: Fluxograma de atividades do estudo do inventario hidroelétrico - simplificado.....	18
Figura 3: Faixa de operação dos tipos de turbinas.....	23
Figura 4: Rotor da turbina Pelton	24
Figura 5: Turbina Pelton	24
Figura 6: Rotor da turbina Kaplan	25
Figura 7: Turbina Kaplan	26
Figura 8: Rotor da turbina Francis.....	27
Figura 9: Turbina Francis	27
Figura 10: Fluxograma de implementação de uma PCH.....	29
Figura 11: Localização da usina: Brasil (A), Paraná (B) e local exato (C).....	31
Figura 12: Bacia hidrográfica com Rio Alegria	31
Figura 13: Mapa de Hidrografia de Medianeira	32
Figura 14: Croqui da área de estudo.....	33
Figura 15: Altitude no ponto inicial	34
Figura 16: Altitude no ponto final.....	34
Figura 17: Hidrograma Rio Alegria - 2001/2018	36
Figura 18: Curva de permanência do Rio Alegria - 2001/2018	36
Figura 19: Rendimento das Turbinas	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas.
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica.
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas.
GMS	Graus Minutos e Segundos.
GPS	Sistema de Posicionamento Gobal
GW	Gigawatt.
N°	Número.
N_{qa}	Velocidade de rotação específica.
PCH	Pequena Central Hidrelétrica.
S	Sul
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
UHE	Usina Hidrelétrica.
W	West/Oeste.

LISTA DE SÍMBOLOS

Cv	Cavalo-Vapor.
GW	Gigawatt
Hz	Hertz.
J/kg	Joule por quilograma.
Kg/l	Quilograma por litro.
Km ²	Quilômetros quadrados.
kW	Quilowatt.
l/s	Litros por segundo.
M	Metro.
M ³ /s	Metros cúbicos por segundos.
MW	Megawatt.
Rpm	Rotações por minuto
rpm	Rotações por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Delimitação do tema.....	12
1.2	Problemas e hipóteses.....	12
1.3	Justificativa.....	12
1.4	Objetivo	14
1.5	Objetivos específicos	14
2	PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	15
2.1	História	15
2.2	Definição de usina hidrelétrica.....	16
2.3	Inventário hidrelétrico	16
2.3.1	Inventário hidrelétrico simplificado.....	17
2.3.2	Inventário hidroelétrico pleno.....	19
2.4	Funcionamento	19
2.5	Tipos de pch	20
2.6	Tipos de turbinas.....	21
2.6.1	Turbina Pelton	23
2.6.2	Turbina Kaplan	25
2.6.3	Turbina Francis.....	26
2.7	Implantação.....	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	30
3.1	Área de estudo.....	30
3.2	Materiais utilizados.....	33
3.2.1	Definição da altitude	33
3.2.2	Obtenção dos dados fluviométricos.....	35
3.2.3	Preenchimento de falhas	35
3.2.4	Estimativa de vazão.....	35
3.3	Escolha da turbina.....	37
3.4	Potencial hidroelétrico	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5	CONCLUSÃO.....	41

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia vem aumentando com o passar dos anos devido à indústria e ao comércio, simultaneamente com o deslocamento das populações no sentido aos centros urbanos. Assim indicando aumentos de consumo energético bastante desafiadores, principalmente quando leva-se em conta que a intensidade de uso de energia requerida por habitante torna-se cada vez maior. Com isso o investimento em novas fontes de energia vem crescendo fortemente, uma vez que uma das maiores preocupações da sociedade vem sendo reduzir o consumo oriundo de fontes petrolíferas (Knijnik et al, 1994).

No decorrer do período chamado de “crise do petróleo” (1973), vários autores realizaram trabalhos onde reuniram a preocupação com a economia de energia e a associação dos fatores ambientais ao projeto das edificações (Stein, 1978; Steadman, 1978). Nesses estudos foram analisados os fatores dominantes no uso e consumo de energia, ocorrendo a apresentação de soluções quanto ao aproveitamento de energia proveniente de fontes não renováveis para espaços construídos e para funções urbanas. Também durante a mesma década, surgiram vários estudos voltados à utilização de meios passivos para climatização dos ambientes edificados (Fitch, 1971; Anderson, 1976, Koenigsberger et al, 1977; Crowther, 1977; Vale e Vale, 1978; Wright, 1978; Mazria, 1979). As propostas apresentadas nesses estudos são igualmente soluções e novas alternativas, tanto para a arquitetura como para o urbanismo, com as preocupações sendo voltadas para a inter-relação entre os fatores ambientais e os espaços construídos, de forma a proporcionar conforto ao homem com menor gasto de energia. Na década de 80 pode-se destacar também inúmeros trabalhos que seguem a mesma linha (Izard & Guyot, 1980, Mascaró, 1985; Rivero, 1986; Frota & Schiffer, 1988; Romero, 1988).

Destaca-se como alternativa para o aumento da matriz elétrica nacional as Pequenas Centrais Hidrelétricas, tendo em vista que o Brasil possui dimensões continentais e inúmeras bacias hidrográficas com potencial de aproveitamento hidráulico para geração de energia elétrica. Apesar da quantidade de PCH's ainda ser relativamente baixa, se comparado com os demais tipos de empreendimentos do setor de energia, este tipo de usina geradora é muito vantajoso. Tendo um impacto ambiental mais baixo, em comparação às grandes hidrelétricas, seu custo e tempo de

construção também são menores, além de existirem programas de incentivo e menor burocracia para sua criação.

1.1 Delimitação do tema

Este estudo busca entender a viabilidade de implementação de uma PCH no Rio Alegria, qual a estimativa de potência que pode ser produzida a partir da vazão do rio bem como sua queda.

1.2 Problemas e hipóteses

A viabilidade de implantação pode ser determinada a partir da vazão, aplicada a um gráfico da curva de permanência e do desnível do rio, como calculado e apresentado por Marcolino e Steiner (2022) em seu trabalho sobre o Rio Capivari em Santa Catarina, onde concluiu-se a viabilidade de implementação, auxiliando no abastecimento de aproximadamente 600 residências, o que resulta no desenvolvimento do município.

O Rio Alegria é de menor porte que o rio Capivari por isso há possibilidade de a vazão do rio não corresponder aos requisitos que definem uma PCH.

1.3 Justificativa

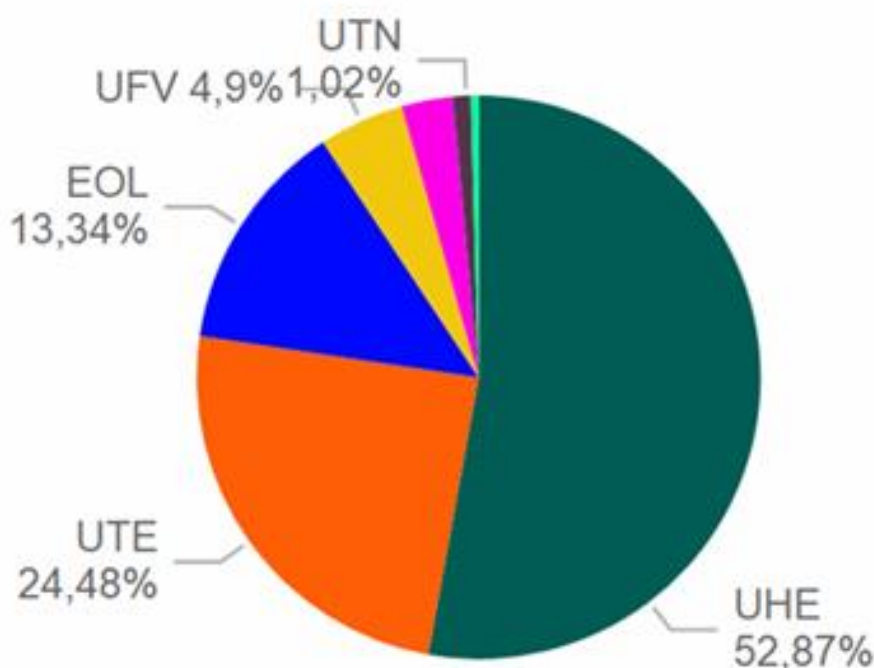
O uso de energia hidroelétrica faz parte da economia brasileira, dependendo mutuamente uma da outra ao longo da história (Portal São Francisco, 2016). Segundo Souza (2008) isso é reflexo das características hídricas naturais do país, por sua geografia que contém um grande número de montanhas e planaltos contribuindo para a formação de rios e quedas d'água.

A capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional – SIN é de 195.152,4 MW em junho de 2023, sendo que 52,87% é proveniente de fontes hídricas, como é mostrado na Figura 1 (ANEEL, 2023). Porém, estima-se que o potencial hidrelétrico brasileiro seja de 172 GW, mas a geração atual corresponde a apenas 60% desse valor (EPE,2019) onde cerca de 1.150 empreendimentos são constituídos de PCH's

e Centrais Geradoras Hidrelétricas - CGH's (ABRAPCH, 2022) que correspondem a 21,63% da geração juntamente com usinas eólicas e solares.

O Rio Alegria é responsável pelo abastecimento do município de Medianeira, nascendo na comunidade de São Miguel Arcanjo, interior de Medianeira, e deságua no Rio Ocoy. Uma das comunidades banhadas pelo Rio Alegria é a comunidade de Linha Alegria, a qual possui duas agroindústrias familiares. Também é neste local que será feito o estudo de implementação de uma PCH, pois neste local existe uma estrutura civil com aproximadamente 60 anos, onde, no passado funcionou um gerador elétrico com, segundo relatos dos moradores, 20 cv (15 kW) de potência, não sendo possível identificar seu modelo. O gerador foi utilizado na época para geração de energia para atender uma serraria, atividade que contribuía para o desenvolvimento da comunidade na época, e hoje se encontra desativado. Mas essa estrutura ainda se encontra no local e pode ser utilizada para geração hidrelétrica.

Figura 1: Capacidade instalada SIN 2023



Fonte: ANEEL (2023)

1.4 Objetivo

Analisar a viabilidade técnica e da implementação de uma pequena central hidrelétrica no rio Alegria.

