

CENTRO UNIVERSITARIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG

LUCAS CARA GARCIA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA REATIVAÇÃO DE
MINICENTRAL HIDRELÉTRICA EM PROPRIEDADE RURAL**

**CASCADEL
2018**

CENTRO UNIVERSITARIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG

LUCAS CARA GARCIA

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA REATIVAÇÃO DE
MINICENTRAL HIDRELÉTRICA EM PROPRIEDADE RURAL**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor Orientador: Eng. Carlos Eduardo Goulart Ferreira.

**CASCADEL
2018**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ – FAG
LUCAS CARA GARCIA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA REATIVAÇÃO DE
MINICENTRAL HIDRELÉTRICA EM PROPRIEDADE RURAL**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Eng. Carlos Eduardo Goulart Ferreira.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Carlos Eduardo Goulart Ferreira
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Prof. Me. Eliseu Avelino Zanella Junior
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico

Prof. Rosemar Cristiane Dal Ponte
Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG

**CASCAVEL
2018**

DEDICATÓRIA

Dedicado aos meus pais, Luiz e Sandra, meus exemplos de vida.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui, meu sincero apreço ao meu orientador Eng. Carlos Eduardo Goulart Ferreira, por toda acessoria, orientação e compreensão durante a desafiante realização deste projeto.

Agradeço ao Centro Universitário Assis Gurgacz e a todos os mestres do curso de Engenharia Mecânica que compartilharam seus conhecimentos em sala de aula e acompanharam minha jornada enquanto universitário.

Sou grato a minha família, João Gueirino Cara, Márcio Luiz Cara, Marcos Cara e Darcila Cara, proprietários da área de realização do estudo, que se propuseram de disponibilidade, apoio e ambição para a efetivação do presente trabalho.

Meus sinceros agradecimentos a meu tio José Garcia, meu avô Enério Garcia, e a minha avó Tereza Garcia, por terem sido meus fiadores e contribuírem para minha formação.

Sou grato a todos os meus amigos e a minha namorada, Raysa Magro, pelo apoio, apreço, companheirismo e por sempre terem compreendido meus períodos de ausência durante o período de graduação.

Finalmente, gostaria de agradecer aos meus pais, Luiz Cesar Garcia e Sandra Cara Garcia, por todo o esforço, apoio, educação e incentivo, por sempre estarem ao meu lado e contribuírem para que este sonho se tornasse realidade.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de viabilidade econômica para reativação de minicentral hidrelétrica a fim de suprir a demanda energética de uma propriedade rural localizada no interior do município de Nova Aurora, Paraná. O alto gasto mensal com eletricidade, aliado à obrigatoriedade de uma geração alternativa de energia em propriedades destinadas a criação de alevinos associadas com cooperativas, fizeram por se considerar a reativação de uma minicentral hidrelétrica situada no presente local. O estudo teve início após a identificação da demanda energética a ser suprida na propriedade, onde foram realizados estudos topográficos e hidrológicos da área, para a determinação da queda bruta e vazão do afluente. Os dados recolhidos foram encaminhados a alguns fabricantes onde se optou pela empresa “B&G Tornearia”, a qual apresentou, de acordo com o estudo de viabilidade, a melhor solução turbina/gerador para o presente caso, com um potencial de geração de aproximadamente 161,86kW, a partir de uma turbina tipo Francis, dos quais são necessários 141,05kW para o atendimento da demanda. Conclui-se com o trabalho que é possível a partir de uma minicentral hidrelétrica suprir a demanda energética da propriedade, tornando-a autossuficiente em geração de energia.

Palavras-chave: Potencial hidrelétrico, demanda energética, turbina Francis.

ABSTRACT

This study presents an economic feasibility study for the reactivation of mini hydroelectric power stations, with the objective of supplying an energy demand of a rural property located in the interior of the municipality of Nova Aurora, Paraná. The upper use monthly with electricity, coupled with the obligation of an alternative energy alternative for an end of the association of associated with cooperatives, made to be seen at the reactivation of the hydroelectric plant situated not present local. Last year, research began on energy supra-spectroscopy, with topographic and hydrological studies of the area, for the fall of the brute force and the flow of the tributary. The data collected were forwarded to some manufacturers who opted for the company "B&G Tornearia", one of the best, according to the feasibility study, best turbogenerator / generator solution for the present case, with a generating potential of approximately 161, 86kW, from a Francis type turbine, of which 141,05kW are needed to meet demand. It concludes with the work that it is possible to start from a mini-hydropower plant supplying an energy demand of the property, making it self-sufficient in energy generation.

Keywords: Hydroelectric potential, energy power demand, Francis turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de aerador utilizado na piscicultura.....	19
Figura 2: Representação de central hidrelétrica	21
Figura 3: Componentes básicos de uma minicentral hidrelétrica	23
Figura 4: Diferença de altura entre reservatório e canal de fuga.	30
Figura 5: Coeficiente de perda de carga em função da forma da boca do conduto	33
Figura 6: Demonstração de diferentes valores de velocidade conforme o leito	36
Figura 7: Modelo de molinete hidrométrico	37
Figura 8: Método do flutuador	38
Figura 9: Medição da área transversal média.....	38
Figura 10: Componentes de uma turbina hidráulica Francis.....	41
Figura 11: Seleção do tipo de turbina	43
Figura 12: Turbina Francis caixa espiral	44
Figura 13: Demonstração de Turbina Kaplan	44
Figura 14: Turbina Pelton	46
Figura 15: Tubo de sucção	46
Figura 16: Altura de sucção H_s	47
Figura 17: Gerador síncrono marca WEG.....	48
Figura 18: Vista aérea da propriedade.....	54
Figura 19: Queda d'água.....	55
Figura 20: Localização da casa de máquinas.	59
Figura 21: Foto panorâmica da localização da casa de máquinas.....	60
Figura 22: Leito do rio.	62
Figura 23: Mangueira utilizada para medição de nível.	63
Figura 24: Gerador da casa de máquinas.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de Ka.	25
Tabela 2: Eficiência das soldas.....	26
Tabela 3: Velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação	28
Tabela 4: Coeficiente de perda de carga de acordo com as dimensões da grade	32
Tabela 5: Coeficiente variável com o ângulo de deflexão	35
Tabela 6: Velocidades de rotação em função do número de polos	45
Tabela 7: Tensão de geração econômica	50
Tabela 8: Levantamento de cargas	60
Tabela 9: Medição da profundidade do rio.....	62
Tabela 10: Tempo de deslocamento do flutuador	63
Tabela 11: Especificações técnicas da turbina-gerador.....	64
Tabela 12: Dados técnicos do gerador.....	66
Tabela 13: Fluxo de caixa do investimento proposta B&G	68
Tabela 14: Indicadores econômicos proposta B&G.....	68
Tabela 15: Fluxo de investimento proposta Flessak.....	69
Tabela 16: Indicadores econômicos proposta Flessak.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação das centrais quanto à potência e queda de projeto.....	22
---	----

