

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MURILO RUBIK

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE
MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL**

FLORIANÓPOLIS, 2021.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLÓGICA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MURILO RUBIK

**AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE
MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. João Carlos Martins Lúcio, D.Eng.

FLORIANÓPOLIS, 2021.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Rubik, Murilo

Avaliação Técnica e Econômica da Implantação de Microgeração Hidrelétrica em uma Propriedade Rural / Murilo Rubik; orientação de João Carlos Martins Lúcio; coorientação de Diego Marchi. - Florianópolis, SC, 2021.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Elétrica. Departamento Acadêmico de Eletrotécnica.

Inclui Referências.

1. Geração de Energia Elétrica. 2. Geração Distribuída.
3. Microgeração Hidrelétrica. 4. Avaliação Econômica.

I. Martins Lúcio, João Carlos . II. Marchi, Diego

. III. Instituto Federal de Santa Catarina. IV.

Avaliação Técnica e Econômica da Implantação de Microgeração Hidrelétrica em uma Propriedade Rural.

AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLANTAÇÃO DE MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA EM UMA PROPRIEDADE RURAL

MURILO RUBIK

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de setembro, 2021.

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

JOAO CARLOS MARTINS LUCIO
Data: 22/09/2021 17:37:09-0300
CPF: 611.561.759-68

Prof. João Carlos Martins Lúcio, D. Eng. - Orientador



Documento assinado digitalmente

Diego Marchi
Data: 21/09/2021 14:01:39-0300
CPF: 083.208.479-40
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Sr. Diego Marchi, Eng. - Coorientador



Documento assinado digitalmente

EDISON ANTONIO CARDOSO ARANHA NETO
Data: 20/09/2021 12:24:24-0300
CPF: 005.835.469-78

Prof. Edison Antônio Cardoso Aranha Neto, D. Eng.



Documento assinado digitalmente

Rubiara Cavalcante Fernandes
Data: 20/09/2021 18:27:03-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Rubiara Cavalcante Fernandes, D. Eng.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valdenézio Rubik e Adriana Conceição de Souza, aos meus irmãos Ezaú Felipe de Souza e Lucas Rubik, e à minha tia Valdete Rubik, que não mediram esforços para me apoiar e ajudar nessa trajetória.

À minha namorada Pâmela Coelho, por todo o companheirismo, compreensão e apoio, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador e professor João Carlos Martins Lúcio e ao meu coorientador Sr. Diego Marchi por toda a dedicação e ensinamentos nesse período de elaboração desse trabalho.

Aos meus professores do curso, Edison A. C. Aranha Neto e Rubiara Cavalcante Fernandes, que contribuíram com seus ensinamentos para a realização desse trabalho.

Ao Sr. Renato M. Steiner da HidroGD, por permitir a minha visita à sua propriedade, para conhecer seu sistema de microgeração hidrelétrica e também por fornecer informações sobre a implantação e operação do mesmo.

A todos os meus amigos de graduação, pelo apoio e confiança, minha gratidão pelos momentos bons que passamos, pelas superações durante esse grande desafio e pelas conquistas alcançadas.

RESUMO

As usinas hidrelétricas de pequeno porte foram pioneiras no surgimento de sistemas de geração de energia elétrica e contribuíram significativamente para o crescimento e desenvolvimento do Brasil. Com os avanços tecnológicos abriram espaço para a construção de grandes usinas hidrelétricas, transformando a geração de energia elétrica em um modelo centralizado, o que fez com que os empreendimentos de pequeno porte perdessem atratividade. Contudo, nos últimos anos, os incentivos à geração distribuída, com a implantação de sistemas de energias renováveis, têm gerado um grande interesse econômico nos consumidores residenciais. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar técnica e economicamente, por meio de um estudo de caso, a implantação de um sistema de geração renovável proveniente de uma microcentral hidrelétrica (μCH), como uma alternativa energética para consumidores que residem em propriedades rurais. O aproveitamento hídrico em estudo está localizado no interior do Município de Major Gercino, Estado de Santa Catarina, região com relevo acidentado e com hidrografia bastante rica, composta por nascentes, lagos, córregos e rios. O desenvolvimento desse trabalho fundamentou-se em estudos teóricos e práticos, fazendo uso de métodos experimentais para a estimativa do potencial hídrico do local. Por meio da medição da vazão volumétrica e da altura de queda bruta, foi escolhido o conjunto turbina-gerador mais adequado e a configuração básica do sistema. Em seguida, para a análise da viabilidade econômica do projeto, foram estimados todos os custos, incluindo o investimento inicial e a receita advinda da redução da dependência com relação ao fornecimento de energia elétrica da concessionária de distribuição. Para tal análise foram utilizados os métodos do Valor Presente Líquido, da Taxa Interna de Retorno e do *Payback*, considerando condições distintas de atendimento ao consumo de uma instalação elétrica rural.

Palavras-chave: Geração de Energia Elétrica. Geração Distribuída. Microgeração Hidrelétrica. Avaliação Econômica.

ABSTRACT

Small hydropower plants were pioneers in the emergence of electric power generation systems and contributed significantly to the growth and development of Brazil. The technological advances have opened space for the construction of large hydroelectric plants that have transformed power generation into a centralized model, which has caused small enterprises to lose their attractiveness. However, in recent years, the incentives of distributed generation for the implementation of renewable energy systems have generated a great economic interest for residential consumers. Thus, the present study aims to evaluate technically and economically, through a case study, the implementation of a renewable generation system from a hydroelectric microcentral (μ CH) as an energy alternative for consumers residing in rural properties. The water use under study is located on the rural area of Major Gercino, Santa Catarina, a region with uneven terrain and very rich hydrography, with springs, lakes, streams, and rivers. The development of this work was based on theoretical and practical studies, using experimental methods to estimate the hydroelectric potential, by measuring the hydrological characteristics relevant to the site. By measuring the volumetric flow and the gross drop height, the most suitable turbine-generator set and the basic configuration of the system were chosen. Then, for the analysis of the economic feasibility of the project, all costs were estimated, including the initial investment and the revenue arising from the reduction of dependence on the electricity supply from the distribution concessionaire. For this analysis, the Net Present Value, the Internal Rate of Return and the Payback methods were used, considering different conditions for meeting the consumption of a rural electrical installation.

Keywords: Electric Power Generation. Distributed Generation. Hydroelectric Microgeneration. Economic Evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Configuração de um sistema elétrico	18
Figura 02 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	21
Figura 03 - Esquema construtivo de uma usina hidrelétrica.....	23
Figura 04 - Turbina Pelton.....	25
Figura 05 - Turbina Francis	26
Figura 06 - Turbina Kaplan instalada com rotor vertical	27
Figura 07 - Esquema de aplicação de uma THC.....	28
Figura 08 - Modelos de THC	28
Figura 09 - Máquina Síncrona	28
Figura 10 - Máquina Assíncrona	31
Figura 11 - Procedimentos e etapas de acesso	34
Figura 12 - Método do molinete hidrométrico.....	36
Figura 13 - Aplicação do método do flutuador.....	37
Figura 14 - Esquema de verticais e áreas.....	38
Figura 15 - Método do nível de pedreiro	39
Figura 16 - Método da mangueira de nível.....	41
Figura 17 - Método topográfico	41
Figura 18 - Domínio dos diferentes tipos de turbinas hidráulicas.....	43
Figura 19 - Localização geográfica do bairro de Pinheiral, Major Gercino-SC.....	49
Figura 20 - Bacia hidrográfica do rio Tijucas	49
Figura 21 - Localização exata do córrego	49
Figura 22 - Delimitação da área de estudo	51
Figura 23 - Modelagem da área transversal total do curso d'água	53
Figura 24 - Barragem a montante do local de instalação	54
Figura 25 - Medição altura de queda do aproveitamento hídrico	54
Figura 26 - Domínio dos diferentes tipos de turbinas hidráulicas.....	55
Figura 27 - Turbina modelo balde ajustável	56
Figura 28 – Especificações técnicas do fabricante Forster	57
Figura 29 – Modelo de estrutura de implantação de uma microcentral hidrelétrica ..	57
Figura 30 - Variação da TIR do projeto em função da variação do percentual de utilização da microgeração.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Valores medidos em campo com o flutuador de isopor	52
Tabela 02 - Somatória da área de cada subseção.....	53
Tabela 03 - Informações técnicas do conjunto turbina-gerador	56
Tabela 04 - Estimativa de custos para a implantação da μ GH.....	59
Tabela 05 - Fluxo de caixa do projeto de microgeração hidrelétrica	59
Tabela 06 - Resultado da avaliação econômica do projeto.....	61
Tabela 07 - Resultado da avaliação econômica do projeto, sem autoeficiência	62
Tabela 08 - Resultado da avaliação econômica do projeto, com autossuficiência sem utilizar capacidade plena.....	63

LISTA DE SIGLAS

ADCP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CEREJ	Cooperativa de Prestação de Serviços e de Energia Esteves Junior
EAS	Estudo Ambiental Simplificado
GD	Geração Distribuída
LAI	Licenças Ambientais de Instalação
LAP	Licenças Ambientais Prévias
LAO	Licenças Ambientais de Operação
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TIR	Taxa Interna de Retorno
UGP	Usinas de Grande Porte
UHE	Usina Hidrelétrica
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Definição do Problema.....	14
1.2	Justificativa.....	15
1.3	Objetivo Geral	16
1.4	Objetivos Específicos	16
1.5	Estrutura do Trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Geração Distribuída e Autoprodução de Energia Elétrica	18
2.2	Sistema de Compensação de Energia Elétrica	20
2.3	Evolução Histórica da Geração Hidrelétrica no Brasil	20
2.4	Conceitos Básicos da Geração Hidrelétrica	21
2.5	Turbinas Hidráulicas	23
2.5.1	Turbina Pelton.....	24
2.5.2	Turbina Francis	25
2.5.3	Turbina Kaplan.....	26
2.5.4	Turbina Hidrocinética (THC).....	27
2.6	Geradores Elétricos	29
2.6.1	Geradores Síncronos	29
2.6.2	Geradores Assíncronos	30
3	MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA	32
3.1	Aspectos Básicos da Microgeração Hidrelétrica.....	32
3.2	Conexão da Microgeração Hidrelétrica à Rede Elétrica.....	33
3.3	Licenciamento Ambiental	34
3.4	Dimensionamento da Microgeração Hidrelétrica	35
3.4.1	Escolha do Local para Instalação da Microgeração	35
3.4.2	Métodos para a Medição da Vazão.....	36
3.4.3	Métodos para a Medição da Altura de Queda.....	39
3.4.4	Cálculo do Potencial Hidráulico.....	42
3.4.5	Escolha do Conjunto Turbina-Gerador.....	42
3.5	Análise Econômica do Investimento	44
3.5.1	Método do Valor Presente Líquido (VPL).....	45
3.5.2	Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)	46
3.5.3	Método do Tempo de Recuperação do Capital - <i>Payback</i> Descontado.....	47
4	ESTUDO DE CASO	48
4.1	Considerações Iniciais.....	48
4.2	Localização do Curso D'água.....	49
4.3	Medição da Vazão Volumétrica	51
4.4	Medição da Altura de Queda Bruta	53
4.5	Definição do Conjunto Turbina-Gerador	55
4.6	Estimativa da Energia Gerada	58
4.7	Estimativa para Investimento Inicial e para o Custo de Operação e Manutenção.....	58
4.8	Análise Econômica para Implantação da Microgeração Hidrelétrica ..	60

4.9	Análises Adicionais.....	61
4.9.1	Microgeração sem Autossuficiência.....	62
4.9.2	Microgeração Superdimensionada.....	62
4.9.3	Análise de Sensibilidade Quanto ao Investimento Inicial e ao Custo de O&M	64
4.10	Considerações Gerais Sobre os Resultados	65
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A água é responsável por fornecer uma das forças naturais mais poderosas conhecidas até hoje, permitindo que usinas hidrelétricas utilizem energia de precipitação para gerar energia elétrica (MARCON *et al.*, 2013). Nesse contexto, a utilização de hidrelétricas para a geração de energia elétrica se tornou predominante em países que possuem recursos hídricos e condições geográficas favoráveis. Os maiores potenciais técnicos aproveitáveis de energia hidráulica no mundo, para produção de energia elétrica, estão nos países da antiga União Soviética, China, Índia e Brasil (BOEIRA, 2006).

No Brasil, as primeiras hidrelétricas surgiram em meados do século XIX, caracterizando-se até hoje como a principal fonte de geração de energia elétrica no país, sendo responsáveis por 64,9% da matriz elétrica (EPE, 2021). As centrais hidrelétricas possuem dois arranjos básicos: Central Hidrelétrica a Fio D'água e Central Hidrelétrica de Acumulação com regularização diária de reservatório (ELETROBRÁS, 1985).

As barragens de acumulação das usinas de grande porte (UHE) permitem o acúmulo de grande quantidade de água, funcionando como um estoque, a ser utilizado em períodos de estiagem. Além disso, os reservatórios das hidrelétricas também são responsáveis pela regulação da vazão da água, que irá fluir para as outras usinas, localizadas à jusante (ANEEL, 2008).

Todavia, a utilização dos grandes reservatórios de acumulação de água para a produção de energia elétrica vem gerando danos irreversíveis ao meio ambiente. Entre esses danos, é possível destacar a formação de microclimas, favorecendo certas espécies e prejudicando, ou até mesmo extinguindo outras. Entre as espécies nocivas à saúde humana, destacam-se parasitas e transmissores de doenças endêmicas, como a malária e a esquistossomose (ANEEL, 2002).

As Pequenas Centrais Hidrelétricas tornaram-se uma opção atrativa diante do seu baixo impacto ambiental. Por não possuírem grandes reservatórios em sua arquitetura, o aproveitamento hidrelétrico é proveniente da vazão natural do rio, tornando desnecessária a formação de grandes reservatórios (ANEEL, 2002).

Em contrapartida, o atual processo de reestruturação do setor elétrico vem criando um novo cenário no panorama brasileiro de geração de energia elétrica, dando

destaque à produção descentralizada, de perfil sustentável e não convencional, tendendo a ocupar maior espaço na matriz elétrica nacional (ANEEL, 2002). Conforme a Resolução Normativa nº 482/2012 (ANEEL, 2012), para a produção descentralizada, é possível destacar as plantas de micro e minigeração distribuída, que consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada (ANEEL, 2014).

Nesse panorama, o consumidor final começa a se mobilizar no sentido de encontrar alternativas de autoprodução que melhorem a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica a longo prazo e que, além disso, possam reduzir os custos com energia (LORA; ADDAD, 2006). Posto isso, as plantas de microgeração hidrelétrica, configuram-se como uma opção interessante para consumidores que residem em propriedades rurais no Brasil.

1.1 Definição do Problema

A autoprodução de energia elétrica vem conquistando cada vez mais espaço, principalmente pelo cunho de desenvolvimento sustentável e por oferecer benefícios de ordem técnica e econômica.

Apesar da disponibilidade hídrica nas propriedades rurais brasileiras ser uma realidade, a microgeração hidrelétrica ainda não é explorada em larga escala. O alto potencial agregado, com respeito aos benefícios técnicos e econômicos, e à sustentabilidade, abre espaço para um estudo mais aprofundado, abordando aspectos decisivos no processo de implantação desse tipo de geração de energia elétrica.

Desse modo, propõe-se com esse trabalho, a apresentação de procedimentos para a avaliação da implantação da microgeração hidrelétrica em uma propriedade rural, considerando o dimensionamento dos componentes desse sistema, com base no potencial hidráulico previamente levantado. O estudo se estende até a avaliação da viabilidade econômica do sistema, considerando os fundamentos da Matemática Financeira.