1.5 Objetivos específicos

- 1) Calcular o potencial hidrelétrico a partir da estimativa de vazão do rio;
- 2) Apresentar os tipos de turbina viáveis para geração de energia, com base na vazão e do desnível do local;
- 3) Analisar a viabilidade técnica para utilização da estrutura existente no local.

2 PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

As PCH's são de suma importância no Brasil trazendo a oportunidade para utilizar a potência máxima de geração hídrica presente no país. Contendo definições específicas, esse tipo de usina se destaca ao ser utilizado em rios de pequeno porte, utilizando estruturas menores e menos complexos do que uma UHE.

2.1 História

A energia hidráulica é usada desde a antiguidade para gerar força mecânica, e a partir do século XX começou a ser usada como matéria prima para gerar energia elétrica (ANEEL, 2007). O projeto mais antigo de usina hidroelétrica que se tem registro é do ano de 1878, em Cragside, Inglaterra. Já a primeira usina foi construída em 1879, utilizando as quedas das cataratas do Niágara nos Estados Unidos da América (Pinto, 2013).

Os registros apontam que a primeira usina hidrelétrica brasileira foi construída durante o reinado de Dom Pedro II, no município de Diamantina, Minas Gerais (ANEEL, 2008), mas só começaram a ser construídas em grandes quantidades por volta do ano de 1920, devido ao aumento do consumo de energia elétrica ocasionado pela crescente industrialização do país e grande concentração populacional nas capitais. (Borges Neto, Carvalho, 2012).

Porém, essas grandes estruturas causavam discussões devido aos grandes impactos gerados a natureza. A partir disso incentivou-se a ideia da utilização de PCH's, por terem impactos ambientais e custo de geração menores (Pinto, 2013).

As primeiras instalações de PCH's ocorreram no final século XIX sendo utilizadas no século seguinte para atender locais isolados utilizando incentivo privado e das prefeituras das regiões (Leonelli,2002). As construções eram feitas em pequenos e médios rios, onde geralmente não eram formados reservatórios (Moura, 2008).

No Brasil o incentivo a utilização dos recursos naturais no setor privado, aconteceu a partir do ano de 1997 quando o estado teve seu monopólio extinto sobre o setor energético, incentivando assim a construção de PCH's. O primeiro manual de pequenas usinas hidrelétricas é de 1982. Nele era considerada PCH as geradoras que

apresentassem potência instalada total de 1 MW a 10 MW, contendo um conjunto turbina-gerador entre 1 MW e 5 MW, não necessitando de túneis, desvios de rio, etc. A barragem dos rios deveria ser inferior a dez metros, a vazão da tomada d'água inferior ou igual a vinte metros cúbicos por segundo.

2.2 Definição de usina hidrelétrica

O manual de usinas hidrelétricas da Eletrobrás (1982) definia que uma PCH deveria ter uma potência total instalada entre 1MW e 10MW, tendo uma capacidade conjunta turbina-gerador de 1 MW a 5 MW, não sendo preciso elaborar obras de tuneis para conduto adutor ou conduto fechado, desvios de rios, altura da barragem inferior a dez metros de altura, vazão inferior a 20 m³/s.

Em 2003 a Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL publicou o guia do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas, considerando válidos empreendimento com potência maior a 1 MW e igual ou menor que 30 MW, devendo ter uma área total de reservatório inferior ou igual a 3 km², a área total é determinada pelo valor da vazão na época de cheia considerando um período de 100 anos.

Usinas instaladas com potência total inferior a 1 MW são denominadas CGH, dependendo de apenas um registro para funcionamento, enquanto as PCH demandam de autorização da ANEEL, e precisam seguir aos procedimentos.

Com a mudança na Lei N° 9.648, de 27/05/98 de definição de Pequenas Centrais Hidrelétricas, foram autorizadas as dispensas de licitações para a execução de obras nessa área no caso de autoprodução ou produção independente. Se mantidas as características definidas em norma, será autorizada para execução.

2.3 Inventário hidrelétrico

O inventário hidrelétrico busca avaliar a potência de geração hídrica do rio onde ocorrerá a implementação, considerando fatores econômicos visando o aproveitamento ótimo, isto é, o máximo aproveitamento do potencial hídrico com menor valor possível para implementação. Outro ponto importante do inventário é a análise dos impactos ambientais, buscando formas de minimizá-los.

Esse estudo é importante para o planejamento da expansão da geração. Partindo do pressuposto que o potencial hidráulico é um bem da união, os procedimentos para o desenvolvimento desse estudo foram regulamentados pela ANEEL usando como base as normas de 1984 que precisavam ser atualizadas conforme a necessidade do setor elétrico.

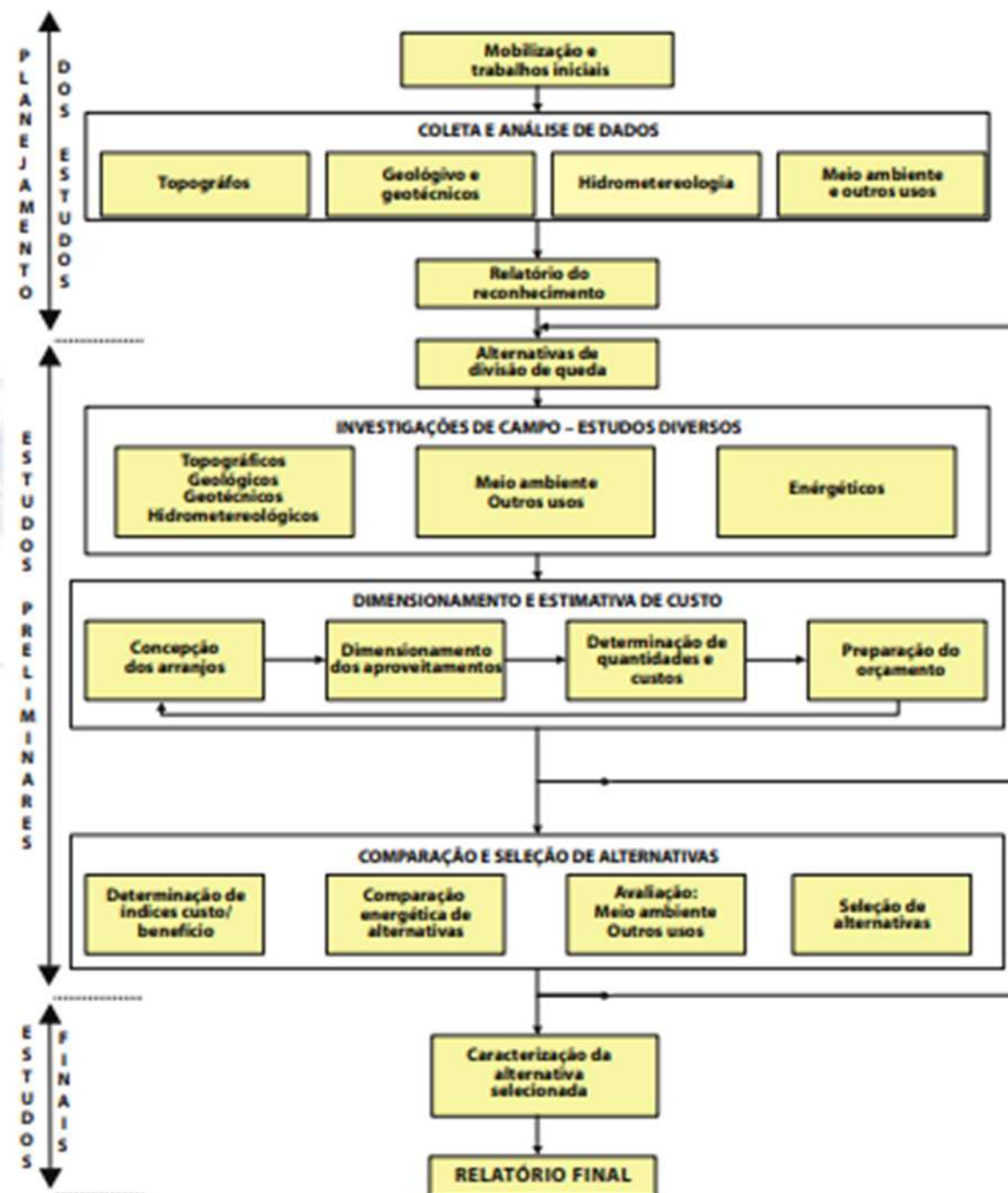
O registro para aprovação do estudo é definido pela Resolução da ANEEL no 393, de 04 de dezembro 1998, podendo ser feito de modo simplificado ou pleno.

2.3.1 Inventário hidrelétrico simplificado

É um estudo voltado para usinas de pequeno porte, geralmente PCH's. Nele são analisados condições topográficas, potência, energia, arranjos e custos, considerando principalmente os custos hídricos e restrições desse recurso. As atividades necessárias para desenvolver o estudo do inventário hidrelétrico podem ser demonstradas no fluxograma da Figura 2.

Os estudos são aplicados em rios onde é possível gerar potência entre 1MW e 50MW, porém, para instalações superiores a 30 MW, a ANEEL pode solicitar um estudo de inventário pleno.

Figura 2: Fluxograma de atividades do estudo do inventário hidroelétrico simplificado



Fonte: Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas (2003)

2.3.2 Inventário hidroelétrico pleno

A ANEEL diz que a utilização do inventário hidrelétrico pleno é feita para implementação de usinas de maior porte, isso é, acima de 50MW de aproveitamento do potencial hídrico como as UHE's.

2.4 Funcionamento

É necessária uma estrutura mínima de construção para que aconteça a transformação da energia mecânica produzida pela força das águas nas pás da turbina em energia elétrica. A primeira coisa que deve ser analisado é o desnível do local levando em consideração quantos metros de altura ela tem, podendo ser determinada como uma queda baixa com desnível abaixo de 40m, de 40 a 80m ser considerada média, e acima de 80m ser definida como alta (Vecchia, 2014).

Tipicamente uma PCH é construída a fio d'água, não sendo possível a regularização do fluxo de água do reservatório, o que pode acarretar uma vazão menor que a necessária para as turbinas, fazendo o sistema parar em determinados períodos. Para garantir uma boa geração é necessário observar a viabilidade de atender a característica descrita na norma, a utilização de um reservatório de até 3 km². Dessa forma é possível atender a produção máxima de energia contínua em comparação aos períodos com maior tempo de estiagem na vazão do rio de implantação (Araujo; Colli; Sales, 2017).