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Diâmetro interno mínimo.....	25
Equação 2: Espessura da parede da tubulação.....	25
Equação 3: Pressão hidrostática interna.....	26
Equação 4: Espessura mínima da tubulação.....	26
Equação 5: Verificação da chaminé de equilíbrio.....	27
Equação 6: Diâmetro econômico.....	28
Equação 7: Carga hidráulica sobre a tubulação.....	28
Equação 8: Velocidade de escoamento.....	28
Equação 9: Queda bruta.....	30
Equação 10: Queda líquida.....	30
Equação 11: Perda de carga pelo método clássico.....	31
Equação 12: Perda de carga por aproximação.....	31
Equação 13: Perda de carga na grade.....	32
Equação 14: Perda de carga na entrada do conduto.....	33
Equação 15: Perda de carga por atrito.....	33
Equação 16: Perda de carga nas curvas.....	34
Equação 17: Perda de carga nas reduções.....	34
Equação 18: Perda de carga nas bifurcações.....	35
Equação 19: Grandeza de vazão.....	36
Equação 20: Área transversal média.....	38
Equação 21: Velocidade superficial.....	39
Equação 22: Potência nos bornes do gerador.....	39
Equação 23: Potência estimada para projetos iniciais.....	39
Equação 24: Velocidade de rotação síncrona.....	42
Equação 25: Potência do gerador.....	49
Equação 26: Cálculo do VPL.....	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM – American Society for Testing and Materials

CO2 – Dióxido de Carbono

MCH – Minicentral Hidrelétrica

NBR – Norma Brasileira

PET – Politereftalato de Etileno

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa mínima de atratividade

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	19
1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	20
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 MINCENTRAL HIDRELÉTRICA	21
2.1.1 Classificação quanto à potência e quanto à queda de projeto.....	22
2.1.2 Classificação quanto ao tipo de reservatório	22
2.1.3 Componentes básicos	23
2.1.3.1 Barragem	23
2.1.3.2 Sistema de adução	24
2.1.3.3 Tomada d'água	24
2.1.3.4 Tubulação de adução ou de baixa pressão.....	24
2.1.3.4.1 Dimensionamento do diâmetro interno mínimo.....	25
2.1.3.4.2 Espessura da tubulação de adução.....	25
2.1.3.5 Câmara de carga	27
2.1.3.6 Chaminé de equilíbrio	27
2.1.3.7 Tubulação forçada	27
2.1.3.7.1 Determinação do diâmetro econômico	27
2.1.3.7.2 Verificação da velocidade máxima admissível	28
2.1.3.8 Casa de máquinas	29
2.2 QUEDA HIDRÁULICA	29
2.2.1 Queda bruta	29
2.2.2 Queda líquida.....	30
2.2.3 Perda de carga pelo método expedito	30
2.2.4 Perda de carga pelo método clássico	31
2.2.4.1 Perda por aproximação	31
2.2.4.2 Perda na grade da tomada d'água	32
2.2.4.3 Perda de carga em conduto forçado.....	32

2.2.4.3.1 Perda de carga na entrada do conduto	32
2.2.4.3.2 Perda por atrito	33
2.2.4.4 Perda nas curvas	34
2.2.4.5 Perda de carga nas reduções cônicas	34
2.2.4.6 Perda nas bifurcações	35
2.3 VAZÃO VOLUMÉTRICA	35
2.3.1 Métodos para a medição da vazão de um rio.....	36
2.3.1.1 Método do molinete.....	37
2.3.1.2 Método do flutuador	37
2.4 POTENCIAL HIDRELÉTRICO.....	39
2.5 TURBINAS HIDRÁULICAS	40
2.5.1 Componentes de uma turbina hidráulica	40
2.5.2 Classificação das turbinas quanto a ação e reação	41
2.5.2.1 Velocidade de rotação da turbina	41
2.6 SELEÇÃO DO TIPO DE TURBINA	42
2.6.1 Turbina Francis.....	43
2.6.2 Turbina Kaplan	44
2.6.3 Turbina Pelton	45
2.6.4 Tubo de sucção	46
2.6.4.1 Altura de sucção	47
2.6.5 Volante de inércia.....	47
2.7 GERADORES	48
2.7.1 Potência nominal de geração	49
2.7.2 Rotação nominal do gerador.....	49
2.7.3 Tensão de geração	49
2.8 VIABILIDADE ECONÔMICA	50
2.8.1 Fluxo de caixa.....	51
2.8.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	51
2.8.3 Valor Presente Líquido (VPL).....	51
2.8.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)	52
2.8.5 Payback Descontado.....	52
3 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO.....	53
3.1 MATERIAIS DE SUPORTE	53
3.1.1 Plantas.....	53

3.1.2 Instrumentos de medição	53
3.2 MÉTODOS UTILIZADOS	54
3.2.1 Área de estudo	54
3.2.2 Localização da casa de máquinas	55
3.2.3 Levantamento de dados	55
3.2.3.1 Demanda energética da propriedade.....	56
3.2.3.2 Vazão disponível	56
3.2.3.3 Queda bruta	56
3.2.4 Queda líquida.....	57
3.2.5 Potencial hidrelétrico disponível	57
3.2.6 Equipamentos de geração	57
3.2.6.1 Turbina / Gerador	57
3.2.7 Tubulação forçada.....	57
3.2.8 Altura de sucção.....	58
3.2.9 Potencial hidrelétrico instalado	58
3.2.10 Viabilidade econômica de reativação	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1 LOCAL DA CASA DE MÁQUINAS	59
4.2 DEMANDA ENERGÉTICA TOTAL.....	60
4.2.1 Valor do consumo energético atual	61
4.3 LEVANTAMENTO HIDROLÓGICO.	62
4.4 QUEDA BRUTA.....	63
4.5 QUEDA DE PROJETO.....	64
4.6 POTENCIAL HIDRELÉTRICO DISPONÍVEL.	64
4.7 SELEÇÃO DA TURBINA/GERADOR.	64
4.8 VERIFICAÇÃO DO CONDUTO FORÇADO.	66
4.9 ALTURA DE SUCCÃO.	67
4.10 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	67
4.11 POTENCIAL ELÉTRICO INSTALADO.....	70
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO A – PROPOSTA COMERCIAL FLESSAK.....	75
ANEXO B – PROPOSTA COMERCIAL B&G TORNEARIA	78

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica, atualmente é o principal meio de energia utilizada pela civilização, sendo a principal fonte de força, calor e luz da atualidade, e a principal responsável pela maioria dos avanços tecnológicos alcançados até agora.

A energia elétrica é de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade atual, podendo ser convertida para gerar luz, força para movimentar motores e fazer funcionar aparelhos comuns para o conforto humano, como televisores, celulares, computadores e condicionadores de ar.

Durante o século XX, a principal fonte de transmissão de energia era feita por elementos não renováveis como carvão mineral e petróleo.

A partir dos anos 90, cientistas alertavam para os efeitos ambientais negativos gerados pelo homem e pelas indústrias, sendo o aquecimento global o pior deles, caracterizado pela grande emissão de dióxido de carbono (CO₂), principal componente resultante da extração da energia de combustíveis fósseis.