1.2 Justificativa

Um dos principais objetivos da geração de energia elétrica, na atualidade, é encontrar meios de produção que consigam suprir a demanda instalada, reduzindo a dependência com relação à utilização de recursos não renováveis. Em meio a esse cenário, as plantas de microgeração vêm conquistando espaço como meio de produção, apresentando uma solução sustentável para um problema real, abraçando assim uma fatia significativa do mercado produtor de energia elétrica brasileiro.

O uso eficiente da Geração Distribuída (GD) nas propriedades rurais proporciona uma série de benefícios operacionais e econômicos, com destaque para a redução das perdas nas linhas de transmissão, a melhoria do perfil de tensão e a postergação dos investimentos nos sistemas de geração, transmissão e distribuição.

Dentro desse contexto, entende-se que a geração distribuída por meio de microgeração hidrelétrica apresenta posição de destaque, principalmente por se tratar de uma fonte limpa para a produção de energia elétrica.

Em função desses benefícios, surgiu o interesse em desenvolver um trabalho que tenha por objetivo principal apurar a viabilidade da implantação de um meio sustentável de produção de energia elétrica, haja visto o potencial hídrico disponível nas propriedades rurais brasileiras.

Desse modo, a proposta em questão visa apresentar um estudo baseado em uma aplicação real, envolvendo o levantamento do potencial hidráulico de um pequeno curso d'água, seguido do dimensionamento do conjunto turbina-gerador e da análise da viabilidade econômica referente à implantação do projeto. Além disso, serão abordados os conceitos de autoprodução de energia elétrica e de microgeração hidrelétrica, trazendo à margem toda a legislação vigente para implantação desse tipo de sistema.

1.3 Objetivo Geral

Avaliar técnica e economicamente a implantação de um sistema de microgeração hidrelétrica em uma propriedade rural.

1.4 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, propõe-se:

- a) apresentar os conceitos da geração distribuída, da autoprodução de energia elétrica e da microgeração hidrelétrica;
- b) identificar os componentes de uma microcentral hidrelétrica, destacando principalmente as características técnicas dos tipos de turbinas e geradores utilizados nesse sistema de produção de energia elétrica;
- c) apresentar os métodos disponíveis na literatura para o levantamento do potencial hidráulico de pequenos cursos d'água;
- d) identificar e apresentar a estrutura de custos e de receitas relativos à microgeração;
- e) apresentar um estudo de caso, com o levantamento do potencial hidráulico de um curso d'água em uma propriedade rural, a especificação dos equipamentos e obras necessários para a implantação de um sistema de microgeração hidrelétrica e a análise da viabilidade econômica desse sistema.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho proposto será estruturado da seguinte forma:

No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução ao tema, com a definição do problema, justificativa, objetivo geral e objetivos específicos.

O Capítulo 2 refere-se à revisão da literatura, visando apresentar os conceitos da geração distribuída, da autoprodução de energia elétrica e do sistema de compensação de energia, bem como a evolução histórica da geração hidrelétrica

no Brasil, os conceitos básicos da geração hidrelétrica, os tipos de turbinas hidráulicas e de geradores elétricos.

No Capítulo 3 serão apresentados os aspectos básicos da microgeração hidrelétrica, tais como a conexão à rede elétrica, o licenciamento ambiental, o cálculo do potencial hidráulico, o dimensionamento do sistema e os procedimentos para a avaliação econômica do projeto.

O Capítulo 4 é reservado à apresentação dos resultados do estudo de caso referente à avaliação técnica e econômica da implantação de um projeto de microgeração hidrelétrica em uma propriedade rural.

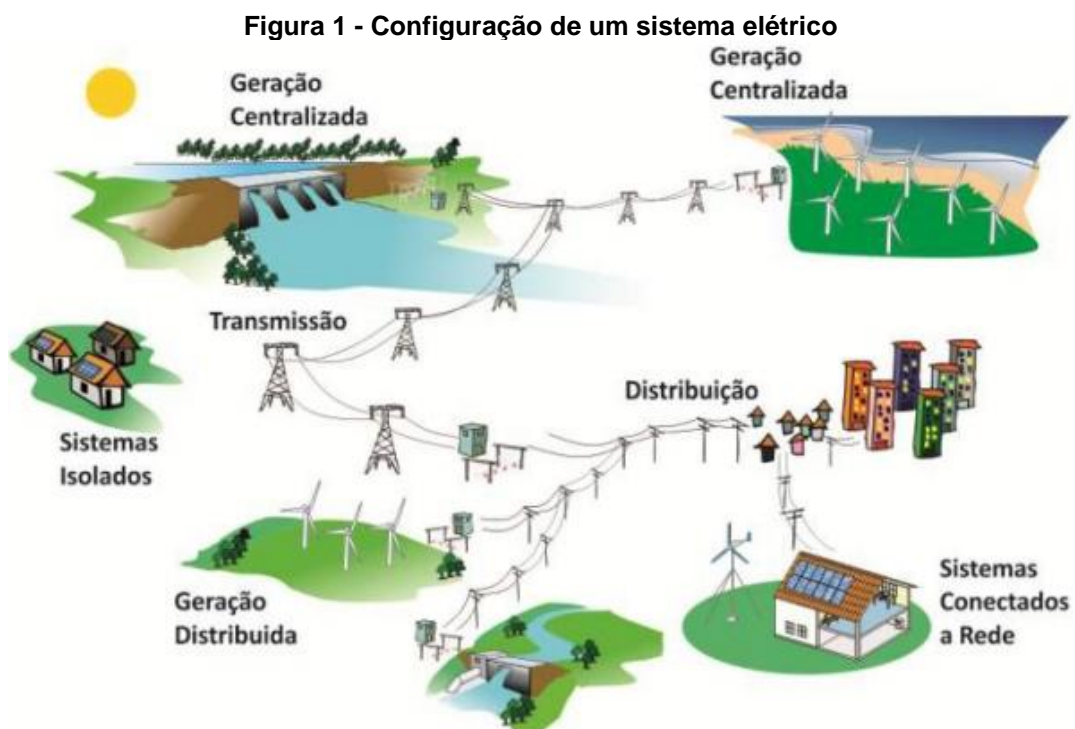
No Capítulo 5, serão apresentadas as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geração Distribuída e Autoprodução de Energia Elétrica

Sob o ponto de vista convencional, a produção de energia elétrica é centralizada por meio de pontos de geração de grande porte, como usinas hidrelétricas, termelétricas, parques eólicos e solares. Após o processo de geração a energia elétrica é transportada, por meio de grandes linhas de transmissão e redes de distribuição, até chegar ao consumidor final.

A geração distribuída é aquela conectada ao sistema de distribuição, ou à própria unidade consumidora, não sendo despachada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), caracterizando-se pelo pequeno porte e proximidade com a carga (SILVA, 2018). Esse tipo de geração vem se consolidando pelo fato de continuar suprimindo a crescente demanda por eletricidade sem comprometer a confiabilidade do sistema. Por meio da Figura 1 é possível verificar a configuração de um sistema elétrico, com os pontos de geração centralizada e distribuída.



Fonte: Montezano (2018).

A autoprodução é um segmento de produção de energia elétrica que concede ao produtor a autonomia de produzir sua energia, seja pessoa física ou jurídica, ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão/autorização para produzir energia destinada ao seu uso exclusivo (ANEEL, 2021).

Esse modelo de geração de energia elétrica surgiu no mercado brasileiro a partir do marco regulatório, sancionado em maio de 1981, no governo de João Figueiredo, por meio do Decreto-Lei nº 1.872. Nesse primeiro Decreto-Lei, os produtores que não utilizassem combustíveis fósseis em sua produção de energia elétrica poderiam negociar a venda da geração excedente com as concessionárias. Sendo assim, designava-se produtor todo titular de concessão ou autorização federal para a produção de energia destinada ao seu uso exclusivo e a energia elétrica excedente como a diferença do seu consumo próprio e a energia gerada em seu pleno aproveitamento (MENDES, 2011).

O marco regulatório é um conjunto de normas que têm o objetivo de disciplinar os produtores e produtores independentes de energia elétrica a seguirem leis e diretrizes que regulem e garantam o funcionamento dos setores privados que prestam serviços de utilidade pública (MENDES, 2011).

Em 26 de abril de 2002 o Brasil aderiu a um programa muito importante para o incentivo à utilização de energias renováveis. Nesse período foi instituído, pelo artigo 3º da Lei 10.438, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), garantindo maior confiabilidade do sistema por meio de uma diversidade de fontes de geração, proporcionando diretamente um crescimento na produção de energia utilizando fontes eólicas, fontes solares, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (MENDES, 2011).

A partir do dia 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro passou a ter mais incentivos para gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes hídricas, eólicas, solares e de cogeração qualificada ou biomassa. Também passou a poder fornecer o excedente para a rede de distribuição. Essa resolução fomentou o mercado de micro e minigeração distribuída, conciliando as inovações que podem promover economia financeira, consciência socioambiental e sustentabilidade. Os programas de incentivo à produção de energia elétrica utilizando fontes renováveis no Brasil foram similares aos programas praticados na Alemanha, país que é referência no incentivo à geração

renovável e que proporcionou um crescimento substancial à geração distribuída (ANEEL, 2016).

2.2 Sistema de Compensação de Energia Elétrica

O sistema brasileiro de compensação de energia permite que o excedente gerado pela unidade consumidora, por meio de micro ou minigeração, seja injetado na rede da distribuidora. Sendo assim, quando a energia elétrica produzida for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) podendo ser abatido em outro posto tarifário ou nas próximas faturas (ANEEL, 2016).

Os créditos de energia não são remunerados financeiramente pela distribuidora, nesse caso, se o consumidor não abater os créditos excedentes em até 60 meses, os mesmos serão expirados. Há ainda a possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizadas como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), em local diferente do ponto de consumo (ANEEL, 2016).

2.3 Evolução Histórica da Geração Hidrelétrica no Brasil

A utilização da energia hidráulica no Brasil, para a geração de energia elétrica teve início nos últimos 20 anos do século XIX. Esse fato é evidenciado pelas primeiras unidades de produção de energia hidrelétrica, construídas no estado de Minas Gerais para atender às fortes demandas das empresas do setor têxtil e de mineração. Como bem nos asseguram Rosa, Sigaud e Mielnik (1988), a primeira usina hidrelétrica (UHE) construída no Brasil, a usina de Ribeirão do Inferno, foi inaugurada em 1883, para suprir a demanda da mineradora Santa Maria em Diamantina.

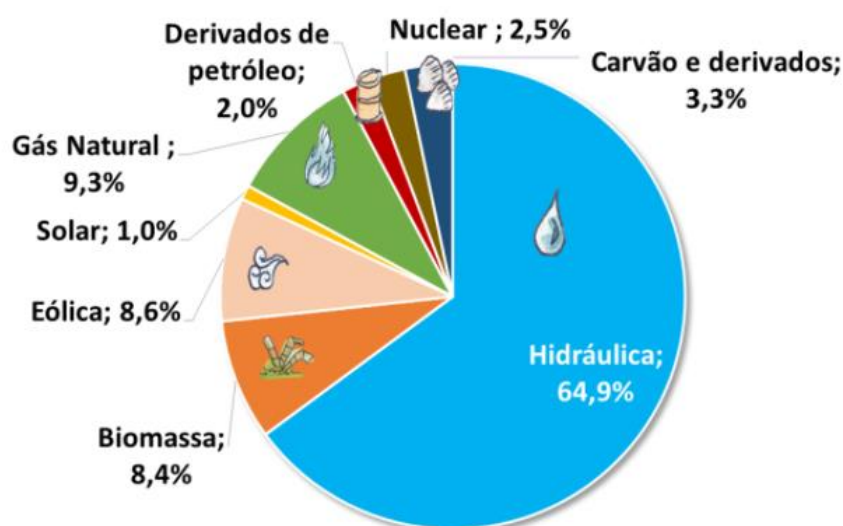
O advento da geração hidrelétrica no Brasil e os ciclos de desenvolvimento nacional acarretaram num aumento da demanda por energia elétrica, fomentando o surgimento de novos empreendimentos dessa categoria. Como não havia sistemas robustos de transmissão e distribuição de energia elétrica, segundo Müller (1995), nos primórdios da hidreletricidade, os relatos eram de que o cenário da utilização de hidrelétricas era muito maior, no entanto, para usinas menores e de perfil individual.

A primeira usina hidrelétrica pertencente ao serviço público do Brasil foi a usina de Marmelos, construída no ano de 1889, às vésperas da proclamação da República. Inicialmente foram instaladas duas turbinas de 125 kW cada, após algumas ampliações, a usina passou a ter 375 kW de potência instalada. Contudo, o tempo de operação dessa usina foi breve, porém marcante, por se tratar de uma usina pioneira nesse modelo de operação (MULLER, 1995).

No contexto histórico, o crescimento das usinas hidrelétricas no Brasil foi significativo e, em pouco mais de 100 anos da inauguração da UHE de Ribeirão do Inferno, foi construída, numa parceria entre Brasil e Paraguai, a Usina Hidrelétrica de Itaipú, com 14.000 MW de potência instalada (ANEEL, 2008), sendo hoje, a segunda maior usina hidrelétrica do mundo.

Atualmente a matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, com destaque para as usinas hidrelétricas. Como ilustrado na Figura 2, segundo os resultados preliminares do Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, a energia de fonte hidráulica responde por 64,9% da matriz elétrica do país (EPE, 2021).

Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: EPE (2021).

2.4 Conceitos Básicos da Geração Hidrelétrica

A geração de energia elétrica compreende todo o processo de transformação de uma fonte primária de energia em eletricidade (REIS; SILVEIRA,

2001). Nessas circunstâncias, o Brasil, em comparação com outros países, é rico em energia primária, por possuir em seu território condições geográficas favoráveis, além de um grande recurso hídrico para a produção de energia elétrica. Assim, o Brasil se destaca como o segundo maior produtor de energia elétrica a partir dessa fonte primária e o segundo maior em termos de participação na matriz de geração interna (BORGES NETO; CARVALHO, 2018).

O projeto de uma usina hidrelétrica deve fazer parte do plano de aproveitamento integral do rio em que será construída (ELETROBRAS, 1985), onde se utiliza toda a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período de tempo e os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente (ANEEL, 2008).