O funcionamento de uma PCH pouco difere de uma usina de grande porte contendo quatro componentes básicos (ANEEL, 2003).

- Barragem, utilizada para represar a água. Tem a função de elevar o nível do rio para alimentação da tomada d'água. No caso de usinas de acumulação regular a vazão de água nos períodos de seca, e também em locais com queda baixa para criar um desnível (Reis,2011). Construídas normalmente a partir de rochas, concreto ou terra (Pinto,2013).
- Sistema de adução e captação. O sistema de captação, também chamado de tomada d'água, é utilizado na retirada de água do rio, usando de recursos como grades de proteção, comportas ou tubos de aeração para

prevenir entrada de corpos estranhos que podem obstruir os condutos e maquinários que se seguem. (Borges Neto; Carvalho, 2012) definem o sistema de adução como a passagem da água entre sua entrada e as turbinas.

- Casa de força. Local que contém a maioria dos equipamentos utilizados, como painéis, geradores, reguladores e turbinas, sua configuração pode mudar de projeto para projeto (Reis,2011).
- Sistema de restituição. Essa é a etapa final da estrutura, tendo como principal objetivo dissipar a força da água após a passagem pelas turbinas, na tentativa de diminuir ao máximo a erosão do rio.

A água represada pela barragem é enviada através de dutos, túneis ou canais até a casa de força onde ocorre o deslocamento da turbina, convertendo a potência hidráulica em potência mecânica, executando a rotação do maquinário, transformando em potência elétrica no gerador. A partir disso, a energia gerada é transmitida por cabos ou barras de condução do local de geração até os transformadores, onde ocorre a elevação da tensão para transmissão aos locais de distribuição, onde a tensão será abaixada a níveis que possam ser utilizados pelos consumidores finais.

2.5 Tipos de PCH

As partes básicas de uma PCH são definidas entre reservatório, sistema de adução, potência instalada e queda do projeto.

Existem dois tipos de reservatórios. A fio d'água é utilizada quando a vazão do rio, na época de estiagem, é maior ou igual a quantidade necessária para atender a potência instalada, atendendo à demanda máxima (DNAEE, 1985). Segundo o manual da Eletrobrás (2000) esse tipo de usina dispensa estudos de regularização da vazão, estudo do consumo de carga elétrica e facilita o estudo e a execução do projeto.

O segundo tipo é o reservatório de acumulação, utilizado quando o valor da vazão do rio na época de seca é inferior à quantidade necessária para atender a demanda de potência. Para solucionar isso são construídos reservatórios para

acumular água e fornecer vazão mínima às turbinas. Podem conter regulação diária ou regularização mensal (Borges Neto e Carvalho, 2012).

Para definir o sistema de adução é necessário fazer um estudo econômico, comparando o escoamento da calha de adução, o fornecimento de água, a turbina com vazão de baixa ou alta pressão, por sistema em canal livre ou por meio de condução forçada, além de ser necessário um levantamento do local da instalação, analisando aspectos geológicos e topográfico.

A potência instalada e a queda d'água são aspectos que devem ser analisados juntos, pois um depende do outro para se obter uma classificação adequada, como mostrado no Quadro 1.

A partir do valor de queda e potência, é determinada a distância da casa de máquina da barragem. Em casos de altas quedas, a casa de força encontra-se mais distante do barramento, necessitando de uma forma de condução com longa extensão, enquanto que em locais com baixa queda, a casa de máquinas encontra-se no mesmo local que a barragem, sendo necessário fazer a incorporação do sistema de adução à represa.

Quadro 1: Classificação das PCH's quanto a potência e queda do projeto.

Classificação das Centrais	Potência (KW)	Queda do Projeto – H_d (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
Mini	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
Pequenas	$P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

Fonte: Eletrobrás (2000).

2.6 Tipos de turbinas

Reis (2011) diz que a escolha da turbina para o projeto é uma parte de suma importância para construção da usina hidrelétrica.

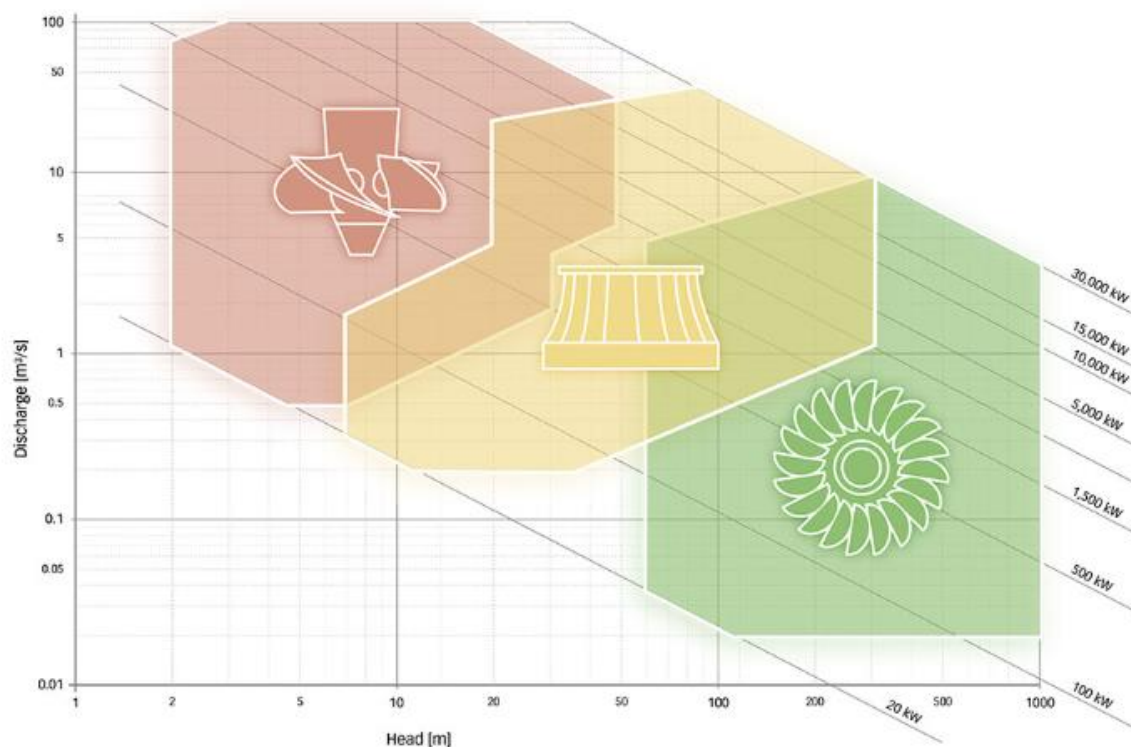
A partir dela a energia da água é transformada em energia mecânica que a partir de um gerador é transformada em energia elétrica. Podem ser comparadas a uma roda d'água moderna com mais eficiência na hora do uso (Soares Júnior, 2013).

As turbinas contém cinco partes, caixa espiral que distribui a água na turbina a partir de um tubo que se assemelha a um toroide envolvendo o rotor, o pré-distribuidor que conduz a água até a entrada do distribuidor, o distribuidor que determina o controle da potência, é formado por pás, podendo ter operação manual ou automática, o rotor ou eixo é a parte principal da turbina, onde ocorre a transformação de energia da água em potência, por fim o tubo de sucção, responsável por eliminar a água utilizada, normalmente tem um diâmetro maior no condutor do que na entrada.

Existem três tipos de turbinas mais utilizadas por empresas que trabalham no ramo da produção de energia elétrica, sendo elas as turbinas Pelton, Kaplan e Francis, cada uma definida a partir da altura da queda d'água.

Os princípios de funcionamento dessas turbinas são parecidos. A água entra na turbina passando pelo sistema de palhetas, onde essa controla o aumento ou diminuição da potência através de movimentos de abertura e fechamento para obter a potência respectiva, a partir disso a água passa pelo rotor, onde o mesmo transforma a energia cinética em mecânica a partir da velocidade de rotação e torque, após esse processo a água é conduzida novamente ao um ponto mais abaixo do rio. Outra característica em comum é que as turbinas podem ser instaladas de forma horizontal ou vertical, dependendo da necessidade.

Figura 3: Faixa de operação dos tipos de turbinas



Fonte: Hidroenergia (2018)

Na imagem acima pode-se identificar com a zona em vermelho para turbina Kaplan é mais indicada para vazões mais altas e declives menores. Em amarelo a turbina Francis mostra-se mais indicada para vazões e alturas medianas. De verde a turbina Pelton mostra-se com melhor funcionamento com vazão mais baixa e maiores desníveis.