Em busca do desenvolvimento sustentável, devido o aumento da demanda energética provocado pelo aumento do consumo mundial de energia, surgiram novas formas de extração de energia baseadas em fontes renováveis, como energia solar, energia eólica (ventos), biomassa (matéria orgânica), geotérmica (calor interno da Terra) e energia hidráulica (dos rios).

O Brasil tem como principal fonte de extração energética as usinas hidrelétricas, tendo em vista seu território privilegiado, sendo banhado por uma grande quantidade de rios e recursos hídricos.

A transformação de energia hidráulica em eletricidade ocorre com base no aproveitamento da energia potencial gravitacional da água, caracterizada pela forma de geração mais barata do mundo.

Atualmente, as centrais hidrelétricas de pequeno porte vêm se destacando, devido impactarem pouco nas áreas de preservação ambiental e sobre o ecossistema.

Aliado ao fator ambiental e a baixa disponibilidade de recursos financeiros, o desenvolvimento dessa nova modalidade de projeto vem ganhando espaço, a qual possui inúmeras vantagens em relação às usinas hidrelétricas de grande porte, com menores reservatórios, possibilidade de instalação em pequenos cursos d'água e menores impactos ambientais.

Diante disso, visando cada vez mais uma geração de energia limpa e sustentável, procurou-se aproveitar os recursos hídricos locais para a geração de energia elétrica a partir de uma minicentral geradora.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho apresenta um estudo econômico de aproveitamento energético, podendo ser descrito conforme objetivos abaixo relacionados:

1.1.1 Objetivo Geral

Reativar um sistema de geração de energia elétrica a partir de uma Minicentral Hidrelétrica (MCH), na área pertencente à família Cara, localizada no distrito de Palmitópolis, no interior do município de Nova Aurora, região oeste paranaense.

Para isso, além de determinar o potencial da central geradora, será feito um estudo econômico que determinará a viabilidade de investimento no projeto.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para realizar o trabalho e alcançar seus objetivos serão necessários:

- Identificar a vazão disponível.
- Identificar a queda bruta e queda de projeto.
- Determinar a capacidade de geração de energia da Minicentral Hidrelétrica.
- Definir a demanda energética total a ser utilizada na propriedade.
- Realizar se necessário, a seleção de uma nova turbina e gerador conforme modelos disponibilizados pelos fabricantes.
- Verificar se o conduto forçado existente atende as condições de operação.
- Realizar estudo econômico para definir a viabilidade de reativação.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo para reativação da Minicentral Hidrelétrica se inicia devido à necessidade de uma fonte alternativa de energia que possa suprir a demanda energética da propriedade, que tem como principal exploração à prática da piscicultura, onde se limita a criação de peixes em tanques, mais conhecidos como açudes.

A propriedade do presente trabalho, localizada no interior do município de Nova Aurora-PR, visa como exploração à prática de piscicultura intensiva.

Na piscicultura intensiva, onde a densidade de peixes por metro cúbico é relativamente alta e, exige grande necessidade de oxigênio se comparada com a prática extensiva. A presença de recirculares de água, também chamados de aeradores, **Figura 1**, é de fundamental importância no objetivo de aumentar a incorporação deste oxigênio, (PANORAMA DA AQUICULTURA, 2008).

Devido à importância do equipamento para a sobrevivência e produção de peixes, seu elevado custo de funcionamento por conta de sua potência de trabalho, aliado a capacidade de aproveitamento hídrico da propriedade, constantes aumentos no preço da energia elétrica, da mesma forma em que cooperativas parceiras no processo de criação exigem a instalação de fontes alternativas de energia, decidiu-se elaborar um estudo de viabilidade econômico que determine uma segurança de investimento para a reativação central geradora hidrelétrica presente na propriedade.

Figura 1: Modelo de aerador utilizado na piscicultura.



(Fonte: <http://www.agricotec.net/pt-br/produtos/aeradores/aerador-de-p-quatro-ps.>)

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Se reativada, a unidade geradora suprirá a demanda total de energia elétrica consumida na propriedade?

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O presente projeto visa atender a demanda energética de uma propriedade rural voltada à prática da piscicultura, tendo como objetivo de fornecimento hidrelétrico o aproveitamento hidrológico local a partir da reativação de uma central geradora hidrelétrica.

Este estudo se volta à identificação do potencial hidrelétrico da área, assim como a verificação operacional de equipamentos utilizados anteriormente na minicentral, como gerador, que atendam as variáveis de demanda energética e potencial hidrelétrico disponível. Também serão verificadas as condições de operação dos condutos responsáveis pela condução de água até a entrada da turbina.

Os demais itens que compõem uma central geradora de energia hidrelétrica tanto como obras civis, tais como barragem, canal de adução, canal de carga, casa de máquinas, canal de fuga e equipamentos mecânicos auxiliares como comportas, grades, válvulas, chaminé de equilíbrio, e entre outros não serão abordados. Equipamentos elétricos também serão desconsiderados.

A partir da determinação da potência gerada na usina, bem como a demanda energética da propriedade, será elaborado um estudo de viabilidade econômica que determinará, ou não, a atratividade econômica do projeto.

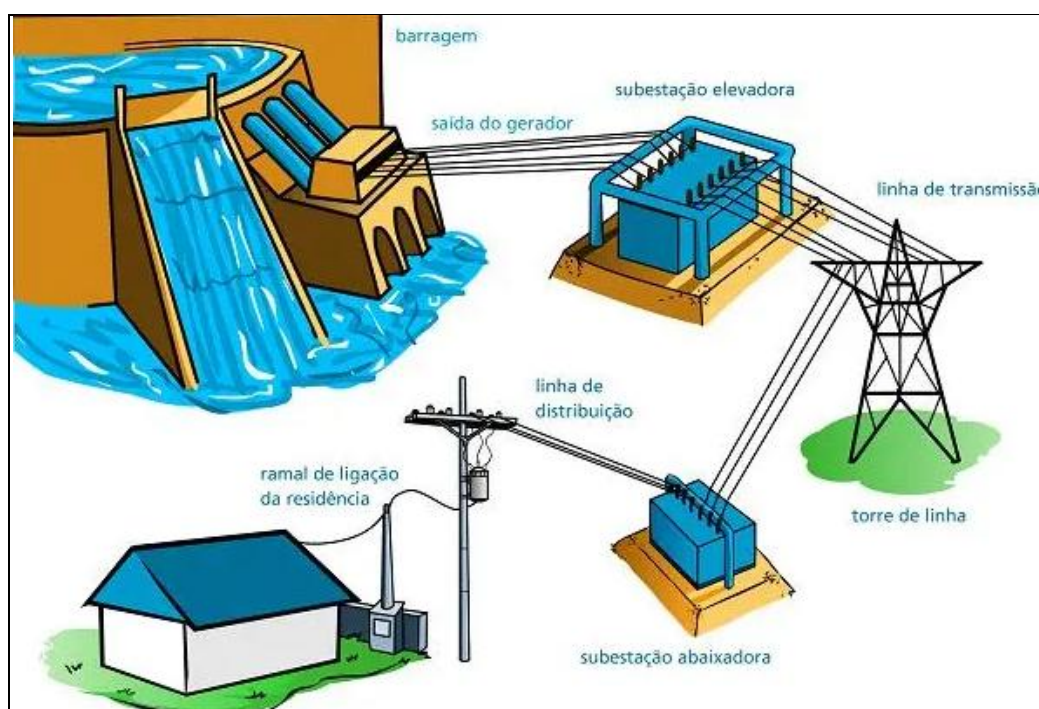
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MINICENTRAL HIDRELÉTRICA

O princípio de funcionamento de uma minicentral hidrelétrica é semelhante ao de uma grande usina hidrelétrica. Apresenta composição básica de quatro partes: barragem, sistema de adução e captação de água, casa de força e sistema de restituição de água ao leito do rio. (ALBARELLO, 2014).