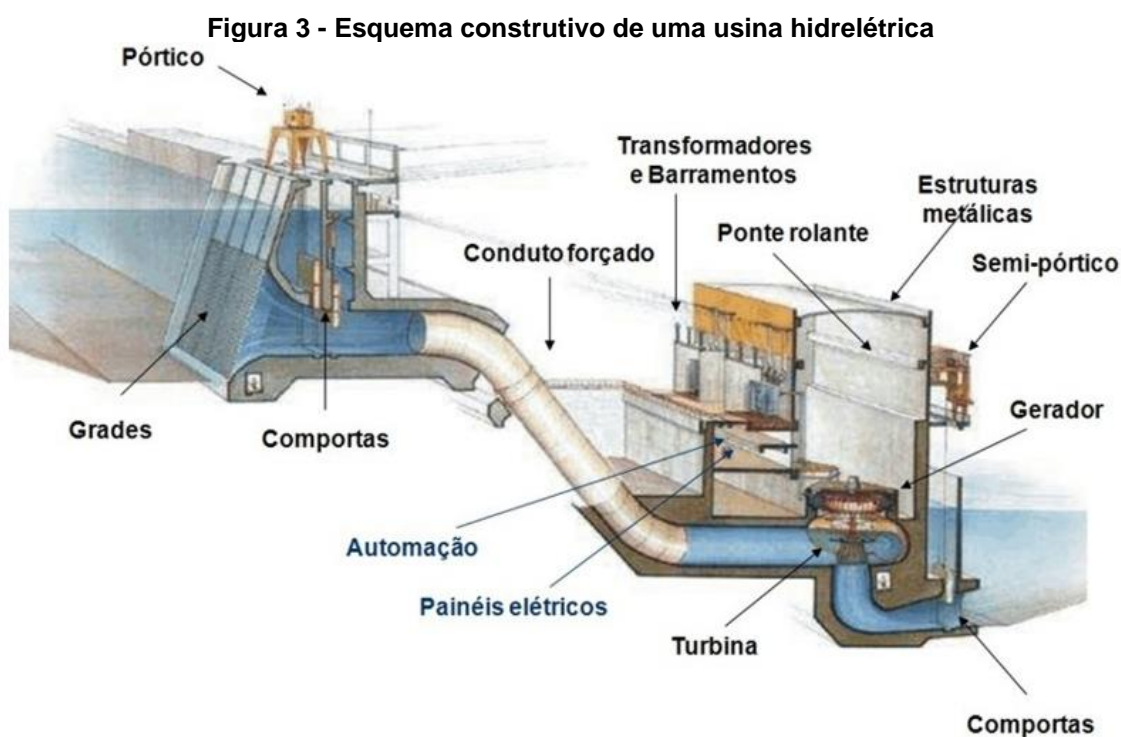
As barragens criadas artificialmente, bem como o sistema de adução de água, casa de força e vertedouro, compõem um conjunto, desempenhando papel importantíssimo no sistema de geração. Segundo a ANEEL (2008), além de interromper o curso do rio, as barragens criam uma diferença de potencial maior e conseqüentemente um ganho na eficiência do sistema de geração. Isso porque o potencial hidrelétrico está associado à conversão da energia potencial da água dos rios e lagos que se concentra nos aproveitamentos hidrelétricos em energia cinética, que é transformada em energia mecânica e, finalmente em energia elétrica (ELETROBRAS, 1985). Além do ganho de potencial hidrelétrico, a barragem tem por função regular as vazões dos rios e servir como reservatório para estocar a água. (ANEEL, 2008).

O conduto forçado, conforme ilustrado na Figura 3, é responsável pela adução da água até as turbinas. Nesse sistema de conversão de energia, a ANEEL (2008) esclarece que:

[...] em seu movimento giratório, as turbinas convertem a energia cinética (do movimento da água) em energia elétrica por meio dos geradores que produzem a eletricidade. Depois de passar pela turbina, a água é restituída ao leito natural do rio pelo canal de fuga. Os principais tipos de turbinas hidráulicas são: Pelton, Kaplan, Francis e Bulbo. Cada turbina é adaptada para funcionar em usinas com determinada faixa de altura de queda e vazão. A turbina tipo Bulbo é usada nas usinas fio d'água por ser indicada para baixas quedas e altas vazões, não exigindo grandes reservatórios. (ANEEL, 2008).

Para determinar a potência instalada de uma usina hidrelétrica é necessário considerar diversas variáveis. As condições de projeto estão relacionadas ao local da instalação do sistema, tipo de barragem e turbina a ser empregada (ANEEL, 2008). Nessa mesma conjuntura, a potência instalada determina se a usina é de grande, médio, ou pequeno porte. Conforme explicitado pela Eletrobrás (1985), as usinas hidrelétricas são classificadas como: microcentrais hidrelétricas, para potência instalada de até 100 kW; minicentrais para potência instalada entre 100 kW e 1.000 kW; de pequeno porte para potência instalada entre 1.000 kW e 30.000 kW e de grande porte para potência instalada superior a 30.000 kW.

Na Figura 3, apresentam-se os principais componentes de uma usina hidrelétrica com reservatório.



Fonte: IESA (2019).

2.5 Turbinas Hidráulicas

Para converter a energia disponível em um recurso hídrico em energia mecânica, utilizam-se as turbinas hidráulicas. Turbinas são dispositivos que produzem trabalho à medida que o escoamento de um gás ou de um líquido movimenta as pás presas a um eixo. A conversão de energia consiste basicamente em entregar trabalho

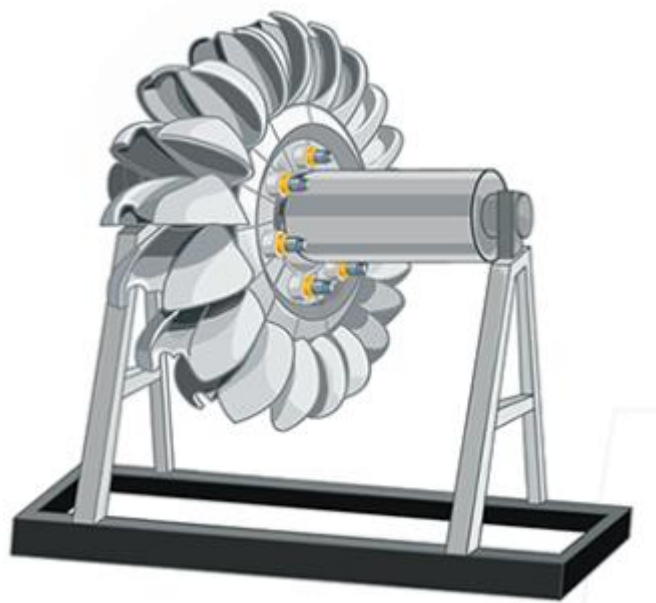
através de um eixo ao rotor da turbina, que está mecanicamente acoplado ao eixo do rotor de um gerador elétrico. As turbinas hidráulicas podem ser classificadas de duas maneiras, turbinas de ação ou de reação, conforme seu princípio hidrodinâmico de funcionamento (DI LASCIO; BARRETO, 2009)

Nas turbinas hidráulicas de ação, os rotores trabalham à pressão atmosférica, e a potência mecânica é produzida por meio da variação da velocidade da água pela ação das pás da turbina. Exemplos desse tipo de turbina são: Turbinas Pelton e Turbinas Banki (DI LASCIO; BARRETO, 2009). Turbinas de reação são aquelas que utilizam a variação da magnitude da velocidade da água para exercer uma força sobre as pás. Nesse caso, os rotores trabalham com pressões inferiores à atmosférica. Exemplos desse tipo de turbina são: Turbinas Francis e Turbinas Hélice ou Kaplan (DI LASCIO; BARRETO, 2009).

As turbinas hidráulicas dividem-se basicamente em três tipos principais: Pelton, Francis e Kaplan. Os parâmetros mais relevantes na seleção e dimensionamento desses componentes são: altura de queda bruta e volume de água. Dessa forma, é possível selecionar a turbina mais apropriada para aplicação, de acordo com a disponibilidade do potencial hídrico de cada região (ROCHA, 2008).

2.5.1 Turbina Pelton

A turbina Pelton foi desenvolvida em 1878 pelo americano Allan Lester Pelton, que, por meio da sua criação, mudou o conceito envolvendo rodas d'água. Sua invenção, baseada em divisores de injeção de água em um ou mais diferentes pontos, proporcionou um rendimento significativo na produção de energia, que neste caso, em condições ideais, pode atingir 90% (CARDOSO, 2016). Na Figura 4, ilustra-se uma turbina do tipo Pelton.

Figura 4 - Turbina Pelton

Fonte: Labtime (2021).

Para obter maior velocidade de escoamento, a turbina deve ser instalada para uma altura de queda mínima de 200 metros, podendo ir até 1.200 metros, por isso são muito mais comuns em países montanhosos (GONÇALVES, 2007 *apud* CARDOSO, 2016). Esse modelo de turbina opera com grandes velocidades angulares, apresentando distinções constitutivas no rotor quando comparada às demais.

A principal desvantagem na utilização de turbinas Pelton é a manutenção das pás. A mistura de água com fragmentos de areia, conciliada com a velocidade elevada do jato de água que se choca com as pás da turbina, provocam um desgaste elevado. Desse modo, a vida útil do equipamento é reduzida significativamente (MARCHEGIANI, 2004; GONÇALVES, 2007 *apud* CARDOSO, 2016).

2.5.2 Turbina Francis

A turbina Francis foi criada em 1849 pelo inglês James Bicheno Francis sendo um dos modelos mais utilizados até hoje. Indicada para uma faixa de aproximadamente 10 até 200 metros de altura de queda, a turbina Francis engloba um setor intermediário no requisito altura e volume d'água. Sua versatilidade na gama de fluxos de água é seu maior diferencial, assim sua conversão de energia potencial hidráulica em energia mecânica é muito mais atrativa e eficaz (SCHREIBER, 1978). A

turbina é de reação, radial – axial, utilizada verticalmente ou horizontalmente. O distribuidor é composto por aletas móveis para regular o fluxo de água que leva ao rotor, assim, a água entra perpendicularmente ao eixo da turbina e sai paralela a ele (SCHREIBER, 1978).

Outro ponto muito importante é o conjunto distribuidor. Esse conjunto possibilita a regulagem do fluxo de água que entra no rotor, diminuindo a perda hidráulica por atrito viscoso e maximizando o rendimento do equipamento. Nesse caso, são utilizadas palhetas que atuam como guias localizadas em formato circular podendo ser orientadas durante a operação, assumindo ângulos adequados às descargas (GERMER, 2015). Na Figura 5, apresenta-se um modelo de turbina Francis.

Figura 5 - Turbina Francis



Fonte: Hidroenergia (2021).

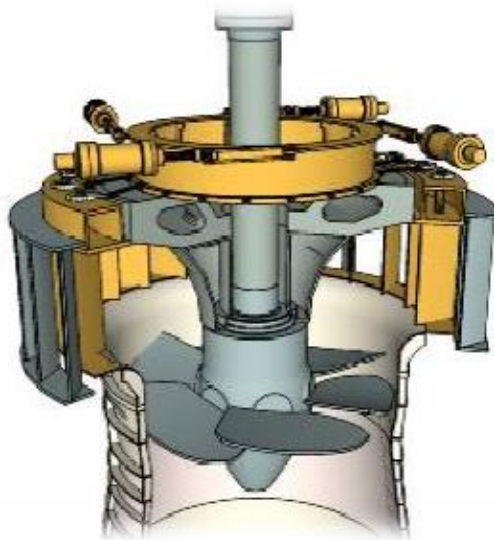
2.5.3 Turbina Kaplan

A turbina Kaplan conforme ilustrado na Figura 6, foi desenvolvida no ano de 1912 por Victor Kaplan. Esse modelo de turbina é muito utilizado para pequenas quedas de água e nas configurações eixo vertical e eixo horizontal, sendo nesse último caso designadas como turbinas Bulbo (SANTOS, 2013).

Segundo a norma técnica NBR 6445 de 2013, o elemento rotativo é constituído por um núcleo hidrodinâmico, contendo algumas pás em formato de hélices reguláveis. Através desse rotor, o fluxo de água é direcionado de forma a seguir a direção axial na entrada e saída da água. A grande vantagem da regulação

das pás motrizes, além de regular a vazão, é permitir que as turbinas Kaplan apresentem uma curva de rendimento plana, garantindo bom rendimento em uma ampla faixa de operação (SANTOS, 2013).

Figura 6 - Turbina Kaplan instalada com rotor vertical



Fonte: Santos (2013).

2.5.4 Turbina Hidrocinética (THC)

Para projetos de microcentrais hidrelétricas com pouca diferença de potencial hidráulico, são utilizados os modelos de turbinas hidrocinéticas. Esse tipo de turbina converte a energia cinética de rios ou de correntes de maré em eletricidade. A geração de energia depende apenas do movimento rotacional das pás fixas ao eixo da turbina e do rotor do gerador para produzir eletricidade. Entretanto, a capacidade de produção de energia depende de dois fatores, velocidade do fluxo da água e diâmetro do rotor (ARAUJO, 2016). Na Figura 7 ilustra-se a utilização de uma turbina hidrocinética.

Figura 7 - Esquema de aplicação de uma THC



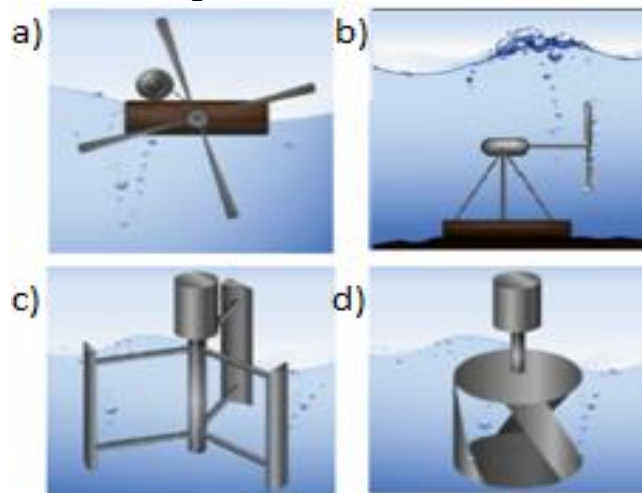
Fonte: MEC (1996).

Segundo Botan (2006), atualmente existem diversos tipos de turbinas hidrocínéticas. Dentre esses modelos, é possível encontrar turbinas com eixo axial, em plano e vertical. Cada uma delas é utilizada conforme sua eficiência de geração em relação às limitações físicas do projeto.

As turbinas verticais, planas e horizontais, mostradas na figura 8, apresentam características de eficiência e operacionais distintas. Conforme elucidado por Araujo (2016):

[...] as turbinas de eixo horizontal possuem baixo torque de partida e maior eficiência, as de eixo em plano são pouco eficientes e as de eixo vertical operam em qualquer direção do fluido, porém possuem um alto torque de partida. As turbinas de eixo horizontal com gerador não submerso são menos eficientes, por incluir na transmissão, correias, mancais e engrenagens. (ARAUJO, 2016).

Figura 8 - Modelos de THC



Fonte: (ARAUJO, 2016)

a) Eixo em plano. b) Eixo horizontal com base fixo. c) Eixo vertical Darrieus. d) Eixo vertical Gorlov.

2.6 Geradores Elétricos

O gerador é a máquina elétrica responsável pela conversão final de energia que ocorre em uma central hidrelétrica, que é a conversão da energia mecânica fornecida pela turbina em energia elétrica (TIAGO FILHO *et al.*, 2008). Os geradores podem ser acoplados diretamente ao eixo da turbina, ou conectados de forma indireta, por meio de engrenagens, que têm a principal função de regular a velocidade do rotor, e assim, proporcionar uma condição favorável em termos de operação para produção de energia elétrica (ALVES, 2007).

Os geradores disponíveis no mercado brasileiro para aplicação na geração de energia hidrelétrica podem ser classificados basicamente em dois tipos: síncronos ou assíncronos.

2.6.1 Geradores Síncronos

Para a geração de energia elétrica utilizam-se predominantemente geradores síncronos. Conforme ilustrado na Figura 9, sua estrutura é composta por uma parte fixa chamada de estator e outra parte móvel chamada de rotor. Por meio de anéis coletores e escovas, o enrolamento que envolve o rotor é alimentado por uma fonte de tensão contínua, gerando um campo magnético (campo magnético indutor). O rotor é conectado à máquina primária (turbina) e por meio da rotação do conjunto, cria-se a variação de fluxo necessária para a indução de tensões elétricas nos enrolamentos situados no estator, o que caracteriza a conversão de energia mecânica em energia elétrica (ALVES, 2007).

Figura 9 - Máquina Síncrona



Fonte: Brito (2016).

O gerador síncrono possui uma estreita relação entre sua velocidade de operação e a frequência da tensão gerada, relação essa que é função do número de pólos do gerador que, por sua vez, é uma característica construtiva (TIAGO FILHO *et al.*, 2008). Nesse caso, para menores velocidades o sistema gerador exige um número maior de pólos, o que nesse caso, tem impacto direto no custo do gerador.

Por meio da Equação 1, é possível determinar a rotação necessária na ponta do eixo para manter o gerador em sincronismo com a frequência de operação, uma vez definido o número de pólos.

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Onde:

n = Velocidade de rotação da máquina (rpm);

f = Frequência (Hz);

P = Número de pólos do gerador.