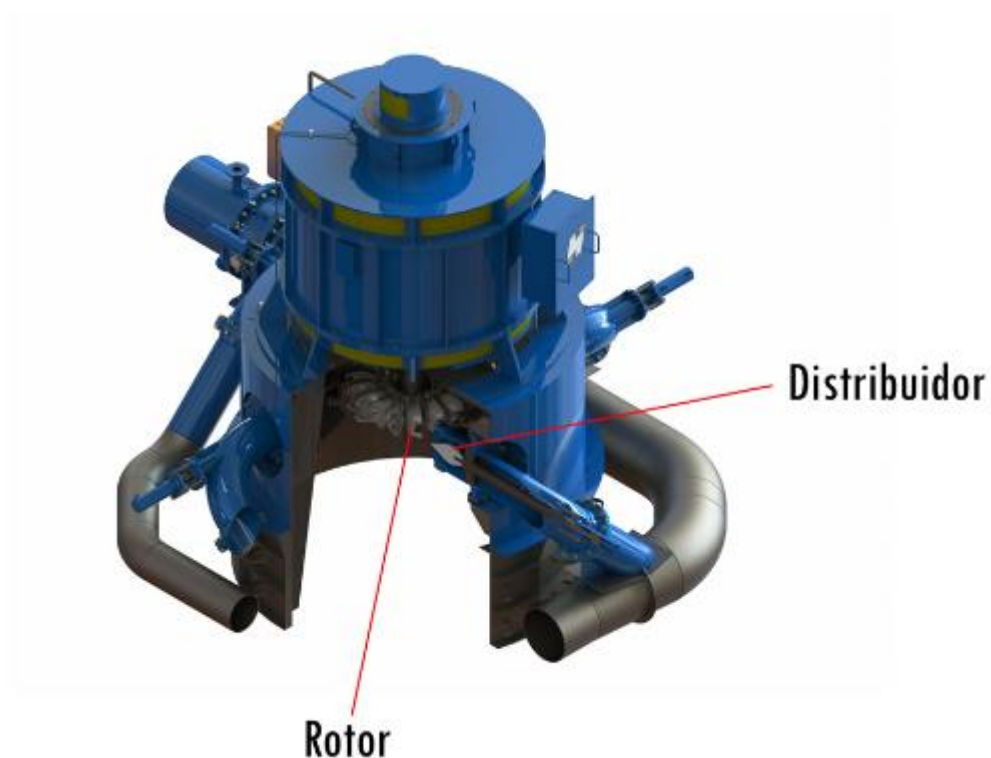
2.6.1 Turbina Pelton

Podendo ser consideradas uma das turbinas mais eficientes, estas são utilizadas em quedas d'água mais altas entre 60 a 1.000 metros de altura como na Figura 3, ou de 250 a 2.500 m conforme descrito por Borges Neto e Carvalho (2012). Foram desenvolvidas no ano de 1880 por Lester Allen Pelton, engenheiro norte americano. Essas turbinas possuem distribuidor em forma de bocais para lançar jatos de água, distribuindo e direcionado de forma cilíndrica sobre as pás em formato de concha contidas no rotor, como demonstrado na Figura 4, podendo conter até seis jatos. Quanto maior o número de jatos utilizados maior será a potência obtida. (Borges Neto; Carvalho, 2012).

Figura 4: Rotor da turbina Pelton

Fonte: Hidroenergia (2018)

Normalmente trabalham com o eixo na posição horizontal, com gerador acoplado do lado da turbina, ela contém dispositivos injetores que trabalham através de agulhas para a regularização de entrada nesse injetor (Pioro, 2016).

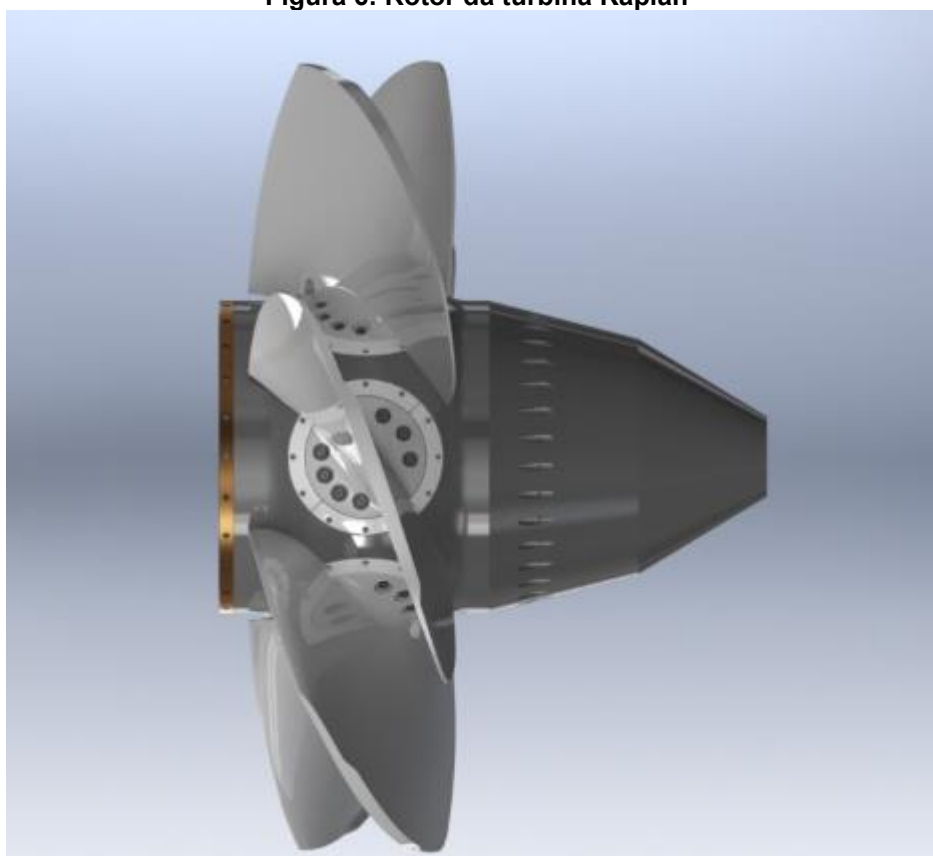
Figura 5: Turbina Pelton

Fonte: Hidroenergia (2018)

2.6.2 Turbina Kaplan

Projetadas por Victor Kaplan em 1912 essa turbina possui poucas pás, de duas a seis, onde a mesma tem forma parecida com as hélices marinhas, Figura 6 , parecendo um propulsor de navio, a direção do ângulo de inclinação das mesmas é determinada por manivelas e êmbolo dentro do cubo do rotor (Soares Junior, 2013), determinada também pela forma como o distribuidor se abre, regulando o grau de eficiência para baixas vazões (Smith,2000). Projetada para pequenas quedas variando de 15 a 60 m, trabalhando em velocidades mais altas se comparado a turbina Francis nas mesmas alturas (Pioro, 2016).

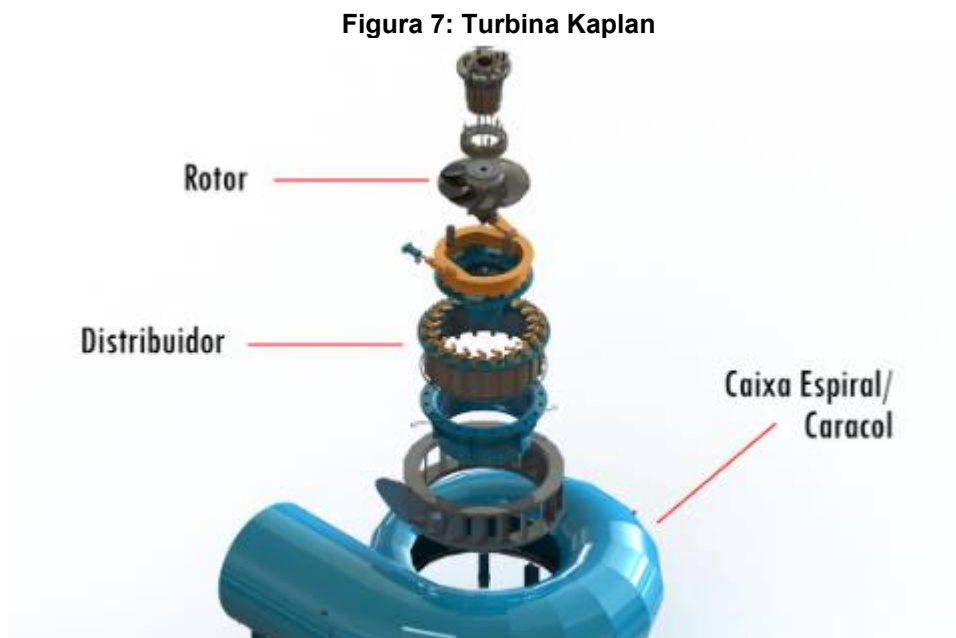
Figura 6: Rotor da turbina Kaplan



Fonte: Hidroenergia (2018)

Funciona com a água sendo disposta em toda área do distribuidor, que tem a função de fazer a água circular em torno do eixo da roda e ajustar o fluxo, com a água batendo axialmente nas pás, transformando a energia hidráulica em mecânica na

saída recuperando sua energia cinética ao passar por um difusor divergente (Brekke,2001).



Fonte: Hidroenergia (2018)

2.6.3 Turbina Francis

Desenvolvida pelo Engenheiro inglês James Bicheno Francis, em 1847 são caracterizadas por terem escoamento perpendicular ao eixo na sua parte interna. A água entra na turbina por uma tubulação espiral, forçando a saída de forma radial ao eixo graças as suas pás estáticas, Figura 8 (Pinto,2003).

Essas turbinas são adequadas para vários tipos de vazões e pressão, pois possuem uma alta faixa de operação (Brekke,2001).

O grande diferencial das turbinas Francis é que podem ser usadas com o eixo na vertical ou horizontal, são usadas em alturas que variam entre 10 e 250 m, trabalhando com um tipo caracol fazendo a água chegar ao rotor através da força da gravidade, acionando as pás móveis fazendo o rotor girar no mesmo eixo que o gerador (Pioro, 2001).

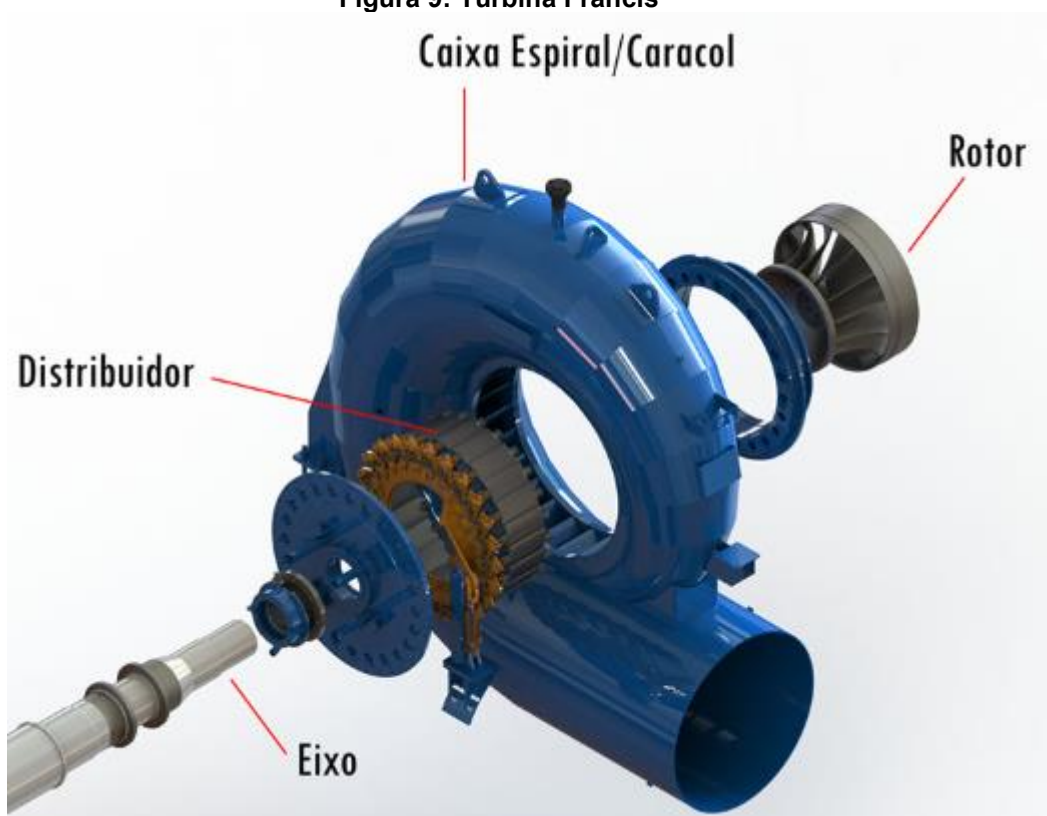
Outra característica que difere a Francis das demais turbinas é que ela pode ser usada tanto como turbina como bomba hidráulica (Smith, 2000).