Segundo o mesmo autor, a água existente no lago constituído pela barragem é conduzida através de dutos ou condutos metálicos até a casa de força. Após deslocar-se pela turbina existente na casa de força, a água retorna ao leito natural do rio através do canal de fuga. Consequentemente, a potência hidráulica é convertida em potência mecânica quando a água passa através da turbina, fazendo com que a mesma rotacione e no gerador a potência mecânica se transforme em potência elétrica. Em razão desses fatores, a energia originada é conduzida através de cabos ou barras condutoras dos terminais geradores até os transformadores de elevação, onde sua tensão é elevada para adequada condução. Finalmente, através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão aferida a níveis adequados para posterior utilização pelos consumidores, conforme representado na Figura 2.

Figura 2: Representação de central hidrelétrica.



(Fonte: <https://www.mundodaeletrica.com.br/i/269/sep-600.webp>)

2.1.1 Classificação quanto à potência e quanto à queda de projeto

Segundo o Artigo 2º da Resolução Normativa 687, de 24 de novembro de 2015, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) define microgeração para empreendimentos geradores de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 100kW e minigeração a central geradora cuja potência instalada seja maior que 100KW e menor ou igual a 3MW, para fontes hídricas, (ANEEL, 2008).

As centrais geradoras podem ainda ser classificadas quanto à potência instalada e quanto à queda de projeto, como mostrado no **Quadro 1**, considerando-se os dois parâmetros conjuntamente, uma vez que isoladamente não permite uma classificação adequada. (ELETROBRÁS, 2000).

Quadro 1: Classificação das centrais quanto à potência e queda de projeto.

CLASSIFICAÇÃO DAS CENTRAIS	POTÊNCIA - P (kW)	QUEDA DE PROJETO - H_d (m)		
		BAIXA	MÉDIA	ALTA
MICRO	$P < 100$	$H_d < 15$	$15 < H_d < 50$	$H_d > 50$
MINI	$100 < P < 1.000$	$H_d < 20$	$20 < H_d < 100$	$H_d > 100$
PEQUENAS	$1.000 < P < 30.000$	$H_d < 25$	$25 < H_d < 130$	$H_d > 130$

(Fonte: Eletrobrás, 2000).

2.1.2 Classificação quanto ao tipo de reservatório

Classificando quanto ao tipo de reservatório, divide-se em duas categorias.

- A fio d'água;
- De acumulação;

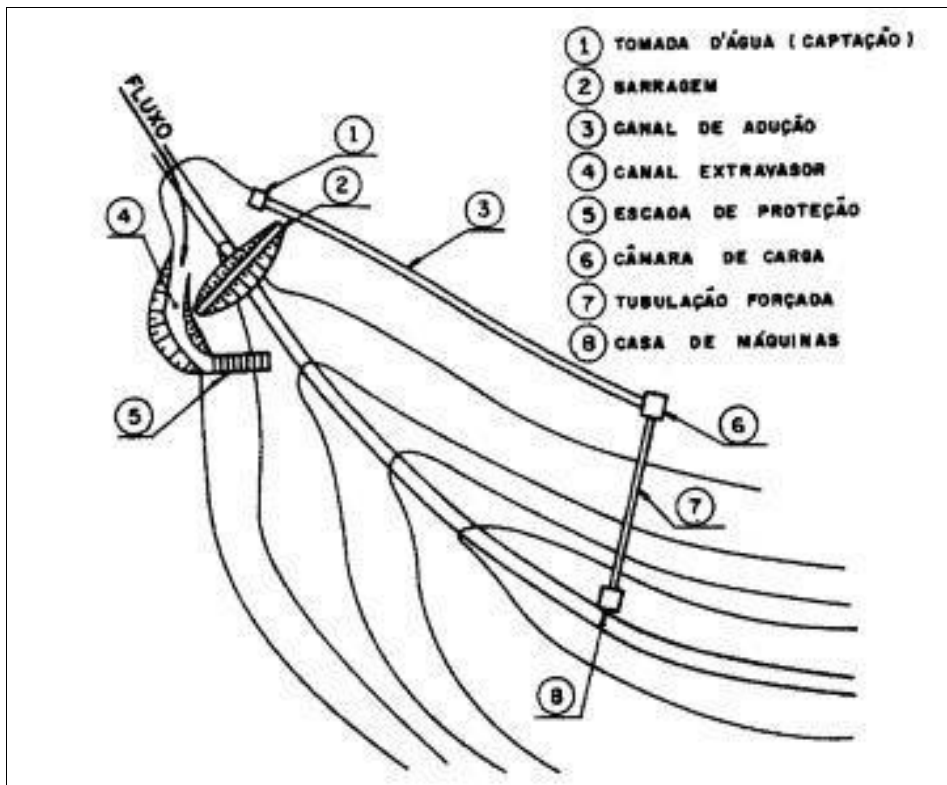
Em uma central hidrelétrica a fio d'água a captação é realizada através de uma pequena barragem, sendo esse tipo de barragem utilizada quando a vazão mínima do rio supre a demanda necessária de potência a ser instalada, desprezando o volume do reservatório.

Quando a vazão mínima do afluente não atende a demanda por potência necessária em projeto, necessita então de um reservatório, cujo objetivo é de acrescentar a descarga mínima do rio.

2.1.3 Componentes básicos

Segundo o manual de Minicentrals Hidrelétricas, Eletrobrás (2000), têm-se definidos alguns aspectos construtivos básicos presentes nas centrais, ilustrados na Figura 3.

Figura 3: Componentes básicos de uma minicentral hidrelétrica.



(Fonte: Eletrobrás, 2000).

2.1.3.1 Barragem

A barragem é a estrutura que tem a função de represar a água, visando, com a elevação do nível d'água do rio, possibilitar a alimentação da tomada d'água. No caso de locais de baixa queda, a barragem também tem a função de criar o desnível necessário à geração de energia desejada, (ELETROBRÁS, 2000).

Ainda, segundo o mesmo autor, para visar um aproveitamento de queda natural as barragens geralmente são construídas em trechos onde já existem desníveis acentuados, como por exemplo, nas cachoeiras, podendo ser construídas de diferentes formas, sendo elas de terra, terra e pedras, concreto ou pedras argamassadas.

2.1.3.2 Sistema de adução

O Sistema de adução, segundo Eletrobrás (2000), é definido como o conjunto de tubulação responsável por transportar a água da tomada d'água até a casa de máquinas, englobando tomada d'água, canal, câmara de carga, chaminé de equilíbrio, tubulação forçada e registro, sendo caracterizada em três diferentes tipos.