2.6.2 Geradores Assíncronos

As máquinas de indução são utilizadas, em larga escala, como motores elétricos. Entretanto, quando aplicadas na produção de energia elétrica, em microgeração hidrelétrica, podem apresentar uma solução técnica viável e econômica.

Sua estrutura simplificada, que dispensa a utilização de um enrolamento envolvendo o rotor (dispensa os anéis coletores, as escovas e a fonte de tensão contínua), torna o gerador de indução uma máquina praticamente isenta de manutenção quando comparada com geradores síncronos. (MEDEIROS *et al.*, 2005). Na Figura 10, é ilustrada a estrutura física de uma máquina assíncrona.

Figura 10 - Máquina Assíncrona



Fonte: Indiamart (2021).

Para a aplicação do gerador assíncrono, o mais indicado é utilizar o rotor “gaiola de esquilo”. Contudo, para efeito de conversão de energia mecânica em elétrica o gerador deve atender algumas condições operacionais. Uma delas é a velocidade do rotor, que deve ser mantida acima de sua velocidade síncrona e é necessário que a mesma seja o mais constante possível para evitar oscilações bruscas na frequência. Além da velocidade, o gerador deve aumentar o magnetismo residual em seu rotor (MEDEIROS *et al.*, 2005). De acordo com Duarte (2019):

[...] devido à pequena intensidade do magnetismo remanescente no rotor, proporcionado por operações anteriores como motor ou ligação de baterias, as tensões induzidas serão muito baixas e conseqüentemente insuficientes para a utilização em carga.

Para que o efeito do magnetismo residual seja maximizado, é fundamental que haja o fornecimento de potência reativa à máquina, seja através da rede elétrica, quando ocorre a operação interligada, ou por meio de capacitores, quando a operação isolada é necessária (DUARTE, 2019)

Para os geradores assíncronos de até 100 kW e 4 (quatro) pólos, segundo Duarte (2019) é necessário a aplicação de um mecanismo de transmissão mecânica, que geralmente utiliza um conjunto de correias e polias. Esse mecanismo tem por objetivo alcançar os parâmetros de velocidade mínima exigidos para a geração de energia elétrica.

No próximo capítulo serão apresentados os aspectos referentes à microgeração hidrelétrica, tema principal do trabalho proposto.

3 MICROGERAÇÃO HIDRELÉTRICA

3.1 Aspectos Básicos da Microgeração Hidrelétrica

Os pequenos aproveitamentos de recursos hídricos por meio de microcentrais hidrelétricas (μCH) trazem vários benefícios potenciais. Além do benefício financeiro, a utilização das microcentrais hidrelétricas é fundamental para o desenvolvimento agrícola, permitindo a mecanização das diversas atividades rurais.

Também é possível destacar a contribuição desse sistema de geração nas regiões mais remotas, onde o custo de implantação de linhas de transmissão e distribuição são elevados, tornando o sistema ineficiente diante dos altos índices de perdas e manutenção (GOLDEMBERG *et al.*, 2000).

Para a construção das microcentrais hidrelétricas, é necessário elaborar arranjos que contribuam com a captação da água, para a adução até a casa de máquinas, onde será realizado o processo de geração de energia elétrica. Nos casos onde os cursos d'água possuem grandes variações em seu curso normal, é necessária a utilização de barragens com estrutura vertedora. No segmento das microcentrais à altura das barragens não pode ultrapassar 3 metros, sendo que essas condições garantem um comportamento típico à fio d'água (ELETROBRAS, 1985).

A modelagem com barragem e vertedouro nos sistemas de ligação entre a tomada d'água e a casa de máquinas é a mais completa para as aplicações desse tipo de geração hidrelétrica. Contudo, para implantar o sistema de adução é possível utilizar diversas estruturas e combinações e dessa forma utiliza-se a mais adequada. Abaixo estão listadas algumas opções (ELETROBRAS, 1985):

- a) Implantação da casa de máquina o mais próximo possível da tomada d'água, nessa aplicação diminui-se o trecho de adução para a mesma altura de queda, captando as vazões do curso d'água entre os níveis máximos e mínimos;
- b) Adução em baixa pressão com escoamento livre em canal/alta pressão em conduto forçado;
- c) Adução em baixa pressão por meio de tubulação/alta pressão em conduto forçado;

- d) Adução em baixa pressão, sem tubulação forçada, para turbina tipo caixa aberta.

3.2 Conexão da Microgeração Hidrelétrica à Rede Elétrica

De acordo com a legislação brasileira o consumidor cativo pode gerar sua própria energia por meio de sistemas de micro ou minigeração. No entanto, para liberação da conexão junto à distribuidora local o consumidor deve seguir os procedimentos para viabilização de acesso conforme a resolução normativa nº 482/2012 e, complementarmente, conforme a seção 3,7 do Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Dessa forma, todo consumidor ativamente cadastrado, por um CPF ou um CNPJ, tem concessão para conectar um sistema de geração de energia elétrica, seja ele de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada (ANEEL, 2012).

Os procedimentos para a viabilização de acesso são bastante simples, conforme estabelecido na seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST, sendo: consulta de acesso, informações de acesso, solicitação de acesso e parecer de acesso (ANEEL, 2016).

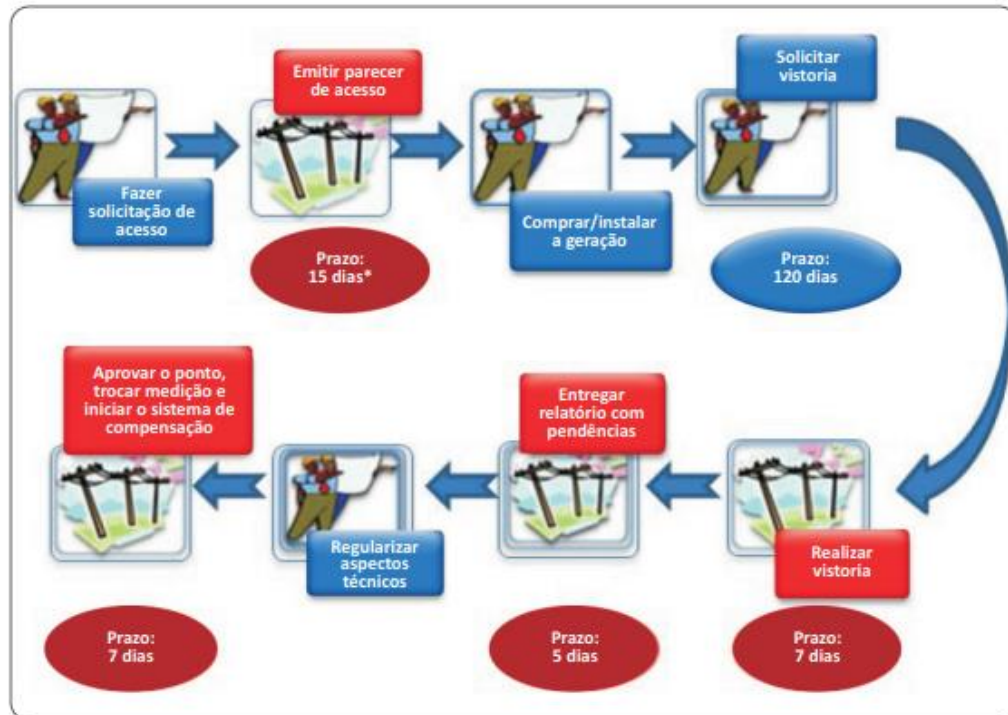
O procedimento de consulta e solicitação de acesso deve ser solicitado com antecedência na distribuidora titular de concessão da região onde pretende-se realizar a instalação do sistema de geração. Após a solicitação, a distribuidora avaliará, e, em caso de inconsistência na documentação, a mesma poderá realizar a recusa da solicitação. No entanto, se não houver irregularidade a distribuidora emitirá um documento formal de aprovação, informando todos os requisitos técnicos para a conexão (ANEEL, 2016).

Com o parecer de acesso aprovado o consumidor está apto para comprar e instalar a microcentral. Após a conclusão da instalação é solicitada a vistoria junto à distribuidora, que aprovará ou não de acordo com suas exigências pré-estabelecidas (ANEEL, 2016).

Por meio da aprovação da vistoria técnica o gerador está apto para ser conectado à distribuidora local. Na Figura 11 são apresentadas as etapas e prazos do

procedimento de acesso que devem ser seguidos pelo consumidor e pela distribuidora (ANEEL, 2016).

Figura 11 - Procedimentos e etapas de acesso



Fonte: ANEEL (2016).

3.3 Licenciamento Ambiental

Para o licenciamento e viabilização de empreendimentos hidrelétricos para sistemas de pequeno porte com potência instalada inferior a 10 MW e uma área inundada inferior a 100 hectares, é necessário realizar apenas o Estudo Ambiental Simplificado (EAS), previsto na Lei nº 14.675/2009 e Resolução CONSEMA nº 98/2017.

Conforme termo de referência, o empreendimento será avaliado podendo ser aprovado e liberado para execução das atividades em um prazo de até 4 anos, bem como sua implantação e operação, de acordo com os controles ambientais aplicáveis a serem definidos pelo órgão ambiental licenciador (IMA, 2019). De acordo com IMA (2019), na instrução normativa número 44 o procedimento para liberação ambiental consiste em três etapas:

- a) Licenças Ambientais Prévias (LAP), que fazem parte da primeira etapa do processo de liberação ambiental e dão a viabilidade do local do empreendimento;
- b) Licenças Ambientais de Instalação (LAI), que permitem o início das obras, cumprindo diversas ações de meio ambiente;
- c) Licenças Ambientais de Operação (LAO), que permitem a entrada em operação dos empreendimentos.

3.4 Dimensionamento da Microgeração Hidrelétrica

Nessa seção serão descritos os procedimentos para o dimensionamento e implantação de um sistema de microgeração hidrelétrica. Segundo Souza (2009), para a implantação de microcentrais hidrelétricas, os estudos devem seguir alguns procedimentos. Esses procedimentos podem ser divididos nas seguintes etapas:

- a) Escolha do local para instalação da microgeração;
- b) Topografia e geomorfologia do aproveitamento hídrico;
- c) Medição da vazão;
- d) Medição da altura de queda bruta;
- e) Cálculo do potencial hidráulico;
- f) Seleção do conjunto turbina-gerador.

3.4.1 Escolha do Local para Instalação da Microgeração

O primeiro procedimento para a implantação de uma μCH é a identificação do local exato do aproveitamento hídrico na propriedade rural. A identificação é essencial para conhecer as características físicas do projeto, que servirão de base para o dimensionamento do empreendimento e avaliação dos impactos ambientais, além de ser o ponto de partida para o reconhecimento de algumas características civis, hidráulicas e elétricas que serão chaves no projeto (SILVA, 2017).

3.4.2 Métodos para a Medição da Vazão

A vazão de um rio ou qualquer curso d'água é definida pelo volume de água que passa por uma área na unidade de tempo, sendo o valor expresso em metros cúbicos por segundo (m^3/s). No entanto, para determinar a quantidade de água que passa em um determinado local é necessário conhecer as características físicas do curso d'água em estudo, sendo essas: sua área, forma, sistema de drenagem, relevo, além da precipitação total e seu regime de perdas por evaporação, transpiração e infiltração (BONIFÁCIO; FREIRE, 2013). Além das características físicas, para o cálculo da vazão volumétrica é necessário também conhecer a velocidade do fluxo de água e a área da seção transversal do aproveitamento hídrico. Na literatura é possível encontrar diversos métodos para determinar a velocidade de um curso d'água, como por exemplo, o método do molinete hidrométrico, o método acústico e o método do flutuador.

O método do molinete hidrométrico baseia-se em medições da velocidade do fluxo da água em vários pontos da seção. Conforme ilustrado na Figura 12, o molinete tem formato de torpedo que converte o movimento de translação do fluxo de água em um movimento de rotação da hélice. Por meio de um contador é determinado o número de voltas que a hélice realiza durante um intervalo de tempo previamente estabelecido. Desse modo, conhecendo o número de voltas da hélice num dado intervalo de tempo é possível determinar a velocidade utilizando-se uma equação disponibilizada pelo fabricante do molinete (RIOS *et al.*, 2011).

Figura 12 - método do molinete hidrométrico

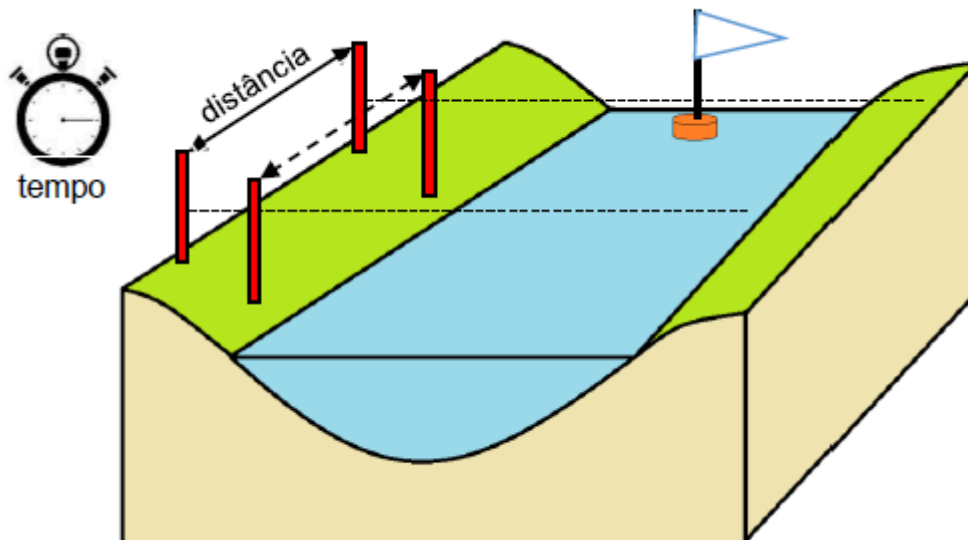


Fonte: Rios *et al.*, (2011).

Para a avaliação da velocidade do fluxo da água com maior precisão, utiliza-se o método acústico, também conhecido como o método *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). Sua aplicação consiste na emissão de pulsos acústicos ao longo de feixes estreitos em uma frequência conhecida, nesse caso, o equipamento consegue determinar a velocidade do fluxo da água em determinadas áreas que o equipamento percorreu. Sua aplicação é bastante simples, porém demanda de um equipamento que se baseia em uma técnica de sensoriamento remoto através do efeito Doppler (RIOS *et al.*, 2011).

Dentre os métodos listados, o método do flutuador se destaca por ser eficaz e ao mesmo tempo simples. Esse método permite determinar a velocidade da água utilizando um objeto flutuante que escoa na superfície da água, medindo-se o tempo necessário para que esse objeto se desloque de um ponto a outro em um trecho do curso d'água, com comprimento conhecido (BONIFÁCIO; FREIRE, 2013). Seguindo as orientações de Palhares *et al.* (2007), nesse tipo de medição pode-se utilizar uma bolinha de isopor e uma distância entre as seções a montante e a jusante de 6 metros. Na Figura 13, ilustra-se a aplicação do método.

Figura 13 - Aplicação do método do flutuador



Fonte: Araújo (2016).

A velocidade do flutuador é igual à distância entre as seções, dividida pelo tempo de travessia, conforme a Equação 2:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

Δl = deslocamento (m);

Δt = Intervalo de tempo (s);

v = Velocidade (m/s).

O flutuador de superfície flutua com velocidade próxima à da superfície do curso d'água e, por isso, é muito leve e pode ser arrastado pelo vento. Neste caso, para corrigir tal efeito a Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2010) recomenda que se utilize um coeficiente de aproximadamente 0,85, que pode variar de 0,85 a 1,00, dependendo da forma da seção transversal, tipo do flutuador e distribuição da velocidade (COFFERRI, 2017).