Figura 8: Rotor da turbina Francis



Fonte: Hidroenergia (2018)

Figura 9: Turbina Francis



Fonte: Hidroenergia (2018)

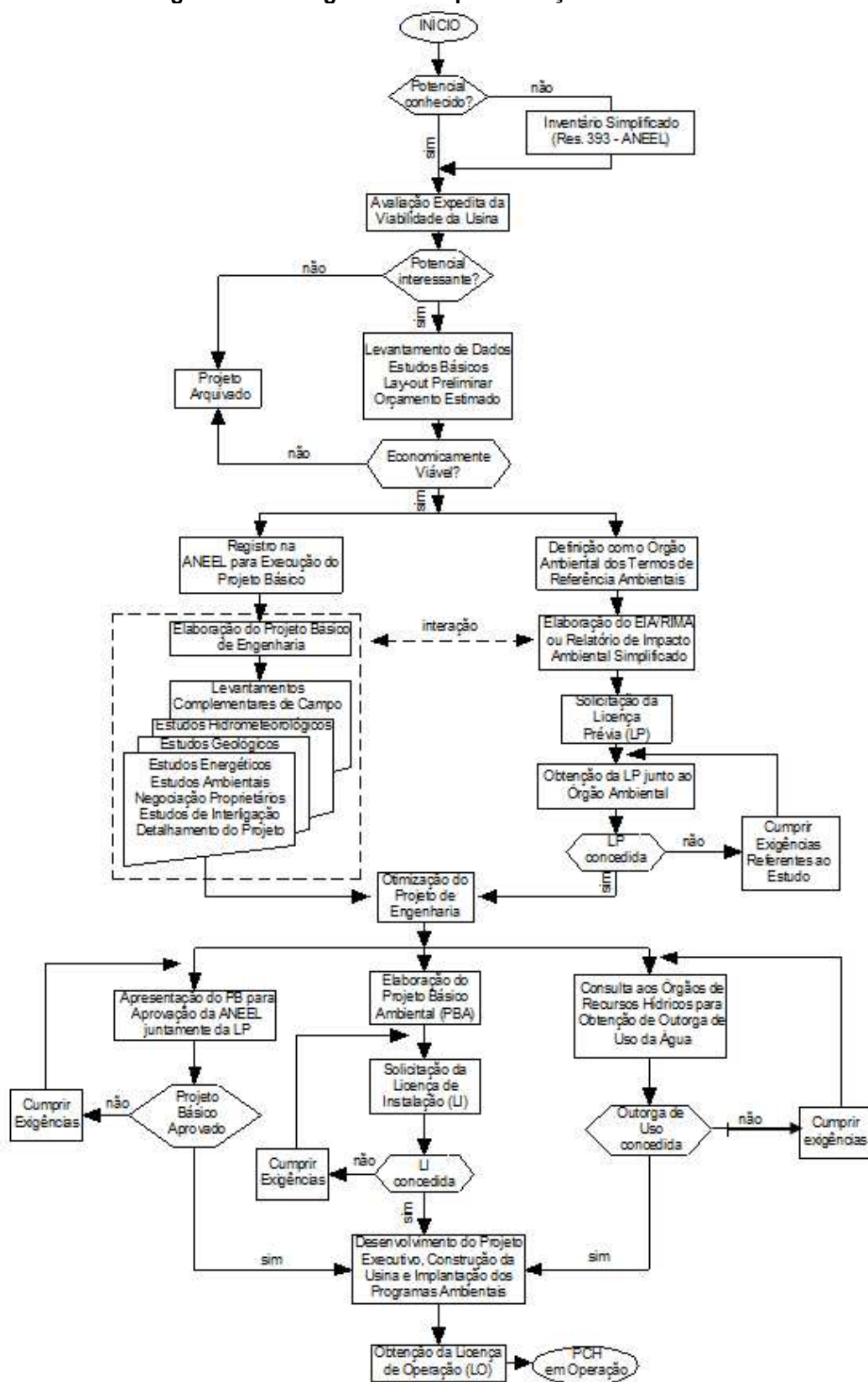
2.7 Implantação

Para realizar a implantação de uma PCH é necessário começar pelo inventário hidrelétrico do local analisado, devendo ser realizado conforme a resolução nº 393, de dezembro de 1998 da ANEEL, seguido de um estudo de potencial e de viabilidade do projeto, estimando um orçamento e confeccionando um plano inicial. Sendo possível executar o plano, parte-se para o projeto da hidrelétrica. É necessário fazer uma análise de tratamento ambiental, precisando de licenças ambientais como a licença prévia, licença de instalação e licença de operação para utilização da água para fim específico da geração de energia.

Faz-se necessário um registro na ANEEL do projeto básico, baseado em vários estudos em engenharia, meteorologia e geologia juntamente com um estudo de interligação da usina na rede elétrica ou se ela funcionará isoladamente.

Após todos esses procedimentos feitos, são realizados testes individuais em cada equipamento buscando possíveis falhas. Após aprovada, é solicitada a licença de operação para que a mesma entre em funcionamento.

Figura 10: Fluxograma de implementação de uma PCH



Fonte: Eletrobrás.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O estudo será realizado a partir de uma pesquisa aplicada, buscando colocar em prática os conhecimentos vindos da pesquisa científica, caracterizando-se como uma pesquisa exploratória.

Utilizando da metodologia descritiva para demonstrar as análises bibliográficas da área de estudo das usinas hidrelétricas, bem como estrutura, implementação, maquinários e sistemas utilizados.

Será realizada uma pesquisa de campo no local de estudo para determinação do desnível do terreno com auxílio de instrumentos.

A determinação da vazão será realizada a partir de dados fluviométricos consultados na Agência Nacional de Águas - ANA.

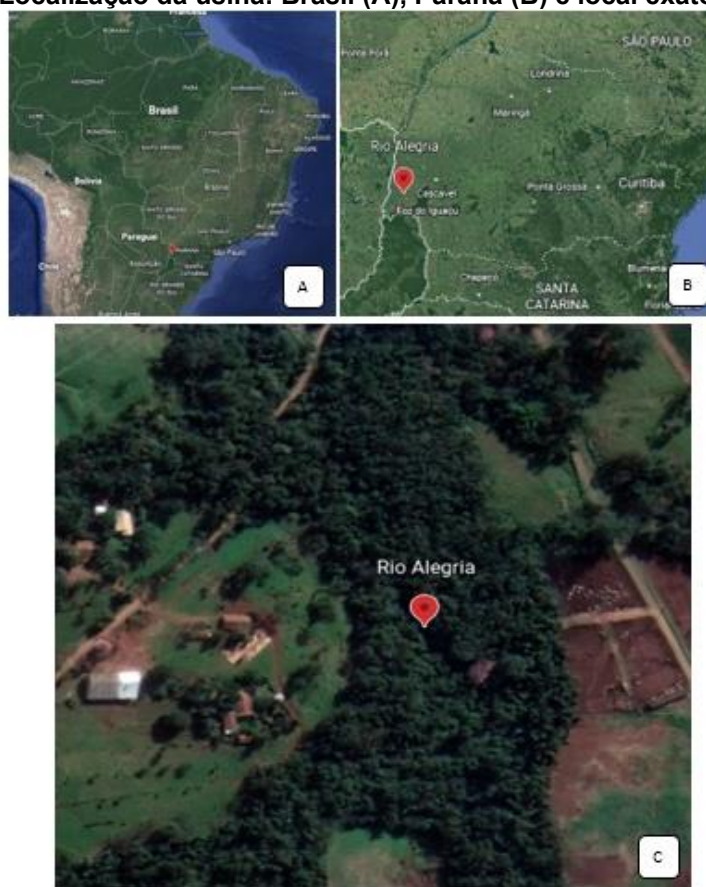
Para maior exatidão do dimensionamento, os dados serão quantitativos para obter o melhor aproveitamento, podendo ser aplicadas técnicas estatísticas demonstrando em gráficos fluviométricos para demonstrar quais os elementos mais importantes sobre o local.

3.1 Área de estudo

A localização da área de estudo se encontra em 25° 14' 55" Sul e 54° 08'49" Oeste na bacia 6 - Rio Paraná, denominado Rio Alegria, no município de Medianeira, estado do Paraná, Brasil, apresentado na Figura 11. Para ser mais preciso o local fica na comunidade de Linha Alegria, interior no município. Este local foi escolhido como objeto de estudo por já existir uma estrutura no local, que antigamente era utilizada para uma serraria, onde a força da água era transformada em energia mecânica. Na Figura 14 foi feito um croqui para demonstrar como é a estrutura existente.

O Rio Alegria tem sua nascente na linha São Miguel Arcanjo na zona rural de Medianeira, sua extensão é de 27 km desaguando no Rio Ocoy, pertencente a bacia hidrográfica do Rio Paraná III. Ele cruza o município e é utilizado pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR para o abastecimento da cidade, sendo utilizado também nas atividades agrícolas.