- Adução em baixa pressão por meio de tubulação e adução em alta pressão através de tubulação forçada;
- Adução em baixa pressão por canal ou por tubulação, sem tubulação forçada, no caso de instalações de turbinas do tipo “caixa aberta”;
- Adução em escoamento livre por canal e adução em alta pressão através de tubulação forçada.

2.1.3.3 Tomada d'água

A tomada d'água tem por função captar a água a qual será conduzida por meio de um canal ou uma tubulação até a turbina na casa de máquinas.

Também permite a retenção de corpos flutuantes e de material sedimentado, trazidos pelo escoamento, que podem danificar a turbina, permitindo também o fechamento da tubulação forçada ou canal de adução para eventuais reparos, (ELETROBRÁS, 2000).

2.1.3.4 Tubulação de adução ou de baixa pressão

Caso a alternativa de construção de um canal de adução em superfície livre não seja viável, deve-se utilizar uma tubulação em baixa pressão como meio de ligação entre a tomada d'água e a entrada do conduto forçado.

2.1.3.4.1 Dimensionamento do diâmetro interno mínimo

O diâmetro interno mínimo da tubulação de baixa pressão pode ser expresso pela equação 1.

$$Di = 341,278Q^{0,388} \left(Ka \frac{L}{Hb} \right)^{0,204} \quad (1)$$

Onde:

Di: diâmetro interno mínimo (cm)

Q: descarga máxima na tubulação (m³/s)

L: comprimento da tubulação

Hb: queda bruta (m)

Ka: coeficiente que varia com o tipo de tubulação (**Tabela 1**)

Tabela 1: Valores de Ka

Material do conduto	Ka
Aço	0,32
Cimento-amianto	0,34
Concreto armado	0,38

(Fonte: Eletrobrás, 2000).

2.1.3.4.2 Espessura da Tubulação de Adução

Para tubulações em aço a espessura da tubulação é obtida através da Equação 2.

$$e = \frac{PiD}{2\sigma kf} + es \quad (2)$$

Onde:

e: espessura da parede (mm)

Pi: pressão hidrostática máxima interna

D: diâmetro interno (mm)

σ : tensão admissível de resistência à tração do material (Kgf/cm²)

kf: eficiência das soldas, conforme **Tabela 2**.

es: sobre espessura para corrosão, equivalente a 1,0mm

Tabela 2: Eficiência das soldas

TUBULAÇÃO	kf
Sem costura	1,00
Com costura	
Sem radiografia e alívio de tensões	0,80
Com radiografia ou com alívio de tensões	0,90
Com radiografia e alívio de tensões	1,00
Padronizada de fabricação normal	
Costura com solda por fusão elétrica	0,80
Costura com solda por resistência elétrica	1,00

(Fonte: Eletrobrás, 2000).

A norma ABNT NBR 6648:2014 considera para o dimensionamento do conduto forçado Aço ASTM A283, Grau C, onde σ_f : 1400kgf/cm².

A máxima pressão hidrostática admissível pela tubulação é considerada como a pressão normal de queda, somando-se sua sobrepressão devido ao golpe de aríete, conforme observado na Equação 3, (ELETROBRÁS, 2000).

$$P_i = \frac{Hl + h_s}{10} \quad (3)$$

Onde:

P_i: pressão hidrostática máxima interna (kgf/cm²)

Hl: queda líquida (m)

h_s: sobrepressão (m)

A Eletrobrás (2000) recomenda por segurança que se adote uma espessura mínima da tubulação forçada e da tubulação de baixa pressão, tendo em vista que efeitos de corrosão e defeitos de laminação afetem o valor da espessura percentualmente. Além disso, a adoção de espessura mínima é recomendada por motivos construtivos, de transporte e de montagem.

Essa espessura é determinada pela Equação 4, de *Bureau of Reclamation*.

$$e = \frac{D_i + 500}{400} \geq 6,35mm \quad (4)$$

Onde:

e: espessura mínima da tubulação

D_i: diâmetro mínimo da tubulação

2.1.3.5 Câmara de carga

Estrutura responsável pela passagem de água no canal de adução até a tubulação forçada, destinada a aliviar o golpe de aríete que ocorre no conduto forçado quando há variações repentinas no fluxo de água ou fechamento brusco da válvula globo.

2.1.3.6 Chaminé de equilíbrio

Estrutura de concreto ou aço, caracterizada por um reservatório cilíndrico vertical, instalada entre a câmara de carga e a tubulação forçada, com a finalidade de amortecer os efeitos causados pelo aumento da pressão e velocidade da água no interior da tubulação durante o acionamento repentino da turbina, conhecido pelo golpe de aríete, (ELETROBRÁS, 2000).

Este equipamento será necessário somente quando não se enquadrar na Equação 5.

$$\frac{La}{Hb} \leq 5 \quad (5)$$

Onde:

La: Comprimento total do sistema de adução(m)

Hb: Queda bruta(m)

2.1.3.7 Tubulação Forçada

Tubulação responsável pela passagem de água entre o desnível da câmara de carga até a turbina. (ANEEL, 2008).

2.1.3.7.1 Determinação do Diâmetro Econômico

O diâmetro econômico segundo Eletrobrás (2000) é aquele para qual a relação custo-benefício é máxima, tendo em vista que um aumento de sua dimensão visando redução de perda hidráulica e maior potência instalada não compense o acréscimo de custo associado.

O diâmetro econômico é calculado pela Equação 6, fórmula de Bondshu.

$$De = 127 \sqrt[7]{\frac{Q^3}{Ht}} \quad (6)$$

Onde:

De: diâmetro econômico (cm)

Q: vazão da tubulação (m³/s)

Ht: carga hidráulica máxima sobre a tubulação (m)

A carga hidráulica sobre a tubulação pode ser determinada através da Equação 7.

$$Ht = Hb + hs \quad (7)$$

Onde:

Ht: carga hidráulica sobre a tubulação (m)

Hb: queda bruta (m)

hs: sobrepressão hidráulica devido ao golpe de aríete (m)

Para minicentraís hidrelétricas pode-se admitir uma sobrepressão de 20% no valor da queda bruta.

2.1.3.7.2 Verificação da velocidade máxima admissível

Após a determinação do diâmetro econômico, a velocidade da tubulação deverá ser calculada, respeitando a velocidade máxima admissível do tipo de material da tubulação, conforme **Tabela 3**.

Tabela 3: Velocidade máxima admissível para cada tipo de tubulação.

Material	Velocidade Máxima Admissível (m/s)
Aço	5,0
Concreto	3,0

Fonte: Eletrobrás (2000)

A velocidade é estimada pela equação da continuidade, conforme Equação 8.

$$V = \frac{4Q}{\pi De^2} \quad (8)$$

Onde:

V: velocidade de escoamento (m/s)

Q: descarga máxima da tubulação (m³/s)

De: diâmetro econômico (m)

2.1.3.8 Casa de máquinas

Local onde ocorre a transformação de energia, ou seja, local onde se abriga o grupo gerador destinado à produção de energia elétrica, como turbina, gerador, painel de comando e outros equipamentos auxiliares.