Para determinar a área da seção transversal, utiliza-se o método da seção média. Conforme a Figura 14, para a aplicação desse método é necessário particionar a seção transversal total em subseções compreendidas entre linhas verticais. A área de cada subseção é dada pelo produto da distância entre cada linha vertical pela profundidade. Nas margens deve-se considerar a área como sendo a aproximação da área de um triângulo. (COFFERRI, 2017). Com a Equação 3 é possível determinar a área da seção transversal total.

$$At = \sum_{i=1}^n (Ai) \quad (3)$$

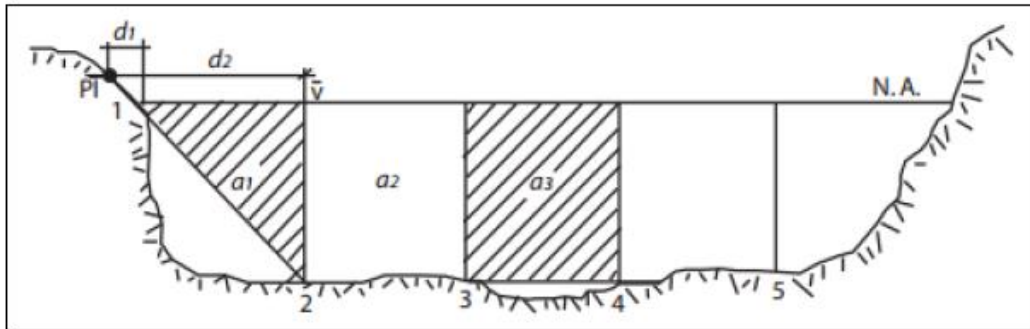
Onde:

At = Área total da seção transversal (m²);

Ai = Área transversal da subseção i (m²);

n = Número de subseções.

Figura 14 - Esquema de verticais e áreas



Fonte: Santos (2001).

Com a determinação da velocidade do fluido e da área total da seção transversal, a vazão volumétrica pode ser obtida pela Equação 4.

$$\dot{Q}_t = v \cdot At \quad (4)$$

Onde:

\dot{Q}_t = Vazão volumétrica (m³/s);

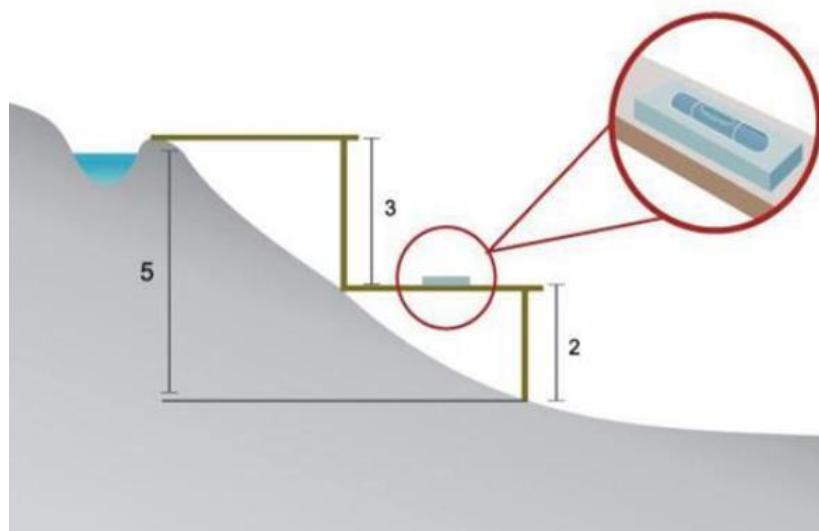
At = Área total da seção transversal (m²);

v = Velocidade do fluido (m/s).

3.4.3 Métodos para a Medição da Altura de Queda

O primeiro método para a medição da altura de queda é bastante simples, conhecido popularmente como o método do nível de pedreiro. Esta técnica demanda de ferramentas bastante conhecidas como, um nível de pedreiro, duas réguas de madeira bem aplainadas e um instrumento de medida (trena) com escalas em metros e centímetros.

Conforme a Figura 15 para a sua aplicação é necessário colocar uma das réguas em posição vertical e a segunda régua em posição horizontal com base na sua referência, regulando o arranjo de modo que a régua horizontal fique sempre no nível. Nessa técnica é fundamental que a medição seja efetuada por etapas, e assim, a altura de queda poderá ser obtida pela somatória das parcelas aferidas do nível superior até o nível inferior da lâmina de água (ELETROBRAS, 1985).

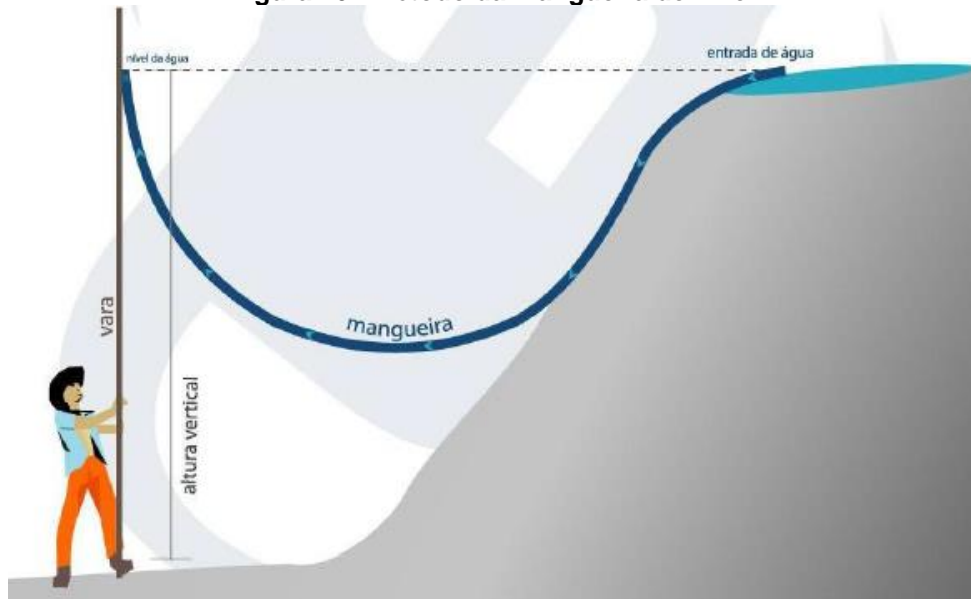
Figura 15 - Método do nível de pedreiro

Fonte: Alterima (2021).

O segundo método para a medição da altura de queda é também bastante simples e utilizado amplamente na construção civil. Esta técnica demanda os seguintes materiais, uma mangueira de nível transparente, uma régua de madeira e um instrumento de medida (trena) com escalas em metros e centímetros.

Para a aplicação do método, conforme ilustrado na Figura 16. coloca-se a régua em posição vertical, no ponto de referência onde deseja-se medir a diferença de potencial. Com o auxílio da mangueira de nível flexível e transparente, cheia de água, determina-se na régua os pontos de igual nível, criando um plano horizontal de referência entre os pontos. Nesse caso, a diferença entre as alturas desse plano sobre os dois pontos em medição, resultará na altura da queda (SOUSA; SOUZA; CASTRO, 2002).

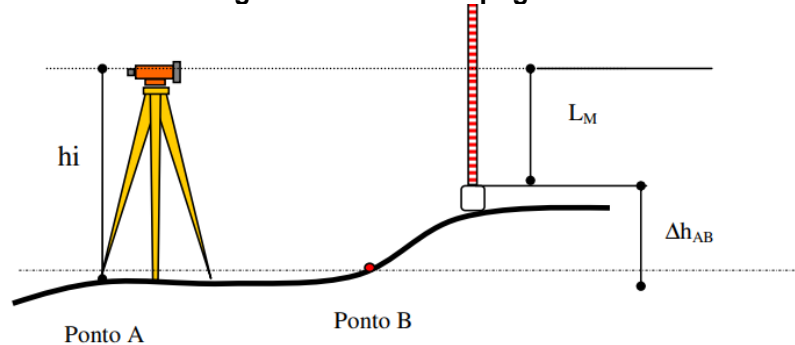
Figura 16 - Método da mangueira de nível



Fonte: Alterima (2021).

O terceiro método para a medição da altura de queda consiste no levantamento por meio de instrumentos de topografia. O levantamento topográfico pode ser classificado em duas partes: o levantamento planetário, onde se procura determinar a posição planimétrica dos pontos (coordenadas X e Y) e o levantamento altimétrico, onde o objetivo é determinar a cota ou altitude de um ponto (coordenada Z). Sua aplicação consiste no posicionamento correto dos instrumentos colocando-o no nível e realizando as varreduras dos pontos previamente estabelecidas onde se deseja determinar as cotas. Na Figura 17 determina-se o desnível entre a posição do nível e da mira através do conhecimento da altura do nível e da leitura efetuada sobre a mira (VEIGA; FAGGION; ZANETTI, 2012).

Figura 17 - Método topográfico



Fonte: Veiga, Faggion e Zanetti (2012).

Δh_{AB} = Desnível entre o ponto A e B. L_M = Leitura do nivelador (fio médio).

h_I = Altura do instrumento.

3.4.4 Cálculo do Potencial Hidráulico

Para obter o potencial hidráulico em um determinado rio ou ribeirão, são utilizadas a vazão volumétrica e a altura de queda, cujos valores são obtidos por medições, como descrito nas subseções anteriores, no local escolhido para a implantação do sistema de geração (ELETROBRAS, 2021). De forma geral, a capacidade de produção de um aproveitamento hidrelétrico é dada pela Equação 5 a seguir:

$$P = \rho \cdot g \cdot \dot{Q} \cdot H \cdot \eta_h \cdot \eta_t \cdot \eta_g \quad (5)$$

Onde:

P = potência elétrica gerada (W);

ρ = densidade da água ($\sim 1.000 \text{ kg/m}^3$);

g = aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

\dot{Q} = vazão volumétrica da turbina (m^3/s);

H = altura de queda bruta (m);

η_h = rendimento hidráulico;

η_t = rendimento da turbina;

η_g = rendimento do gerador.

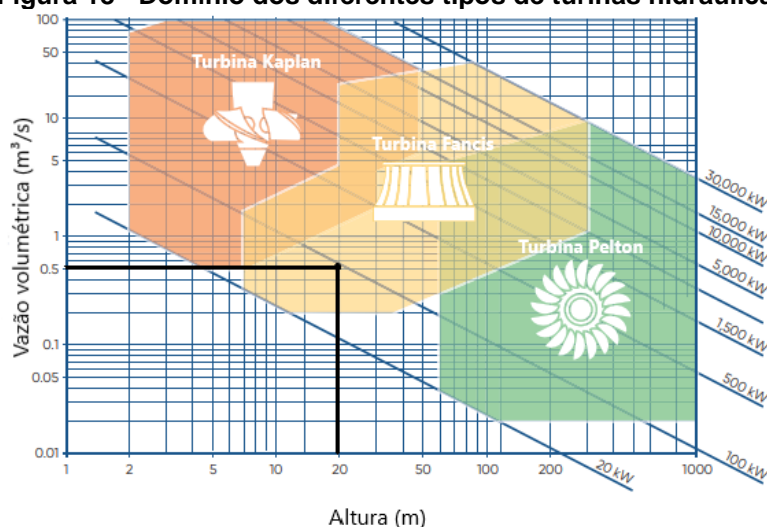
3.4.5 Escolha do Conjunto Turbina-Gerador

Para determinar a turbina hidráulica adequada para o aproveitamento hídrico é necessário conhecer os parâmetros de altura de queda e vazão volumétrica, pois cada turbina, possui sua particularidade para cada campo de aplicação. Por exemplo: a turbina Pelton, é mais adequada para maiores alturas de queda e pequenas vazões volumétricas. Já a Francis é uma turbina mais adequada para médias alturas de queda e médias vazões volumétricas e a Kaplan mostra-se adequada às baixas quedas e grandes vazões (TIAGO FILHO *et al.*, 2008).

Conforme ilustrado na Figura 18, pode-se utilizar um gráfico de seleção para turbinas hidráulicas, baseado em domínios estabelecidos para cada turbina. O método de escolha consiste em cruzar o eixo X, que apresenta os parâmetros de

altura de queda, com o eixo Y, que apresenta a vazão volumétrica e desse modo, o ponto de cruzamento indica a turbina adequada para o projeto, bem como a potência mecânica disponível em quilowatts (kW). Por exemplo, para um aproveitamento hídrico com 20 metros de altura de queda e uma vazão volumétrica de 0,5 m³/s, a turbina mais adequada é a Francis com uma potência mecânica de aproximadamente 100 kW.

Figura 18 - Domínio dos diferentes tipos de turbinas hidráulicas



Fonte: adaptado de Andritz (2021).

Atualmente para a fabricação de turbinas e geradores para micro e minigeração de energia hidrelétrica, os fabricantes adotam um modelo diferente de fornecimento, formado por um conjunto de turbina e gerador em “skid” (montagem sobre uma base única). O fabricante de geradores WEG (2021) esclarece que:

[...] neste conceito de montagem, os principais componentes da turbina e do gerador são montados em cima de uma base única, dentro da fábrica, em um ambiente controlado de produção, utilizando toda a qualidade dos processos e permitindo que alguns testes sejam realizados antes do conjunto seguir para o local de instalação. Este arranjo, com o rotor da turbina em balanço, montado diretamente no eixo do gerador, permite reduzir o número de mancais e o comprimento do conjunto, tornando a unidade geradora mais compacta e fazendo com que a casa de força tenha dimensões reduzidas, resultando em um menor custo de implantação da obra (WEG, 2021).

Além da customização e simplicidade na implantação do sistema gerador, os fabricantes disponibilizam as informações técnicas para projeto e dimensionamento. Nesse caso, conhecendo o modelo da turbina a ser instalada e os

parâmetros de vazão volumétrica e altura de queda é possível determinar o conjunto turbina-gerador.

3.5 Análise Econômica do Investimento

Os estudos para a implantação da microgeração hidrelétrica devem ser complementados com uma análise da viabilidade econômica do investimento. Para isso, devem-se identificar os custos e receitas relacionados ao projeto, tais como o investimento necessário para a implantação do sistema, os custos de operação e manutenção, bem como os benefícios relativos à redução do consumo de energia elétrica proveniente da concessionária de distribuição. Isso permite a construção de um fluxo de caixa que tem por objetivo representar todos os custos e receitas, distribuídos por todo o período de vida útil do sistema de geração.

Esse fluxo de caixa deve ser construído em base anual, sendo que na data “zero” estará presente o valor do investimento inicial, composto pelos custos com a aquisição dos equipamentos, obras civis, adaptações elétricas e hidráulicas necessárias, mão de obra, bem como o custo relativo ao licenciamento ambiental. Além disso, deve-se registrar nos períodos futuros do fluxo de caixa, o custo anual de operação e manutenção, que pode ser estimado em 5 % do investimento inicial (ANEEL, 2009).

Para complementar a composição do fluxo de caixa, deve ser considerada a receita anual obtida com a redução da dependência do fornecimento de energia elétrica proveniente da concessionária de distribuição. Com a Equação 6, pode-se calcular essa receita anual.

$$REC = (C_s - C_c) \cdot tarifa \quad (6)$$

Onde:

REC = receita anual com a microgeração (R\$);

C_s = consumo anual de energia elétrica sem a microgeração (kWh);

C_c = consumo anual de energia elétrica com a microgeração (kWh);

$tarifa$ = tarifa de energia elétrica (R\$/kWh).

Nas situações em que a microgeração proporciona a autossuficiência em termos de suprimento, deve-se considerar o pagamento sobre o consumo mínimo faturável de 30 kWh (para instalações elétricas monofásicas), 50 kWh (para instalações elétricas bifásicas) e 100 kWh (para instalações elétricas trifásicas) (ANEEL, 2010).