Figura 11: Localização da usina: Brasil (A), Paraná (B) e local exato (C)



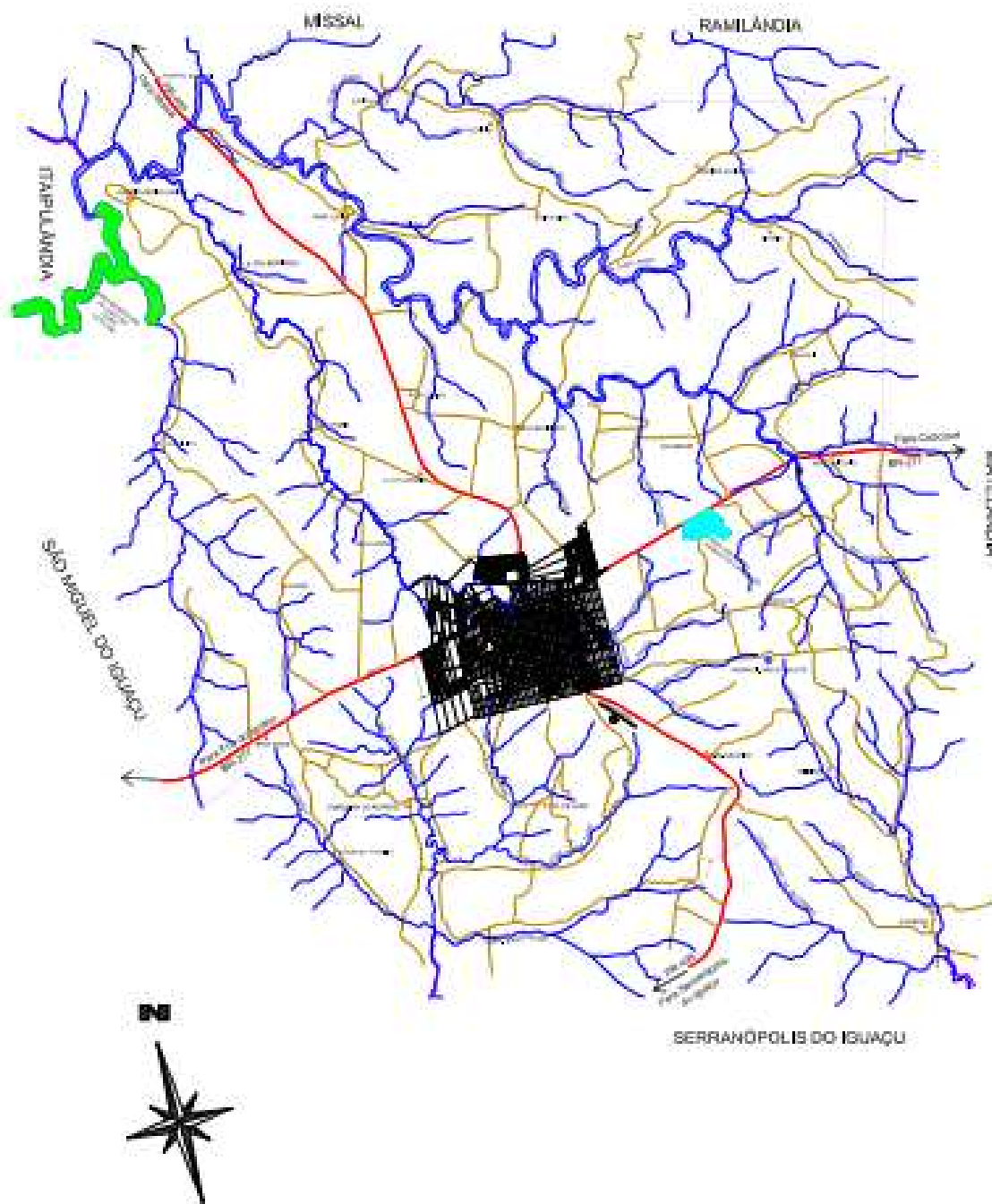
Fonte: Google (2022).

Figura 12: Bacia hidrográfica com Rio Alegria



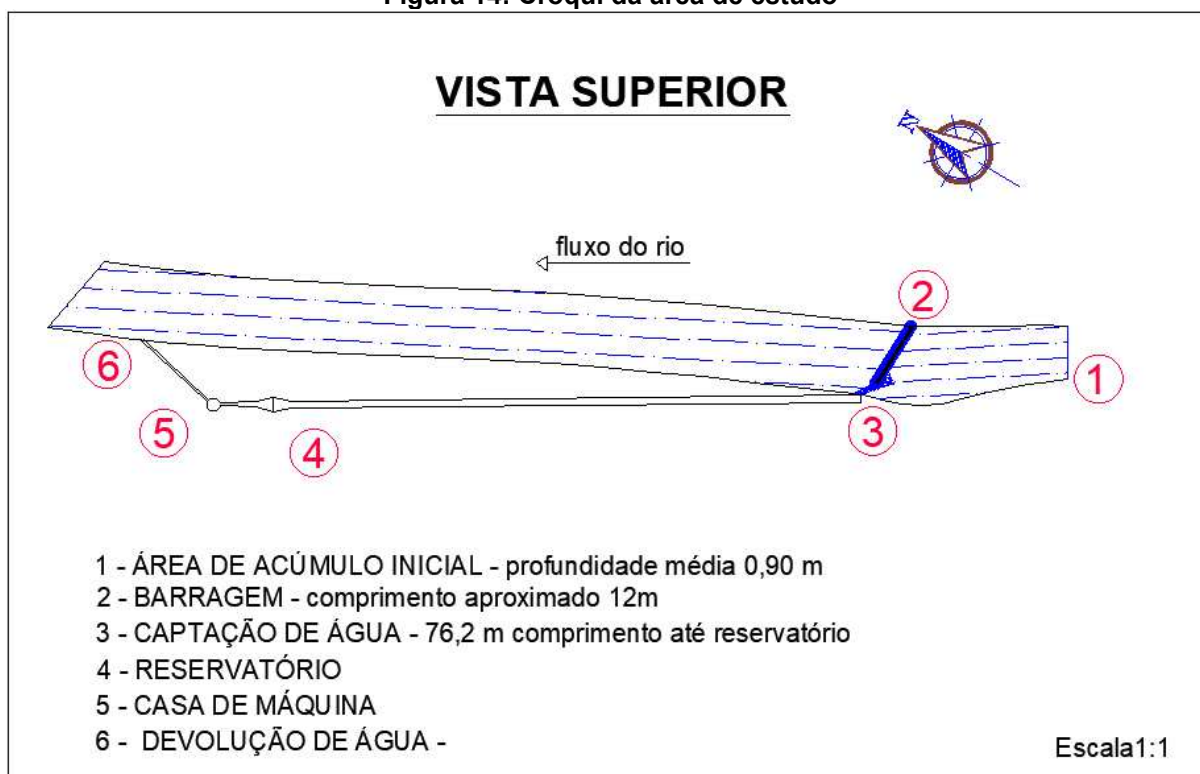
Fonte: Agencia Nacional de Águas (2022).

Figura 13: Mapa de Hidrografia de Medianeira



Fonte: Prefeitura Municipal de Medianeira, (2012)

Figura 14: Croqui da área de estudo



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Materiais utilizados

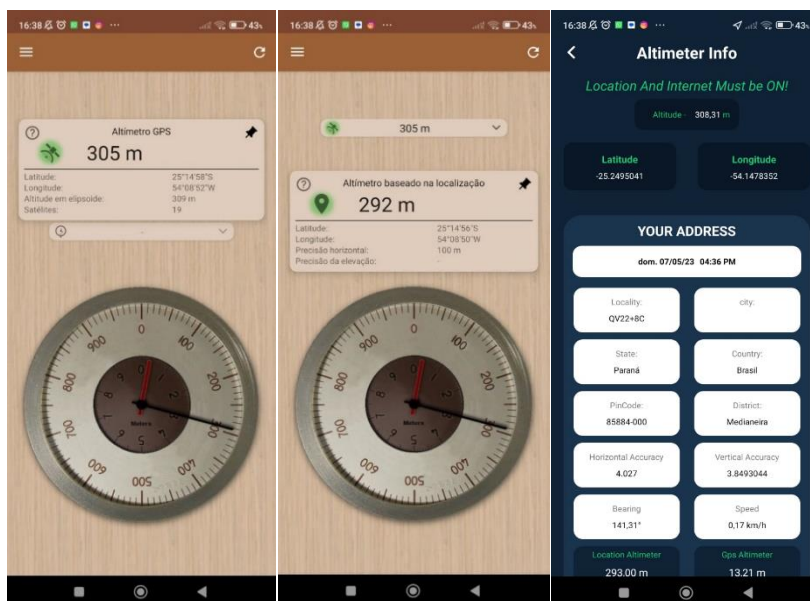
3.2.1 Definição da altitude

Para determinação do desnível do local foram utilizados dois aplicativos de celular para medição de altitude, “*Altimeter: Location & GPS*” e “*Accurate Altimeter*”, esses aplicativos realizam a medida da altura baseado no nível do mar. Os pontos de início e fim foram determinados a partir da estrutura existente no local.

Para utilizar os valores fornecidos pelos altímetros foi realizado o cálculo médio dos dados fornecidos.

O ponto inicial escolhido, 1 do croqui, é o de captação de água, com as seguintes coordenadas geográficas em graus, minutos e segundos - GMS, latitude $25^{\circ}14'56''S$, longitude $54^{\circ}08'50''W$. Com os valores determinados na Figura 15, foi possível calcular uma altitude média de 301,77m.