2.1.3.9 Canal de fuga

De acordo com a Eletrobrás (2000), o canal de fuga é a estrutura que reconduz a água ao rio após sua passagem pela turbina.

2.2 QUEDA HIDRÁULICA

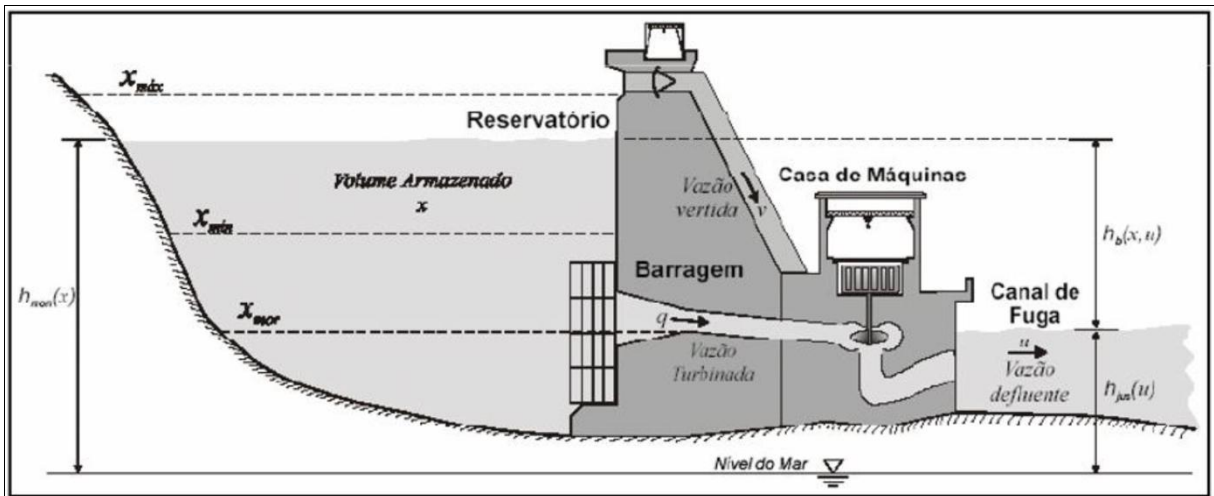
Segundo Macintyre (1983), quando um líquido cede energia ou está realizando trabalho, denomina-se queda hidráulica.

Nos desníveis topográficos, sejam eles naturais ou artificiais, procura-se pela captação de água no ponto mais elevado possível. Quanto maior o desnível, maior o trabalho gerado.

2.2.1 Queda bruta

A queda bruta consiste na diferença de altura de água entre o nível do reservatório ou barragem e o nível do curso do rio no canal de fuga, conforme Equação 9 e **Figura 4**.

Figura 4: Diferença de altura entre reservatório e canal de fuga.



(Fonte: UTFPR)

$$Hb = \Delta H \quad (9)$$

Onde:

Hb: queda bruta (m)

ΔH : diferença de altura entre reservatório e canal de fuga (m)

2.2.2 Queda líquida

Queda líquida ou queda de projeto é caracterizada pela queda bruta, descontando-se a perda de carga total do sistema, conforme Equação 10.

$$Hl = Hb - ht \quad (10)$$

Onde:

Hl: queda líquida (m)

Hb: queda bruta (m)

ht: perda de carga total no sistema (m)

2.2.3 Perda de carga pelo método expedito

Método utilizado para cálculo de perda de carga onde perdas específicas são difíceis de serem definidas, (ELETROBRÁS, 2000).

Adota-se como perda de carga 3% do valor da queda bruta em projetos onde a distância entre a casa de máquinas e a tomada de água não ultrapasse 80m.

Para a distância de 80m e 320m entre a casa de máquina e a tomada d'água adota-se como perda 4% da queda bruta.

Quando os projetos de casa de máquina versus tomada d'água compreendem uma distância entre 320 e 800m a perda de carga será equivalente a 5% do valor da queda bruta.

O método clássico para cálculo de perda de carga deve ser utilizado quando a distância entre casa de máquinas e tomada d'água exceder 800m.

2.2.4 Perda de carga pelo método clássico

Este método pode ser aplicado pela Equação 11 após o conhecimento de todas as obras e equipamentos presentes no sistema de adução, podendo ser aplicado em cada ponto do circuito, sendo assim, um método mais preciso, (ELETROBRÁS, 2000).

$$h = k \frac{v^2}{2g} \quad (11)$$

Onde:

h: perda de carga em algum ponto do circuito hidráulico de adução (m)

k: coeficiente de perda de carga que varia para cada caso

v: velocidade do escoamento (m/s)

g: aceleração da gravidade (9,81m/s²)

2.2.4.1 Perda por aproximação

A perda de carga por aproximação pode ser obtida pela Equação 12.

$$hca = kca \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

Onde:

hca: perda de carga no canal de adução (m)

v: velocidade do escoamento (m/s)

g: aceleração da gravidade (9,81m/s²)

kca: coeficiente de forma do canal de aproximação, que varia entre 0,01 e 0,1.

2.2.4.2 Perda na grade da tomada d'água

A perda na grade da tomada d'água pode ser estimada utilizando-se a fórmula de Kirschmer, Equação 13.

$$hg = kg \left(\frac{e1}{e2} \right)^{\frac{1}{4}} \operatorname{sen}\theta \frac{Vg^2}{2g} \quad (13)$$

Onde:

hg: perda na grade (m)

e1: espessura ou diâmetro das barras

e2: espaçamento entre barras

θ : inclinação na grade

Vg: velocidade junto à grade (m/s)

kg: coeficiente de perda de carga cujo valor depende das dimensões da grade, conforme **Tabela 4**.

b: largura das barras

Tabela 4: Coeficiente de perda de carga de acordo com as dimensões da grade.

Geometria das barras	e_1/b	kg
Retangulares	≥ 5	2,42
Circulares	≥ 5	1,79

Fonte: Eletrobrás (2000).

2.2.4.3 Perda de carga em conduto forçado

A perda de carga no conduto forçado, segundo Eletrobrás (2000), consiste no somatório das perdas de carga na entrada do conduto, nas perdas devido ao atrito, nas perdas em curvas, em reduções cônicas e bifurcações.