A avaliação econômica do investimento requer ainda a definição da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) do investidor (VILLAMARIM JÚNIOR, 2016), parâmetro que permite comparar o investimento na implantação da microgeração hidrelétrica, com uma alternativa de investimento que já esteja disponível no mercado financeiro. Ou seja, a TMA representa a rentabilidade de uma alternativa de investimento (Alternativa de Referência) na qual o indivíduo que pretende implantar a microgeração, já aplica ou tem a possibilidade de aplicar uma certa quantia de dinheiro.

Uma vez construído o fluxo de caixa do projeto de microgeração hidrelétrica e conhecida a TMA, os métodos descritos a seguir poderão ser utilizados na avaliação econômica.

3.5.1 Método do Valor Presente Líquido (VPL)

Uma vez conhecido o fluxo de caixa do projeto de microgeração, é possível determinar o Valor Presente Líquido do mesmo, trazendo a valor presente todas as parcelas localizadas a *posteriori*, ou seja, em datas futuras, descontadas com uma taxa de juros e somadas à primeira parcela, localizada na data zero, e que representa o investimento inicial (DUARTE, 2019). Para isso, deve-se utilizar a TMA como taxa de juros.

Quando o VPL é negativo, considera-se que o investimento não atende às expectativas sob o ponto de vista econômico, por apresentar uma rentabilidade inferior à apresentada pela alternativa de referência. Contudo, se for positivo o projeto se torna viável economicamente e o investidor irá obter ganhos financeiros considerando seu aporte inicial e todas as parcelas que porventura o investidor pagará ou receberá. O VPL pode ser calculado através da Equação 7:

$$VPL = \sum_{j=1}^n \left(\frac{fc_j}{(1 - TMA/100)^j} \right) - fc_0 \quad (7)$$

Onde:

TMA = Taxa Mínima de Atratividade, utilizada como taxa de juros (%);

j = Período do fluxo de caixa, variando de 1 a n ;

fc_j = Fluxo de caixa no período j ;

fc_0 = Fluxo de caixa no período 0, ou seja, investimento inicial.

3.5.2 Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de juros que iguala o valor presente das parcelas futuras do fluxo de caixa ao investimento inicial, ou seja, iguala o VPL a zero. Ela é utilizada amplamente por investidores para determinar se devem ou não investir em um determinado ativo (DUARTE, 2019). Esse método pode ser aplicado à avaliação da viabilidade econômica da microgeração hidrelétrica, uma vez que a TIR representa a rentabilidade do projeto, permitindo uma comparação direta com a TMA. O cálculo da TIR é apresentado na Equação 8:

$$fc_0 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{fc_j}{(1 - TIR/100)^j} \right) \quad (8)$$

Onde:

TIR = Taxa Interna de Retorno ou rentabilidade do investimento (%);

j = Período de fluxo de caixa, variando de 1 a n ;

fc_j = Fluxo de caixa no período j ;

fc_0 = Fluxo de caixa no período 0, ou seja, investimento inicial.

Se o valor obtido para a TIR for maior que a TMA, entende-se que o projeto em análise é viável economicamente.

3.5.3 Método do Tempo de Recuperação do Capital - *Payback* Descontado

O método do Tempo de Recuperação do Capital, conhecido também como método do *payback* descontado informa quando se dará a recuperação do capital inicialmente investido considerando o custo do dinheiro no tempo. O *payback* é obtido por meio da comparação do valor do investimento inicial com o valor presente de cada parcela futura (composta pelas receitas e custos associados), descontada por meio da TMA (DUARTE, 2019). Enquanto essa comparação apresentar um valor negativo, o somatório das receitas é inferior ao investimento inicial e demais custos. A partir do momento em que esse somatório passa a ser positivo, o projeto começa a produzir renda, sendo viável economicamente.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Considerações Iniciais

Com a finalidade de quantificar os ganhos econômicos referentes à implantação de um sistema de microgeração hidrelétrica, torna-se necessário considerar todos os aspectos apresentados no capítulo anterior, em especial o levantamento do potencial hidráulico no local, a escolha do conjunto turbina-gerador e a quantificação dos custos e benefícios associados. É necessário também considerar que esse estudo de caso se insere no contexto da autoprodução de energia elétrica, ou seja, trata-se de um estudo relacionado com a redução da dependência de uma unidade consumidora rural, com relação à energia elétrica fornecida pela concessionária de distribuição. Com isso, o objetivo é analisar a implantação de um sistema de microgeração hidrelétrica *on-grid*, mas sem considerar em princípio, os benefícios do sistema de compensação de energia.

Para a avaliação econômica foi definido um período de 20 anos como vida útil do projeto. Foram aplicados os métodos do VPL, da TIR e do *Payback*, para uma TMA de 8,23 % a.a., que é a rentabilidade do tesouro pré-fixado para 2024 (BANCO DO BRASIL, 2021). Além disso, para a obtenção dos resultados, foram consideradas situações distintas quanto ao suprimento do consumo, visando verificar os efeitos da utilização plena e do superdimensionamento do sistema de microgeração.

Para a quantificação da receita advinda do sistema de microgeração (redução da dependência com relação à concessionária) considerou-se um crescimento anual da tarifa, baseado no histórico de reajustes da ANEEL nos últimos 10 anos, o que resultou em um reajuste médio de 5,7 % a.a. (ANEEL, 2020). Para o primeiro ano, foi considerado o preço da energia praticado pela concessionária local, a Cooperativa de Prestação de Serviços e de Energia Esteves Junior (CEREJ), no valor de 0,61 R\$/kWh.

Trento, São João Batista, Canelinha, Antônio Carlos, Tijucas, Porto Belo, Bombinhas e Governador Celso Ramos, Itapema e Biguaçu. Na Figura 20 é possível verificar a abrangência dessa bacia hidrográfica (BRENIVIDA, 2001).

Figura 20 - Bacia hidrográfica do rio Tijucas



Fonte: Brenivida (2001).

O curso d'água escolhido para o estudo de implantação da μ CH é um afluente do Rio Boa Esperança, rio esse que corta o interior do município, apresentando uma configuração adequada para a implantação desse tipo de sistema. A Figura 21 apresenta detalhes da localização.

Figura 21 - Localização exata do córrego



Fonte: Google Maps (2021).

4.3 Medição da Vazão Volumétrica

Para a medição da vazão volumétrica do córrego em estudo, primeiro foi medida a velocidade de escoamento livre por meio do método do Flutuador, descrito na subseção 3.4.2. Na Figura 22 apresentam-se detalhes da estrutura e área de influência para realização das medições de velocidade da água. Para obter os valores, cronometrou-se o tempo gasto para que o flutuador percorresse a distância de 6 (seis) metros, definida entre o ponto montante e a jusante, conforme recomendações já apresentadas.

Figura 22 - Delimitação da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Utilizou-se uma pequena esfera de isopor como flutuador para realizar as medições. Foram realizadas vinte medições e os valores máximos e mínimos encontrados foram excluídos para a estimativa da velocidade média. Na Tabela 1, são apresentados os valores de tempo medidos.

Tabela 1 - Valores medidos em campo com o flutuador de isopor

	Tempos (s)		Tempo (s)	
1	4,86	11	5,09	
2	4,18	12	5,55	
3	5,53	13	5,63	
4	5,25	14	5,16	
5	5,66	15	5,29	
6	4,85	16	5,49	
7	5,18	17	5,02	
8	4,89	18	5,19	
9	5,82	19	5,98	
10	5,52	20	4,00	

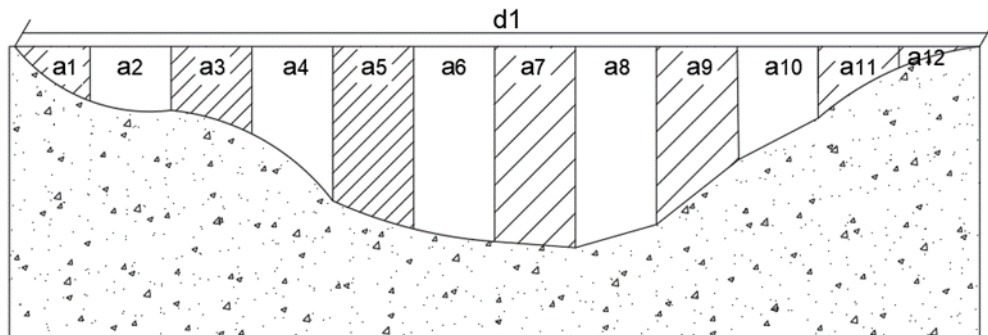
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

O tempo médio foi de 5,19 segundos e com base nesse valor foi determinada a velocidade do flutuador, que é igual a distância entre as seções dividida pelo tempo médio de travessia do objeto, conforme a Equação 9:

$$v = \frac{6}{5,19} = 1,15 \text{ m/s} \quad (9)$$

Para o cálculo da área da seção transversal total do curso d'água, realizou-se o somatório das subseções a1, a2, a3, a4, a5, a6, a7, a8, a9, a10, a11 e a12, conforme ilustrado na Figura 23, considerando o comprimento medido para cada vertical (fronteira entre as subseções) e uma distância de 0,2167 m entre as verticais. Nas margens considerou-se a área como sendo a aproximação da área de um triângulo. Na Tabela 2 são apresentadas as medições realizadas em campo.

Figura 23 - Modelagem da área transversal total do curso d'água



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Tabela 2 - Somatória da área de cada subseção

Ano	Profundidade (m)	Largura (m)	Área (m ²)
a1	0,146	0,2167	0,0158
a2	0,184	0,2167	0,0399
a3	0,234	0,2167	0,0507
a4	0,413	0,2167	0,0895
a5	0,488	0,2167	0,1057
a6	0,523	0,2167	0,1133
a7	0,557	0,2167	0,1207
a8	0,514	0,2167	0,1114
a9	0,412	0,2167	0,0893
a10	0,193	0,2167	0,0209
a11	0,08	0,2167	0,0173
a12	0,03	0,2167	0,0033
Total		2,6004	0,7778

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Uma vez obtida a velocidade média do fluido e a área transversal total, calculou-se a vazão volumétrica do curso d'água, conforme Equação 10:

$$Q_t = 1,15 \cdot 0,77 = 0,89 \text{ m}^3/\text{s} \quad (10)$$

4.4 Medição da Altura de Queda Bruta

Para determinar a altura de queda do córrego em estudo, foi utilizado o método da mangueira de nível, conforme apresentado na subseção 3.4.3. Primeiramente foi alinhado o nível no local escolhido para implantação do sistema,

com base na lâmina de água da barragem a montante do córrego, conforme ilustrado na Figura 24. Após esse procedimento com o auxílio de um equipamento de medida, foi determinada a altura de queda.

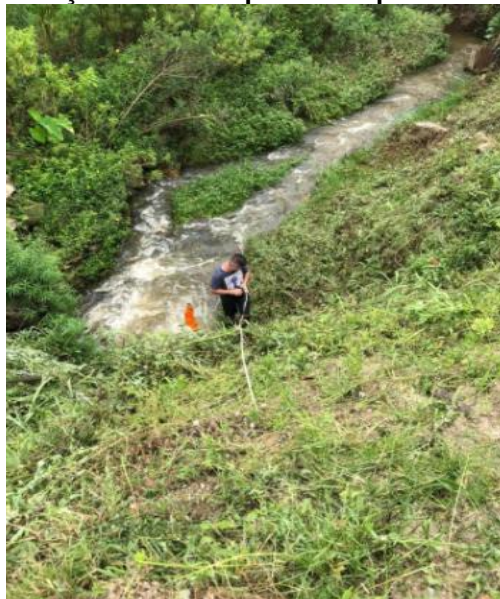
Figura 24 - Barragem a montante do local de instalação



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

A altura aproveitável da instalação da barragem a montante até o local determinado para a instalação do sistema é de 4,5 metros. Na Figura 25 apresentam-se as condições topográficas do local.

Figura 25 - Medição altura de queda do aproveitamento hídrico

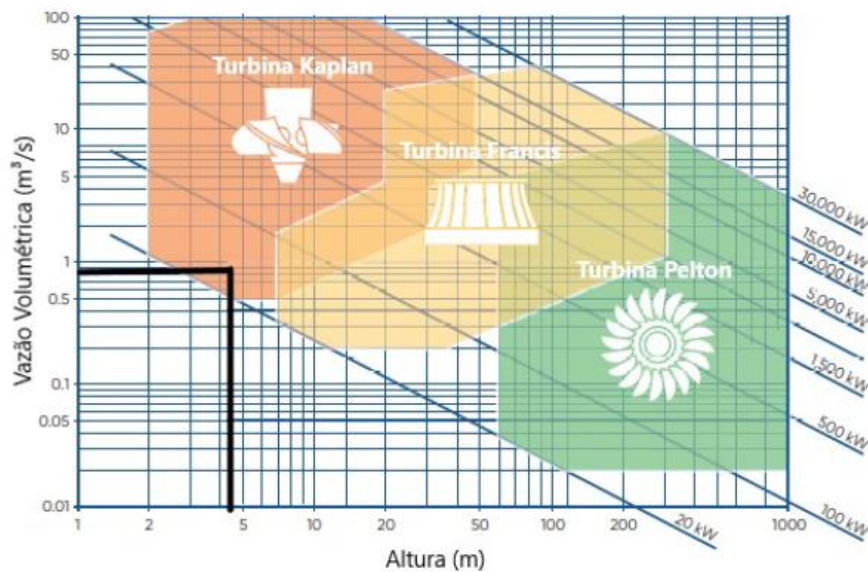


Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

4.5 Definição do Conjunto Turbina-Gerador

De acordo com Rocha (2008), por meio dos parâmetros gráficos de vazão volumétrica e altura de queda coletadas em campo é possível selecionar a turbina que melhor se adequa no aproveitamento hídrico. Nesse caso, da análise gráfica, conforme representado na Figura 26, optou-se pela turbina Kaplan.

Figura 26 - Domínio dos diferentes tipos de turbinas hidráulicas



Fonte: adaptado de Andritz (2021).

A próxima etapa foi determinar o fornecedor da microturbina Kaplan, que neste caso foi o fabricante *CHENGDU Forster Technology Co, Ltda*, localizado em *Sichuan* na China. A escolha da turbina por meio do catálogo do fabricante foi determinada com base nas características técnicas disponíveis no aproveitamento hidráulico e também por oferecer uma solução completa na configuração em “skid” com o gerador elétrico acoplado à turbina. Na Figura 27, é apresentada a configuração do conjunto turbina-gerador.

Figura 27 - Turbina modelo balde ajustável



Fonte: Foster (2021);

Segundo o fabricante, a turbina pode ser de dois tipos, lâmina fixa e o modelo balde ajustável, possuindo regulador equipado, tornando possível o controle da potência e da velocidade no painel de controle. Em termos de operação, esse tipo de turbina pode operar conectada (*on-grid*) ou desconectada da rede de distribuição (*off-grid*), com sistema de controle totalmente automático (FORSTER, 2021). A eficiência da turbina Kaplan pode chegar a 97 %, destacando ainda que a fabricação é personalizada de acordo com a frequência e a tensão de operação da região na qual será implantada. Para o estudo de caso foi considerado o tipo “balde ajustável”, pois apresenta maiores vantagens em termos de operação e instalação. Na Tabela 3 são apresentados os principais parâmetros do sistema gerador.

Tabela 3 - Informações técnicas do conjunto turbina-gerador

Marca Comercial	Forster
Tipo de saída	AC Trifásico
Tamanho	Pequena
Modelo	Hidrogerador vertical
Suporte de rolamento	Tipo guarda-chuva
Altura de queda	3 m a 6 m
Fluxo de água	0,51 m ³ /2 a 0,93 m ³ /s

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Conforme a Figura 28, e de acordo com as características técnicas do local em estudo, optou-se pela configuração que utiliza o modelo ZD760-LM-40=+10° para a turbina, acoplada ao modelo SF18-6 / 368 para o gerador, com potência mecânica fornecida pela turbina de 23,9 kW e potência elétrica fornecida pelo gerador de 18 kW.