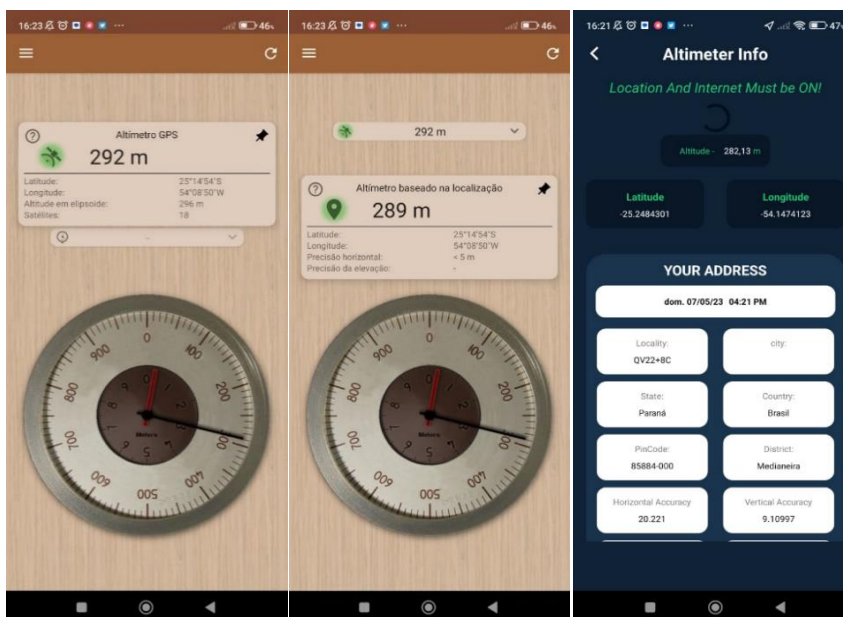
Figura 15: Altitude no ponto inicial



Fonte: Autoria própria, (2023)

O local final, ponto 6 do croqui, devolução ao afluente, que contém as seguintes coordenadas em GMS, latitude $25^{\circ}14'54''S$ e longitude $54^{\circ}08'50''W$, contabilizando uma altitude média de 287,71m a partir dos valores determinados na figura, resultando em um desnível aproximado de 14 m.

Figura 16: Altitude no ponto final



Fonte: Autoria própria, (2023)

3.2.2 Obtenção dos dados fluviométricos

Os dados fluviométricos foram retirados da página Hidroweb do site da ANA, referente a estação fluviométrica de código 64897500 ETA Medianeira. No site foi possível encontrar dados das vazões diárias do ano de 2001 a 2018. A partir desse histórico, as informações obtidas foram aplicadas em planilhas eletrônicas Microsoft Excel, gerando o gráfico da curva de permanência para demonstração da vazão durante o período.

Ao total os dados disponibilizados correspondem a 204 meses, onde 9 desses meses não foram contabilizados pela ANA, 25 meses estão com os dados zerados por completo, e 18 meses não estão aptos para estudo por falta de valores suficientes, seguindo o critério descrito abaixo, finalizando com o total de 152 meses aptos para estudo.

3.2.3 Preenchimento de falhas

A existência de falhas é algo comum no monitoramento de vazões, sendo causadas por problemas mecânicos ou operacionais. Dessa forma são ocasionados períodos sem registro o que podem gerar valores incoerentes. Segundo Horn (2016) a falta de informação hidrológica deve-se principalmente à falta de estações fluviométricas, sendo um problema para diversas áreas da hidrologia.

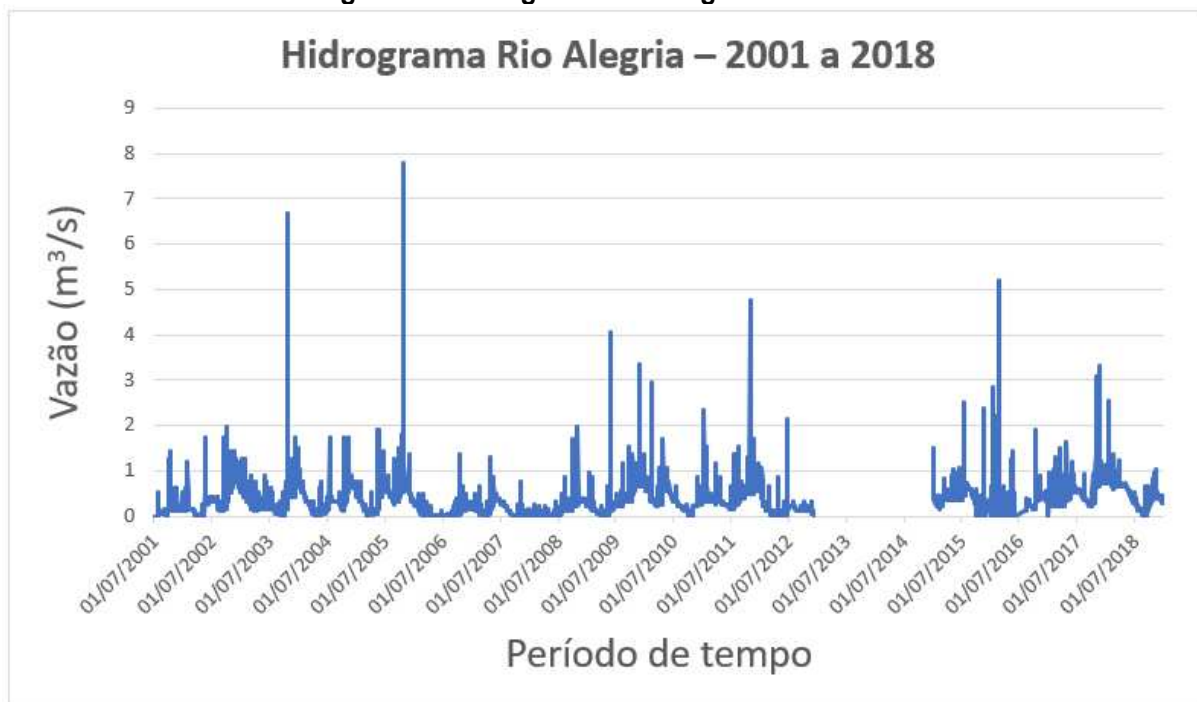
Foi observada a existência de dados faltantes ao longo da série histórica, sendo a maior falha entre o período de dezembro de 2012 a dezembro de 2014. Uma solução para essas falhas seria substituir os dados faltantes através da estatística, porém existem meses inteiros com dados faltantes. Então, estabeleceu-se o critério de exclusão dos meses com mais de 10% de falha (três dias de falha), evitando assim gerar valores fictícios e incoerentes.

3.2.4 Estimativa de vazão

Para obter o valor de vazão foi utilizado um hidrograma Figura 17, para ter uma visualização mais clara da série histórica e uma curva de permanência Figura 18,

que representa em ordem decrescente o quanto tempo uma vazão pode se repetir, podendo assim observar qual a vazão do rio nos períodos cheios e secos.

Figura 17: Hidrograma Rio Alegria - 2001/2018



Fonte: Autoria própria, (2023)

Figura 18: Curva de permanência do Rio Alegria - 2001/2018



Fonte: Autoria própria, (2023)

3.3 Escolha da turbina

Henn (2012) fala que para determinar a turbina hidráulica mais adequada ao local é preciso saber a velocidade de rotação específica (N_{qa}), o que especificará melhor modelo que se enquadra ao estudo. A escolha das turbinas é empírica, isto é, trabalha-se com valores aproximados que se acredita valer em cada projeto.

$$N_{qa} = 1000 * n * \frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}} \quad (1)$$

Onde

N_{qa} : Velocidade de rotação específica;

n : Rotação da turbina (rps);

Q : Vazão do projeto (m³/s);

Y : salto energético (j/kg).

3.4 Potencial hidroelétrico

Com a determinação da vazão será possível determinar qual a turbina mais adequada, calculando também o potencial hidroelétrico do rio utilizando a equação (2) de potência média, encontrada em Henn (2012)

$$P = \frac{\rho * g * V * D * \eta}{1000} \quad (2)$$

Onde

P : Potência da máquina.

ρ : Densidade da água (kg/l);

V : Vazão do afluente (m³/s transformado para l/s);

g : Aceleração da gravidade;

D : Desnível;

η : Eficiência da turbina.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro passo a ser feito é a determinação da turbina que melhor se adapta ao local. A partir disso é possível calcular o potencial elétrico do rio.

Para determinar a velocidade de rotação específica da equação (1), é preciso a rotação da turbina estar em rps, equivale a frequência em Hz. Segundo Souza (1992), a rotação mínima não deve ser inferior a 600 rpm e, para aplicar na equação transforma-se em 10 rps

A vazão utilizada para o cálculo é estabelecida a partir da curva de permanência demonstrada na Figura 18. Nela é possível observar que a vazão é permanente entre 0 e 1 m³/s, o que corresponde a 90% do tempo, isso também é demonstrado na Figura 17. Nela é possível ver com mais clareza a vazão no período da série histórica. Utilizando o valor médio, aproximadamente em 50%, pode-se encontrar uma vazão de 0.322 m³/s, isto é 322 l/s.

O salto energético é o produto da gravidade pelo desnível do local, este foi definido a partir das medições com altímetro conforme exposto no texto. Nele foi determinado um desnível médio de 14 m.

Aplicando todos essas variáveis na equação (1) da velocidade de rotação específica.

$$N_{qa} = 1000 * 10 * \frac{0.322^{1/2}}{(9,81 * 14)^{3/4}}$$

$$N_{qa} = 141.44rps$$

A partir de seus estudos Henn (2012) determinou valores correspondentes a alguns tipos de turbinas, baseado na sua velocidade de rotação específica. Com o valor da velocidade de rotação específica e o Quadro 2, encontrado em Henn (2012), pode-se definir que a turbina Francis Normal é a mais indicada para ser utilizada no local.