2.2.4.3.1 Perda de carga na entrada do conduto

A perda de carga na entrada do conduto é estimada através da Equação 14.

$$h_e = k_e \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

Onde:

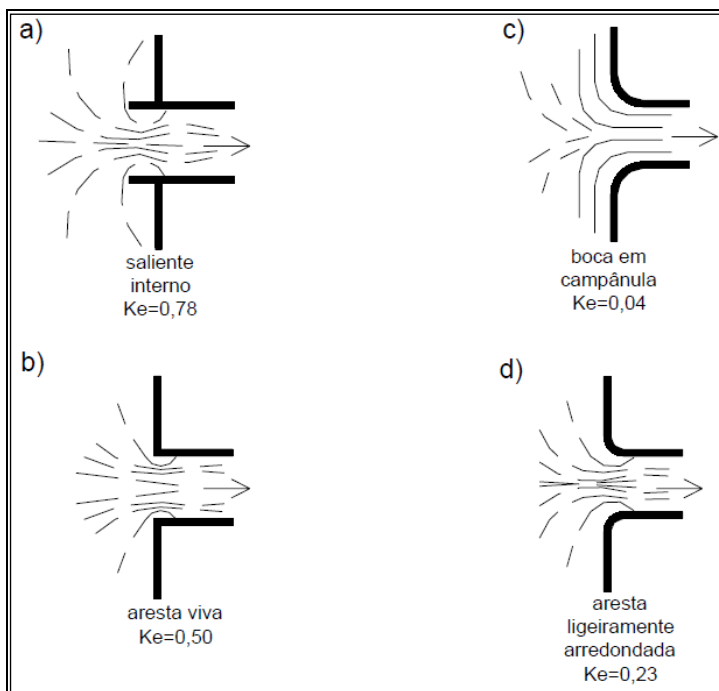
h_e : Perda na entrada do conduto (m)

v : velocidade média imediatamente a jusante da entrada (m/s)

g : aceleração da gravidade (9,81m/s²)

k_e : coeficiente que varia em função da forma da boca do conduto, conforme **Figura 5**

Figura 5: coeficiente de perda de carga em função da forma da boca do conduto.



(Fonte: ELETROBRÁS, 2000).

2.2.4.3.2 Perda por atrito

Desprezando-se as demais perdas, a perda de carga por atrito é calculada pela fórmula de *Scobey*, (Equação 15), quando trabalhado com fluidos incompressíveis, (AZEVEDO NETTO, 1998).

$$J = 410Ka \frac{V^{1,9}}{D_i^{1,1}} \quad (15)$$

onde:

J : perda de carga unitária (m/km)

D_i : diâmetro interno do conduto (cm)

V: velocidade média de escoamento (m/s)

Ka: coeficiente que varia com o tipo de material da tubulação, **Tabela 1**

2.2.4.5 Perda nas curvas

A perda de carga gerada nas curvas da tubulação pode ser calculada através da Equação 16, (ELETROBRÁS, 2000).

$$hc = kc \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Onde:

hc: perda de carga nas curvas (m)

v: velocidade média do conduto (m/s)

g: aceleração da gravidade (9,81m/s²)

kc: coeficiente variável de acordo com o ângulo de deflexão da curva (**Tabela 5**), válido para curvas onde o diâmetro do conduto equivalha a duas vezes o valor do raio da curva.

Tabela 5: Coeficiente variável com o ângulo de deflexão.

Ângulo de deflexão	kc
<10°	0
10° a 15°	0,03
15° a 30°	0,06
30° a 45°	0,09
>45°	0,13

Fonte: Eletrobrás (2000)

2.2.4.6 Perda de carga nas reduções cônicas

A perda de carga nas reduções cônicas é definida a partir da Equação 17.

$$hr = kr \frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

Onde:

hr: perda de carga nas reduções (m)

v: velocidade média do conduto, a jusante da redução (m/s)

Kr: coeficiente de perda de carga nas reduções cônicas que varia de 0,005 a 0,010

g: aceleração da gravidade (9,81m/s²)

2.2.4.7 Perda nas bifurcações

Em bifurcações, as perdas de cargas podem ser definidas através da Equação 18.

$$hb = kb \frac{V^2}{2g} \quad (18)$$

Onde:

hb: perda de carga nas bifurcações (m)

v: velocidade média do conduto a montante da bifurcação (m/s)

g: aceleração da gravidade (m/s²)

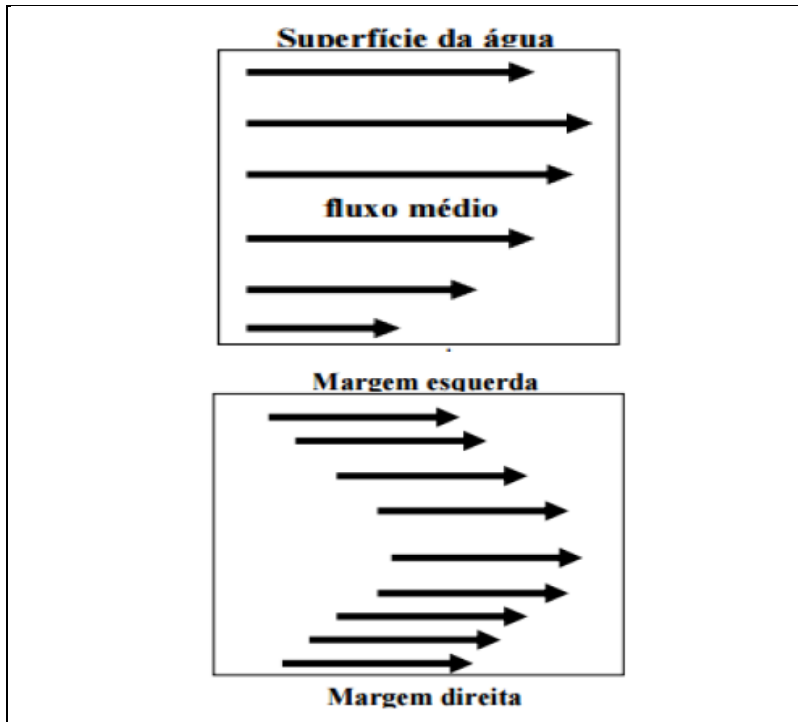
kb: coeficiente de perda de carga nas bifurcações, sendo 1,20 para escamento para uma unidade e 0,25 para duas unidades

2.3 VAZÃO VOLUMÉTRICA

Vazão pode ser expressa como o volume de água que passa por uma determinada seção de um rio, dividido por um intervalo de tempo. Usualmente, a vazão de rios é expressa em metros cúbicos por segundo (m³/s), (AZEVEDO NETTO, 1998).

Em razão do atrito entra a lâmina de água superficial com a atmosfera, bem como o atrito da água com as margens do leito do rio há uma diminuição na velocidade da água entre a superfície para o leito e de uma margem a outra respectivamente, como é mostrado na **Figura 6**, implicando em uma variação da vazão (CARVALHO, 2008).

Figura 6: Demonstração de diferentes valores de velocidade conforme o leito.



(Fonte: EPA, 1987).

Temos essa grandeza expressa pela Equação 19.

$$Q = A \cdot v \quad (19)$$

Onde:

Q: vazão (m³/s)

A: área da seção do rio (m²)

v: velocidade de escoamento do fluido (m/s)

2.3.1 Métodos para a medição de vazão de um rio

A medição de vazão em rios ou cursos d'água normalmente é realizada de forma indireta, a partir da medição de nível ou velocidade. Os instrumentos mais comuns para medição de velocidade de água em rios são os molinetes, que são pequenas hélices que giram impulsionadas pela passagem de água. Em situações de medições expeditas ou de grande carência de recursos, as medições podem ser feitas utilizando flutuadores.