Figura 28 – Especificações técnicas do fabricante Forster

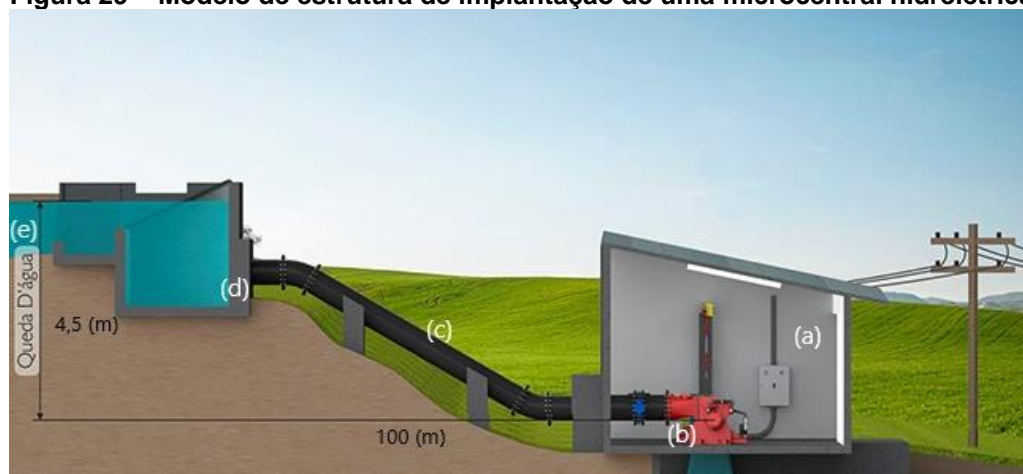
Dados de desempenho e tabela de suporte para escolha do conjunto-gerador										
Modelo	Parâmetros da turbina				Parâmetros do gerador					
	Altura de Queda (m)	Vazão Volumétrica (m³/s)	Potência (kW)	Velocidade de projeto (r/min)	Modelo	Potência (kW)	Tensão (V)	Corrente nominal (A)	Velocidade nominal (r/min)	Velocidade da via corrida (r/min)
ZD760-LM-40=10°	2,9	0,57	13,2	724	SF-10-8/368	10			750	1500
	3,4	0,62	16,8	784	SF-12-8/368	12			750	1500
	4,3	0,69	23,9	880	SF-18-6/368	18			1000	2000
	5	0,77	30,7	1000	SF-26-6/423	26			1000	2000
	5,5	0,78	34,6	997	SF-26-6/423	26			1000	2000
	6	0,82	39	1041	SF-40-6/423	40			1000	2000

Fonte: Adaptado de Foster (2021)

O arranjo da estrutura para a implantação da microgeração foi condicionado pelos aspectos topográficos e geotécnicos da propriedade rural. Na Figura 29, apresenta-se um croqui da configuração do projeto, contemplando uma barragem a montante da queda, a tomada d'água, o canal de adução, a casa de máquinas e o conjunto turbina-gerador.

O canal de adução é constituído por uma estrutura convencional, incorporando a tomada d'água na barragem já existente no local. A casa de máquinas localiza-se a uma distância de 100 metros da barragem, com uma altura de queda de 4,5 metros. Nessa configuração, o conjunto turbina-gerador fica em um local seguro e protegido para a produção de energia elétrica.

Figura 29 – Modelo de estrutura de implantação de uma microcentral hidrelétrica



Fonte: Adaptado de Betta (2021).

(a) Casa de máquinas; (b) Conjunto turbina-gerador; (c) Canal de adução; (d) Tomada d'água; (e) Barragem.

4.6 Estimativa da Energia Gerada

As centrais hidrelétricas em condições operativas ideais podem produzir energia constantemente em todos os dias do ano. No entanto, as condições operativas ideais podem ser interrompidas provisoriamente devido às atividades de manutenção ou a fatores externos, como por exemplo, períodos de seca.

Surge então a definição do fator de capacidade que relaciona a energia produzida por uma central geradora, em um período de tempo específico, com a máxima energia que pode ser produzida nesse mesmo período. A Equação 11 apresenta como é calculado o fator de capacidade.

$$F_c = \frac{\text{energia produzida no período}}{\text{energia máxima produzida no período}} \cdot 100 \quad (11)$$

O fator de capacidade médio das usinas hidrelétricas está próximo de 57% (DOUBE *et al.*, 2009). A estimativa de energia anual produzida pela microcentral hidrelétrica é obtida conforme a Equação 12, a seguir.

$$E_a = P_n \cdot \frac{F_c}{100} \cdot t = 18 \cdot 0,57 \cdot 8.640 = 88.646,4 \text{ kWh} \quad (12)$$

Onde:

E_a = energia anual produzida (kWh);

P_n = potência nominal da microcentral (kW);

F_c = fator de capacidade (%);

t = número de horas em um ano (horas).

4.7 Estimativa para Investimento Inicial e para o Custo de Operação e Manutenção

O custo para a implantação da microcentral foi avaliado em blocos separados, conforme Tabela 4. Os custos com mão de obra, material para a instalação do conduto forçado (canal de adução) e construção da casa de máquinas, foram estimados por meio de consulta a empreiteiros que atendem a região da grande

Florianópolis. O custo do conjunto turbina-gerador foi estimado em consulta ao site do fabricante, que informa o valor de US\$ 12.000,00 dólares. Para a conversão desse valor para a moeda brasileira, considerou o cambio de R\$ 5,50/US\$ (BANCO DO BRASIL, 2021). Os custos com logística, serviços de engenharia, licenciamento ambiental, painéis elétricos e miscelâneas foram obtidos da empresa ENGIE SOLUÇÕES S.A..

Tabela 4 – Estimativa de custos para a implantação da µGH

Ítem	Custo Estimado (R\$)
Equipamentos de Geração	
Conjunto Turbina/Gerador/Regulador	66.000,00
Painéis	5.000,00
Estruturas Diversas	
Barragem (*)	-----
Canal de Adução	25.000,00
Casa de Máquinas	15.000,00
Materiais Elétricos e Mecânicos	
Materiais Elétricos	4.600,00
Materiais Mecânicos	5.000,00
Demais Serviços	
Engenharia e Mão de Obra	22.000,00
Importação	6.000,00
Licenciamento Ambiental	4.000,00
Fretes	8.000,00
Instalações Elétricas	4.000,00
Instalações Mecânicas	5.000,00
Total	169.600,00

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

(*) Já existente.

Esse tipo de sistema exige manutenções preventivas e corretivas ao longo da vida útil. Contudo, o valor do custo de operação e manutenção pode variar de acordo com as características dos equipamentos e mão de obra local (CANDIDO; SANTOS, 2012). Com base no exposto na seção 3.5, considerou-se, nesse estudo, um custo anual de operação e manutenção estimado em 5 % do investimento inicial.

4.8 Análise Econômica para Implantação da Microgeração Hidrelétrica

Para a análise econômica do projeto de microgeração hidrelétrica, considerou-se inicialmente um consumo de energia em uma instalação elétrica rural trifásica, igual à energia gerada. Ou seja, considerou-se que, com a microgeração, foi alcançada a autossuficiência quanto ao suprimento de energia elétrica. Nesse caso, tem-se um consumo mensal igual a 7.387,2 kWh, o que equivale a um consumo anual de 88.646,4 kWh. Nessas condições, apresenta-se na Tabela 5, o fluxo de caixa do projeto, em base anual, levando em conta as considerações apresentadas na seção 3.5, no que diz respeito ao investimento inicial, custo de operação e manutenção e receita com a redução do consumo de energia elétrica proveniente da concessionária.

Tabela 5 - Fluxo de caixa do projeto de microgeração hidrelétrica

Período	Investimento Inicial (R\$)	Custo O & M (R\$)	Receita com a Microgeração	Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	VPL Acumulado
0	169.600,00			-169.600,00	-169.600,00
1		8.480,00	53.342,30	44.862,30	-128.149,10
2		8.480,00	56.382,82	47.902,82	-87.254,53
3		8.480,00	59.596,64	51.116,64	-46.934,64
4		8.480,00	62.993,64	54.513,64	-7.205,01
5		8.480,00	66.584,28	58.104,28	31.921,39
6		8.480,00	70.379,59	61.899,59	70.433,90
7		8.480,00	74.391,22	65.911,22	108.324,00
8		8.480,00	78.631,52	70.151,52	145.585,11
9		8.480,00	83.113,52	74.633,52	182.212,42
10		8.480,00	87.850,99	79.370,99	218.202,70
11		8.480,00	92.858,50	84.378,50	253.554,17
12		8.480,00	98.151,43	89.671,43	288.266,37
13		8.480,00	103.746,06	95.266,06	322.340,02
14		8.480,00	109.659,59	101.179,59	355.776,90
15		8.480,00	115.910,18	107.430,18	388.579,74
16		8.480,00	122.517,06	114.037,06	420.752,14
17		8.480,00	129.500,54	121.020,54	452.298,47
18		8.480,00	136.882,07	128.402,07	483.223,79
19		8.480,00	144.684,34	136.204,34	513.533,76
20		8.480,00	152.931,35	144.451,35	543.234,57

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados da análise econômica do projeto, o que permite constatar a viabilidade econômica do mesmo, com um VPL positivo e uma TIR cujo valor é superior à TMA considerada.

Tabela 6 - Resultado da avaliação econômica do projeto

VP dos Custos da Energia sem a Microgeração	(R\$)	805.591,78
VP dos Custos da Energia com a Microgeração	(R\$)	10.905,24
VP dos Custos de O & M	(R\$)	81.851,97
VP do Investimento Inicial e dos Custos de O & M	(R\$)	251.451,97
VP das Receitas com a Microgeração	(R\$)	794.686,54
VPL	(R\$)	543.234,57
TIR	(% a.a)	32,71
Payback	(anos)	4,18

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

VP - Valor Presente; VPL - Valor Presente Líquido; TIR - Taxa Interna de Retorno.

A autossuficiência no suprimento de energia elétrica, com o sistema de microgeração sendo utilizado na sua plenitude, torna obrigatório o pagamento apenas do consumo mínimo faturável de 100 kWh. Com isso, obtém-se uma significativa receita proveniente da redução dos custos com a energia elétrica, compensando o investimento inicial e os custos de operação e manutenção e resultando na viabilidade econômica do projeto (VPL positivo e $TIR > TMA$).

Deve-se destacar que em um primeiro momento, considera-se um cenário de evolução da tarifa de energia elétrica. Quando se considera um cenário de tarifa constante, as receitas continuam garantindo a viabilidade do projeto, porém com valores menores de VPL e TIR (R\$ 263.426,86 e 26,2 %, respectivamente).

4.9 Análises Adicionais

Nas análises que se seguem, os conceitos da Matemática Financeira continuam sendo utilizados, com o objetivo de obter informações adicionais referentes à viabilidade econômica do projeto de microgeração hidrelétrica.

4.9.1 Microgeração sem Autossuficiência

Diferentemente da análise feita na seção anterior, considera-se aqui que a microgeração hidrelétrica não permite o alcance da autossuficiência em termos de suprimento de energia elétrica. Na Tabela 7 são apresentados os resultados da análise econômica do projeto, considerando o atendimento de 75 % do consumo.

Tabela 7 - Resultado da avaliação econômica do projeto, sem autossuficiência

Suprimento do Consumo	(%)	75
Consumo Anual de Energia Elétrica	(kWh)	118.195,2
Produção Anual de Energia Elétrica	(kWh)	88.646,4
Consumo Anual de Energia Elétrica da Concessionária	(kWh)	29.548,8
VPL	(R\$)	554.139,82
TIR	(% a.a)	33,14
Payback	(anos)	4,12

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

De modo semelhante ao que foi observado na seção 4.8, a microgeração hidrelétrica continua sendo utilizada na sua plenitude, proporcionando a receita necessária para viabilizar o projeto.

4.9.2 Microgeração Superdimensionada

Na sequência, são apresentados os resultados da análise econômica, considerando que o sistema foi superdimensionado. Em outras palavras, considerou-se nesse caso que o sistema supre 100 % do consumo, sem utilizar a capacidade plena de geração.

Tabela 8 - Resultado da avaliação econômica do projeto, com autossuficiência sem utilizar capacidade plena

Capacidade de Geração Utilizada	(%)	75	50	25
Consumo Anual de Energia Elétrica	(kWh)	66.484,8	44.323,2	22.161,6
Capacidade Anual de Geração de Microgeração	(kWh)	88.646,4	88.646,4	88.646,4
VP do Investimento Inicial e dos Custos de O & M	(R\$)	251.451,97	251.451,97	251.451,97
VP das Receitas com a Microgeração	(R\$)	593.288,60	391.890,65	190.492,71
VPL	(R\$)	341.836,63	140.438,69	-60.959,26
TIR	(% a.a)	24,5	15,63	4,16
Payback	(anos)	6	10,44	----

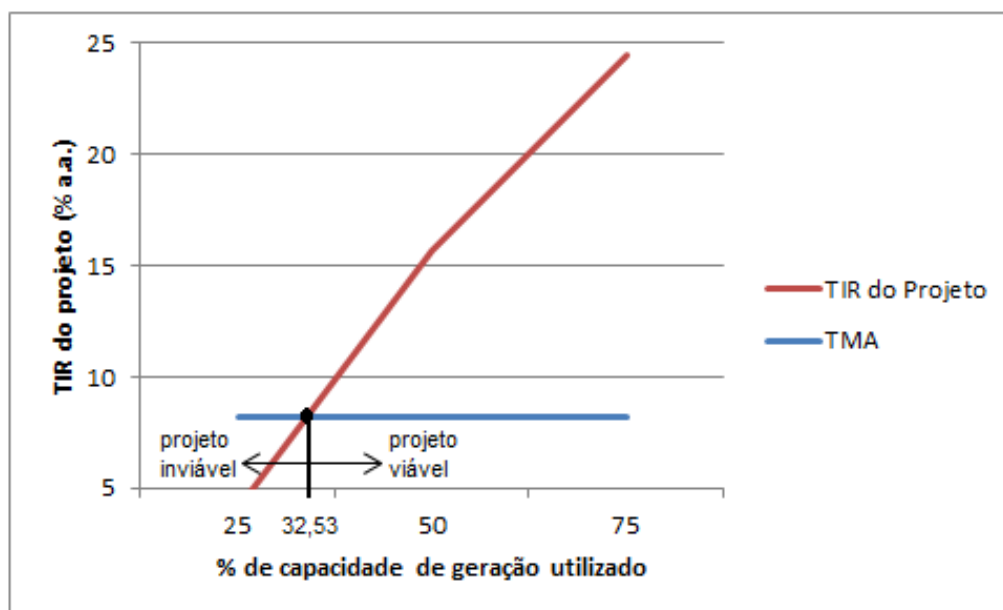
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

Como se sabe, com a autossuficiência o custo com a concessionária diz respeito apenas ao consumo mínimo faturável. Nos casos em análise, observa-se que essa autossuficiência acontece por meio do superdimensionamento da microgeração, ou seja, o investimento inicial passa a ser parcela importante do fluxo de caixa e ao mesmo tempo a receita com a autossuficiência perde importância.

O desempenho econômico do projeto diminui na medida em que o sistema passa a ser cada vez mais subutilizado, até que o mesmo se torne inviável economicamente.

Na Figura 30 apresenta-se o efeito da subutilização da microgeração sobre a TIR do projeto. Para um percentual de utilização da capacidade de geração em torno de 32,53 %, o projeto apresenta uma TIR igual à TMA. Quando o percentual de utilização passa a ser inferior a esse valor, constata-se a inviabilidade econômica do projeto, com uma TIR inferior à TMA. No entanto deve-se considerar que tal análise não deve ser conclusiva, já que os excedentes de geração poderão ser utilizados no sistema de compensação de energia, o que não está sendo considerado nesse estudo de caso.