Quadro 2: Valores de velocidade de rotação específica para turbinas

Turbina	N_{qa}
Pelton	5 a 70
Francis lenta	50 a 120
Francis Normal	120 a 200
Francis Rápida	200 a 320
Kaplan	300 a 1000

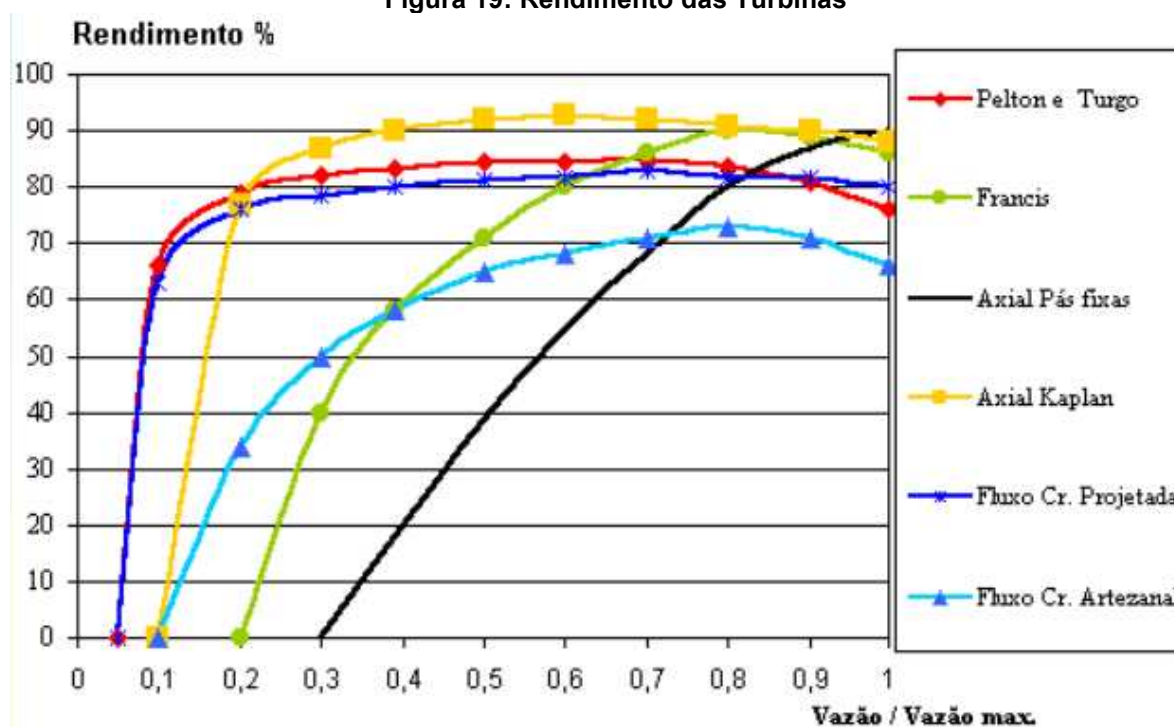
Fonte: Henn (2012).

Para determinar a potência de energia que o rio pode gerar, aplicando os valores de densidade da água, da gravidade, da vazão, em litros por segundo, do desnível e da eficiência da turbina definida com um rendimento η de 70%, de acordo com a Figura 19, define-se o seguinte resultado.

$$P = \frac{1 * 9,81 * 322 * 14 * 0,7}{1000}$$

$$P = 30,95 \text{ kW}$$

Figura 19: Rendimento das Turbinas



Fonte: Prof. Dr. Dorel Soares Ramos, (2012)

A Figura 19 define o rendimento das turbinas a partir do valor de vazão utilizado no cálculo de potência.

O valor da potência obtida é uma estimativa para geração do rio, considerando uma vazão de 322 l/s, o que atende a uma propriedade rural em períodos normais do fluxo do rio.

5 CONCLUSÃO

O estudo tratou do potencial hidroelétrico do Rio Alegria na comunidade de Linha Alegria no município de Medianeira. A escolha do lugar ocorreu devido a uma antiga estrutura presente na localidade.

Para o desenvolvimento desse estudo foi determinado o desnível de 14 m, obtido com aplicativos de altímetro que trabalhavam via GPS. Foi necessário conhecer a vazão do rio, de 0,322 m³/s, que só foi possível de obter após fazer um tratamento dos dados da estação fluviométrica do município fornecidos pela ANA.

Com os dados definidos, e aplicados a equação de rotação específica para determinar a turbina, e a equação de potência do rio, constatou-se que não é possível implementar uma PCH, devido ao potencial hidroelétrico do mesmo, que é de apenas 30,95 kW, inferior ao determinado pela ANEEL de 1MW para esse tipo de usina. Porém é um valor aceitável para uma usina de tamanho menor, determinada como CGH. Outro fator que mostra a viabilidade de implementação de uma usina é o fato de o local já ter sido utilizado para geração de energia mecânica, logo, sendo necessário a realização de ajuste da parte técnica para utilizar com energia elétrica.

O tipo de turbina definida a partir da vazão com 50% de probabilidade de ocorrência e com valor mínimo de rotação da máquina para uma PCH foi a Francis Normal, o que condiz com o gráfico da Figura 3, que mostra a faixa de operação das turbinas a partir da vazão e do desnível.

Para aplicação em um empreendimento é necessário realizar um estudo mais aprofundado do local, considerar um percentual de permanência do rio maior, visto que, de acordo com os registros dos moradores locais o Rio Alegria nunca teve períodos de seca extrema, e realizar um delineamento mais detalhado da vazão no local de aplicação, pois existe uma distância considerável existente entre a estação fluviométrica e o ponto de estudo.

REFERÊNCIAS

ABRAPCH. Associação Brasileira de PCH's e CGH's. **Mais de 70% das áreas de PCHs e CGHs, em média, são de proteção ambiental.** 2022. Disponível em: <abrapch.org.br/2022/09/mais-de-70-das-areas-de-pchs-e-cghs-em-media-sao-de-protecao-ambiental>. Acessado em: outubro 2022.

ANDERSON, Bruce. **The solar home book.** Brick House Publishing Co.Inc. Andover, Massachusetts, USA, 1976

ANEEL. **Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** 2003. Disponível em: <<https://biblioteca.aneel.gov.br/Resultado/Listar?guid=1667882772062>>. Acessado em: outubro de 2022.

ANEEL. **Sistema de Informações de geração da ANEEL - SIGA.** 2023. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acessado em: junho de 2023.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. C. M. de. **Geração de Energia Elétrica: Fundamentos.** São Paulo: Érica, 2012.

BOCK, Maiquel. **Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos. Hidroenergia Engenharia e Automação.** Hidroenergia.com.br. Disponível em: <<https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>>. Acessado em: outubro de 2022.

BREKKE, Hermod. **Hydraulic Turbines: Design, Erection and Operation.** New York: Mc Graw-Hill, 2001.

CROWTHER, R. L. **Sun / Earth.**, Charles scribner' Sons, New York, USA, 1977.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas.** 2000. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/data/Pages/LUMIS4AB3DA57PTBRIE.htm>>. Acessado em: outubro de 2022.

FITCH, J. M. **The environmental forces that shape it.** Schocken Books, New York, 1971.

FROTA, Anésia B. **Manual de conforto térmico.** Nobel, São Paulo, 1988.

Google Maps. **Rio Alegria · Medianeira, PR, 85884-000.** Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Rio+Alegria/@-25.247877,-54.1458456,571m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x94f6ab53b94034ab:0x1e182d533555a5dc!8m2!3d-25.2487609!4d-54.1470728?hl=pt-BR>>. Acessado em: outubro 2022.

HENN, É. L. **Máquinas de Fluido.** Santa Maria: Editora UFSM, 2012.

- HIDROWEB.** Snirh.gov.br. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>>. Acessado em: outubro de 2022.
- HORN. J.F.C – **Estimativa de vazão com dados escassos: Novas hipóteses para o método** Silveira, Santa Maria, UFSM, 2016.
- IZARD J. L. GUYOT Q. **Arquitetura bioclimática.** Ed. G. Gili, Barcelona, 1980.
- KNIJNIK et al. **Energia e meio ambiente em Porto Alegre** - Bases para o desenvolvimento. DMAE, Porto Alegre, RS, 1994.
- KOENIGSBERGER et al, **Vivienda y edificios en zonas cálidas y tropicales.** Trad. Emílio Romero Ros. Madrid, Paraninfo, 1977.
- LEONELLI, R.J. **Projeto de Geração de Energia em Micro Escala: Energia Hidroelétrica.** Garça: FAEF, 2002.
- MARCOLINO, Alan C. STEINER Konrad K. **Viabilidade De Implantação De Uma Pch No Rio Capivari: Um Estudo De Caso** 2022.
- MASCARÓ, L. **Energia na edificação - estratégia para minimizar seu consumo.** Projeto, São Paulo, 1985.
- MAZRIA, Edward. **The passive solar energy book.** Rodale Press, Emmaus, Pa., USA, 1979
- MOURA, Gustavo N. P. de. **Energia Renovável: Diagnóstico da Geração de Eletricidade em Pequenas Centrais Hidrelétricas no Estado de Minas Gerais.** Rio de Janeiro. UFRJ, 2008.
- ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **PEN: Plano de Operação Energética 2021/2025.** 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relat%C3%B3rio%20PEN%202021.pdf>> Acessado em: outubro de 2022.
- PIORO, Igor L. **Handbook of Generation IV: Nuclear Reactors.** Cambridge: Elsevier, 2016.
- PINTO, Milton. **Energia Elétrica – Geração, Transmissão e Sistemas Interligados.** 1 Ed. São Paulo: LTC, 2013. 126 p.
- PORTAL SÃO FRANCISCO. **História da Eletricidade no Brasil - Portal São Francisco.** 2016. Disponível em: <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/curiosidades/historia-da-eletricidade-no-brasil>>. Acessado em outubro de 2022

RAMOS, Dorel Soares. **Engenharia de Energia Hidroeletrica**, 2012, USP.
Disponível em: < <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=24453>>
Acessado em maio de 2023.

REIS, Lineu Bélico dos. **Geração de Energia Elétrica**. 2. Ed. Barueri, SP: Manole, 2011.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. D. C. Luzato Editores, Porto Alegre, 1986.

ROMERO, Marta A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo, 1988.

SMITH, Edward H. **Mechanical Engineer's Reference Book**. Twelfth edition. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

SOARES JÚNIOR, Ricardo Luiz. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.73 p.

SOUZA, Zulcy de. **Centrais Hidrelétricas: Dimensionamento de Componentes**. São Paulo: Edgar Blucher, 1992.

STEADMAN, Philip. STEADMAN, Philip. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Vol. 21, pg 7-30. Center for Configurational Studies, England, 1994.

STEIN, Richard G.. **Architecture and Energy**. Anchor Press / Doubleday Garden City, New York, EUA, 1978.

VALE, Robert e Brenda. **La casa autônoma.**, Ed. G. Gili, Barcelona, 1978.

VECCHIA, Rodnei. **Energia das águas: paradoxo e paradigma**. Barueri-SP: Manole, 2014.

WRIGHT, David. **Natural solar architecture**. Van Nostrand Reinolds Company, New York, 1978.