Figura 30 - Variação da TIR do projeto em função da variação do percentual de utilização da microgeração



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021).

4.9.3 Análise de Sensibilidade Quanto ao Investimento Inicial e ao Custo de O&M

Nesse ponto, foram consideradas, por meio da análise de sensibilidade, as incertezas relacionadas com a quantificação do investimento inicial e do custo anual de operação e manutenção. Inicialmente, considerou-se a situação para a qual a microgeração atende 100 % do consumo da instalação rural, cujos resultados são apresentados na seção 4.8, estabelecendo-se um aumento de 100 % no investimento inicial, mantendo-se o custo anual de operação e manutenção no valor de R\$ 8.480,00.

Esse aumento significativo no investimento inicial, embora tenha diminuído o desempenho econômico do projeto, não foi suficiente para causar a sua inviabilidade econômica, com um VPL igual a R\$ 373.634,57, uma TIR igual a 18,05 % a.a. e um *Payback* igual a 8,66 anos.

Na sequência, considerando-se também a situação apresentada na seção 4.8, o investimento inicial foi mantido constante no valor de R\$ 169.600,00 e a análise de sensibilidade passou a considerar um aumento no custo anual de operação e manutenção. Nesse caso, observou-se que o projeto só se torna inviável economicamente, quando o custo anual de operação e manutenção representar um

percentual de 38,2 % do investimento inicial, o que resulta em um significativo custo anual de R\$ 64.787,20, com VPL igual a – R\$ 262,47 e TIR igual a 8,22 % a.a..

Os resultados da análise de sensibilidade demonstram a robustez econômica do projeto de microgeração hidrelétrica, levando-se em conta, na prática, que os aumentos no investimento inicial e no custo de operação e manutenção que foram considerados, dificilmente serão verificados.

4.10 Considerações Gerais Sobre os Resultados

Os resultados apresentados nas seções anteriores permitem observar os reais benefícios econômicos da microgeração hidrelétrica, quando a capacidade de geração, considerando o fator de capacidade do sistema, é utilizada de forma plena, uma vez que as receitas geradas são significativas e representam a parcela mais importante do fluxo de caixa. Tais receitas são bem mais significativas que os custos (investimento inicial e custo de operação e manutenção), mesmo nas situações em que se consideram aumentos substanciais dos mesmos.

As análises adicionais, envolvendo aumentos no investimento inicial e no custo de operação e manutenção foram necessárias, diante das incertezas relacionadas com a quantificação dessas duas parcelas do fluxo de caixa do projeto.

Além disso, o superdimensionamento do sistema tende a inviabilizar o projeto, a menos que os excedentes de geração sejam utilizados para a obtenção de vantagens econômicas, proporcionadas, por exemplo, pelo sistema de compensação de energia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A geração de energia elétrica por meio de microcentrais hidrelétricas pode se apresentar como uma solução viável para o suprimento do consumo no meio rural, considerando os recursos hídricos disponíveis. Além de ser sustentável, esse modelo de geração proporciona uma série de benefícios operacionais e econômicos, para o sistema elétrico, como por exemplo, a redução das perdas nas linhas de transmissão e redes de distribuição, a melhoria do perfil de tensão e a postergação dos investimentos necessários para a ampliação do sistema, bem como para o consumidor, pela redução da dependência com relação ao suprimento proveniente da concessionária de distribuição.

Diante da importância do tema, esse trabalho buscou a realização de um estudo criterioso, com o objetivo de avaliar técnica e economicamente a viabilidade da implantação de uma microcentral hidrelétrica em uma propriedade rural. Desse modo, verificou-se a necessidade da aplicação de metodologias disponíveis na literatura, para determinar o potencial hidráulico do local, seguido do dimensionamento do conjunto turbina-gerador e da definição da configuração geral para o sistema, buscando opções oferecidas pelo mercado.

A análise técnica foi seguida pela análise de viabilidade econômica, com base no levantamento dos custos e da receita associados ao projeto, aplicando métodos de análise amplamente conhecidos. Como resultado dessa análise e considerando situações distintas de atendimento ao consumo da unidade consumidora, destaca-se a necessidade de utilização do sistema de forma plena e a robustez econômica do mesmo, considerando aumentos expressivos no investimento inicial e no custo de operação e manutenção.

Considerando o valor elevado para a implantação do sistema, se faz necessário tomar os cuidados possíveis para a redução das incertezas referentes ao levantamento do potencial hidráulico, necessário para o dimensionamento do sistema. Isso contribui para a redução das incertezas quanto ao desempenho econômico do projeto e facilita a tomada de decisão no que diz respeito à implantação do sistema.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se:

- a) Complementar o estudo realizado nesse trabalho, com a consideração da possibilidade de utilizar o sistema de compensação de energia como uma vantagem econômica adicional;
- b) Comparar, sob o ponto de vista econômico, a microgeração hidrelétrica com a geração eólica e/ou solar, considerando condições idênticas de atendimento ao consumo da unidade consumidora ou realizar um estudo referente a um sistema híbrido de geração, aproveitando também os potenciais eólico e/ou solar do local, sendo que nesse caso, o desafio seria encontrar a participação ótima de cada tipo de geração.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **BR 6445/87** – Turbinas Hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação. 29 set. 2013.
- ALVES, G. M. **Avaliação da viabilidade de implantação de uma microcentral hidrelétrica, para atender consumidores localizados em regiões isoladas**. 2007. Dissertação (doutorado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho", Botucatu, 2007.
- ALTERIMA. **Alterima - Geradores de energia elétrica - Micro Usina**. Disponível em: <https://www.alterima.com.br/solucoes/3/micro-usina>. Acesso em: 16 ago. 2021.
- ANDRITZ. **ANDRITZ Hydro**. Disponível em: <https://www.andritz.com/hydro-en#>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil** 2002. p. 153, 2002.
- ANEEL. Energia Hidráulica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**, p. 49–61, 2008.
- ANEEL. Cadernos Temáticos ANEEL. **Mini e Microgeração Distribuída – Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. ANEEL. Brasília, 2014.
- ANEEL. **Relatório Evolução das Tarifas Residenciais**, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>. Acesso em: 6 abr. 2021
- ANEEL. **Produtor independente de energia elétrica - PIE**. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/busca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_returnToFullPageURL=%2Fweb%2Fguest%2Fbusca&_101_assetEntryId=15053843&_101_type=content&_101_groupId=6568. Acesso em: 4 ago. 2021.
- ANEEL. Resolução normativa. **Nº 482**. v. 66, p. 37–39, 2012.
- ANEEL. **Cadernos Temático ANEEL**. 2016.
- ARAUJO, M. A. de. **Prospecção de parques hidrocinéticos: comparação entre projetos preliminares nos rios Iguaçu e Paraná**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Energia) - Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/89087450/tcc-marcos-aurelio-de-araujo>. Acesso em: 6 abr. 2021.
- BANCO DO BRASIL. **Página Inicial - Você | Banco do Brasil**. Disponível em: https://www.bb.com.br/pbb/pagina-inicial#/. Acesso em: 6 abr. 2021.
- BETTA. **Betta Hidroturbinas aposta em microcentral hidrelétrica com**

controlador programável - InfraRoi. Disponível em: <http://infraroi.com.br/betta-hidroturbinas-aposta-em-microcentral-hidreletrica-com-controlador-programavel/>. Acesso em: 19 ago. 2021.

BOEIRA, S. M. **Estudo da dinâmica territorial rural: a implantação da Usina Hidrelétrica Barra Grande no Planalto Sul Catarinense.** 2006. Dissertação (mestrado em agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BONIFÁCIO, M. C.; FREIRE, R. Comparação De Três Métodos Para a Medição Da Vazão E Velocidade Aplicados Em Dois Cursos D'Água Da Bacia Do Ribeirão Maringá. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 9, n. 2, 2013.

BORGES NETO, M. R.; CARVALHO, P. **Geração de energia elétrica.** São Paulo: Abdr, 2018.

BRENIVIDA, W. W. **POR QUE PAROU?** Disponível em: <http://www.aguas.sc.gov.br/base-documental-tijucas/noticias-tijucas/item/3932-por-que-parou/3932-por-que-parou>. Acesso em: 7 fev. 2021.

CANDIDO, B. S. L.; SANTOS, F. de A. Estudo De Viabilidade Econômico-Financeira De Uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH). **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 2, p. 3–27, 2012.

CARDOSO, G. J. O. **Caracterização metrológica de modelo de turbina Pelton para laboratório didático.** p. 144, 2016. Dissertação (mestrado integrado em engenharia mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais e Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2016.

CIDADE BRASIL. **Município de Major Gercino.** Disponível em: <https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-major-gercino.html>. Acesso em: 8 fev. 2021.

COFFERRI, M. Determinação de vazão em cursos d'água através de diferentes metodologias. **Jurnal Sains dan Seni ITS**, v. 6, n. 1, p. 51–66, 2017.

DI LASCIO, M. A.; BARRETO, E. J. F. **Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira : Eletrificação de Comunidades Isoladas.** Brasília: Kaco Gráfica e Editora Ltda, 2009

DOUBE, M. et al. Plano Energetico Nacional 2030-2007. **PLoS ONE**, v. 4, n. 3, p. 324, 2009.

DUARTE, V. R. **Avaliação de risco na implantação de geração eólica utilizando análise de sensibilidade.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Técno logo em Sistemas de Energia) - IFSC, Florianópolis, 2019. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/432/TCC%20CSTSE_VICTORIA_DUARTE.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 6 abr. 2021.

ELETROBRAS. **Manual de microcentrais hidrelétricas**, 1985a.

ELETROBRAS. **Manual de pequenas centrais hidrelétricas**. São Paulo. 1985b. 344p.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para estudos e projetos**. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em 02 jun. 2019.

ELETROBRAS, C. **Diretrizes para projetos de pch da viabilidade da usina no local**. 2021.

EPE. **MATRIZ ENERGÉTICA**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 4 ago. 2021.

FARRET, Felix. **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. 3. ed. Santa Maria: UFSM, 2014. 319 p.

FORSTER. **China Low Head Low Rpm Hydro Turbine Kaplan Hydro - China Kaplan Hydro Generator, Kaplan Hydro Turbine**. Disponível em: <https://cdforster.en.made-in-china.com/product/DZYQUKkCnPVh/China-Low-Head-Low-Rpm-Hydro-Kaplan-Hydro-Turbine.html>. Acesso em: 6 abr. 2021.

GERMER, E. Capítulo 6: Turbinas. *In*: GERMER, E. **Máquinas de Fluxo**. Curitiba: UTFPR, 2015. p. 1-20.

GOLDEMBERG, J. et al. Chapter 10: Rural energy in developing countries. **World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability**, n. 10, p. 367–389, 2000.

HIDROENERGIA. **Tipos de Turbinas Hidráulicas: Conheça os principais modelos | Hidroenergia Engenharia e Automação**. Disponível em: <https://www.hidroenergia.com.br/blog/tipos-turbinas-hidraulicas/>. Acesso em: 4 ago. 2021.

IESA, 2019, **IESA hidrogeração**. Acervo Técnico.

IMA. Produção de energia hidrelétrica - Instrução normativa N°44. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., p. 1–23, 2019.

INDIAMART. **Motor de indução TEFC trifásico, classificação IP: IP23, Rs 3300 / peça | ID: 20554926755**. Disponível em: <https://www.indiamart.com/proddetail/tefc-induction-motor-20554926755.html>. Acesso em: 4 ago. 2021.

LABTIME. **Fundamentos do setor elétrico**. Disponível em: http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod3_uni2_sl7.html. Acesso em: 5 ago. 2021.

LEA. **Turbina Hidrocinética para pequenas comunidades - Aperfeiçoamento do Projeto Hidrodinâmico e Atualização do Protótipo**, relatório técnico de pesquisa do projeto. [S.l.]: ELETRONEORTE/UnB -FUB 55/2003, 2007.

LORA, E. E. S.; ADDAD, J. **Geração distribuída: aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006. 240 p.

MARCON, P. *et al.* Energy sources for an experimental electrical network: PV panel and micro-hydroelectric power plants. **IFAC Proceedings Volumes**. Velke Karlovice, v. 46, n. 28, p. 449-454, 2013.

MEC, E. *et al.* Universidade Federal do Rio de Janeiro. **Acta Botanica Brasilica**, v. 10, n. 2, p. 425–435, 1996.

MEDEIROS, D.M. *et al.* Estudo de geradores de indução na geração de energia elétrica em microcentrais hidrelétricas. **Rev. ciênc. exatas, Taubaté**, n. 2, p. 9–14, 2005.

MENDES, A. L. S. **O papel da autoprodução e produção independente de energias renováveis no mercado brasileiro de energia elétrica**. 2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional de 2018 - Relatório Final (ano base 2017)**. p. 292P., 2018.

MONTEZANO, B. **As energias solar e eólica no Brasil**. p. 69, 2013.

MULLER, A. C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

PALHARES, J. C. P. *et al.* **Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador**. EMBRAPA, Comunicado Técnico 455, Concordia – SC, 2007.

REIS, L. B. dos; SILVEIRA, S. **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Edusp, 2001. 282 p.

RIOS, F. P. *et al.* Estudo comparativo entre métodos de medição de vazão em cursos d'água. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ed. 19, p. 1–12, 2011.

ROCHA, J. P. **Metodologia de projecto de sistemas de produção de electricidade descentralizadas baseados em Energia Hídrica**. 2008. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) – Universidade do Porto, Portugal, 2008.

ROSA, L. P.; SIGAUD, L.; MIELNIK, O. **Impactos de Grandes Projetos Hidrelétricos e Nucleares: aspectos econômicos e tecnológicos, sociais e ambientais**. São Paulo: Marco Zero, 1988.

SANTOS, R. C. L dos. **Análise de cavitação em uma turbina hidráulica do tipo Kaplan**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Engenharia Mecânica) Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, J. A. L. **Avaliação técnico-econômica de mini centrais hidrelétricas operando a velocidade variável utilizando conversores de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SILVA, P. Estudo de compartilhamento de carga entre múltiplas fontes renováveis compondo uma microrrede cc. **Angewandte Chemie International Edition**, p. 951–952., 2018.

SOUSA, V. J. de; SOUZA, T. M. de; CASTRO, J. N. C. de. **Encontro de Energia no Meio Rural** - Levantamento de micropotenciais hidráulicos para geração de energia elétrica e acionamento mecânico de máquinas da região de Cunha - SP. Disponível em:

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200017&script=sci_arttext#f2. Acesso em: 12 ago. 2021.

SOUZA, Z. de; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. da C. **Centrais Hidrelétricas - Implantação e Comissionamento** - 2ªed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2009.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Blücher, 1978.

TIAGO FILHO, G. L. *et al.* **Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

VEIGA, L. A. K.; FAGGION, P. L.; ZANETTI, M. A. Z. Fundamentos de Topografia - Engenharia Cartográfica e de Agrimensura Universidade Federal do Paraná. **Engenharia Cartográfica e de Agrimensura Universidade Federal do Paraná**, p. 288, 2012.

VILLAMARIM JÚNIOR, J. A. **Análise da viabilidade técnica-econômica de um sistema eólico-fotovoltaico com conexão à rede elétrica suprimindo uma estação de rádio base de telefonia celular no estado de São Paulo**. 2016. Dissertação (mestrado em sistemas de potência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

WEG. **WEG fornece conjunto turbina gerador em base única (skid) para CGH**. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/weg-fornece-conjunto-turbina-gerador-em-base-unica-skid-para-cgh>. Acesso em: 14 ago. 2021.

WMO. **Manual on Stream Gauging**. Vol 1. Fieldwork. Geneva, 2010.