2.3.1.1 Método do molinete

Segundo ANA (Agência Nacional de Águas), o método do molinete hidrométrico é hoje em dia o mais difundido para a medição de vazão, devido sua versatilidade e precisão. Consiste, basicamente, em uma hélice cuja rotação é proporcional à velocidade do fluído. A hélice geralmente é ligada a um sistema de engrenagens que a cada 1,5 voltas (esse número pode mudar em função do fabricante) atuam num contato elétrico, permitindo ao operador, na superfície, saber a velocidade do filete que está sendo analisado. Conforme **Figura 7**.

Figura 7: Modelo de molinete hidrométrico.



(Fonte: http://www.aparelhosmedir.com/molinete_11.html).

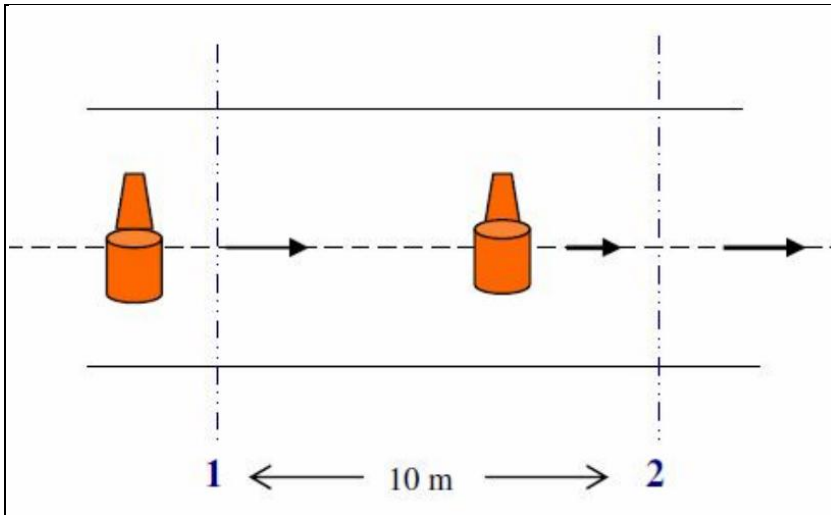
2.3.1.1 Método do flutuador

O método do flutuador parte do princípio em que através de um objeto flutuador e coleta da área transversal do rio determina-se a vazão do afluente.

Após escolher o trecho do rio ou curso d'água mais uniforme e limpo possível, deve-se demarcar uma extensão de 10m de comprimento à margem do rio (**Figura 8**), assim como

sua média de profundidade e seção transversal, conforme **Figura 9**, tendo em vista que o leito do rio não é uniforme, (DAKER, 1987).

Figura 8: Método do flutuador.



(Fonte: UFG, disponível em <https://www.agro.ufg.br/up/68/o/2.1_Hidrometria_Condutores_livres.pdf>).

A área de seção transversal média pode ser calculada através da Equação 20.

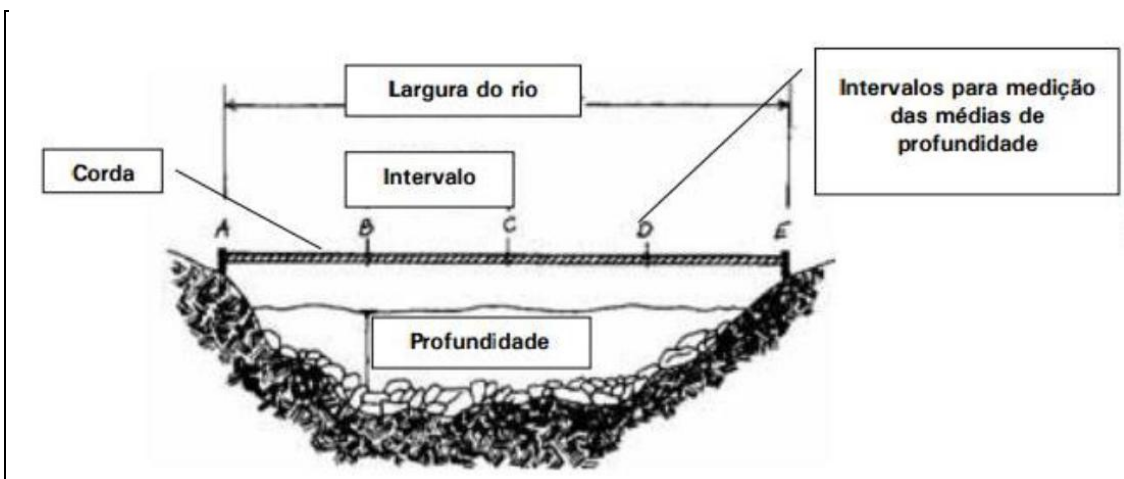
$$A_m = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n} \quad (20)$$

Onde:

A_m : área transversal média (m^2)

n : número de coletas

Figura 9: Medição da área transversal média.



(Fonte: EPA, 1987).

A Equação 21 é utilizada para a obtenção da velocidade superficial do escoamento. Esta velocidade, quando medida em córregos, livres de vegetação e com seu trecho irregular, adota-se como velocidade média 80% da velocidade superficial, (DAKER, 1987).

O flutuador deve ser posicionado a uma distância anterior a primeira marcação, para que quando este a cruzar já esteja em velocidade constante. Com o auxílio de um cronômetro, determina-se o tempo gasto para que o flutuador cruze os pontos demarcados.

$$v_s = \frac{x}{t} \quad (21)$$

Onde:

vs: velocidade superficial (m/s)

x: distância entre demarcações (m)

t: tempo até o objeto flutuador percorrer a distância entre demarcações (s)

2.4 POTENCIAL HIDRELÉTRICO

Após a realização dos estudos hidrológicos e topográficos, coleta de valores de queda líquida e vazão do curso, é possível determinar o potencial hidrelétrico do local, definido através da Equação 22, (ELETROBRÁS, 2000).

$$P = 9,81. \eta_t. \eta_g. Q. Hl \quad (22)$$

Onde:

P: potência nos bornes do gerador (kW)

η_t : rendimento da turbina

η_g : rendimento do gerador

Q: descarga da turbina (m³/s)

Hl: queda líquida (m)

Quando os rendimentos da turbina e gerador não são conhecidos, pode-se obter o potencial aproximado através da Equação 23.

$$P = 7,16. Q. Hl \quad (23)$$

Onde:

P: potência nos bornes do gerador (kW)

Q: descarga da turbina (m^3/s)

Hl: queda líquida (m)

2.5 TURBINAS HIDRÁULICAS

Define-se como turbina hidráulica um dispositivo mecânico capaz de transformar a energia cinética e potencial de um fluído em energia mecânica, (SOUZA, 1991).

As turbinas hidráulicas possuem um princípio comum de funcionamento, onde água entra na turbina vinda de um reservatório ou de um nível mais alto e escapa para um canal de nível mais baixo. A água que entra é conduzida por um duto fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transferem a energia mecânica do fluxo de água em potência de eixo, (UERJ).

As turbinas hidráulicas utilizadas nas Minicentrals Hidrelétricas devem ser escolhidas visando facilidade de operação e manutenção, dando-se grande importância à sua robustez e confiabilidade, (ELETROBRÁS, 2000).

Além de parâmetros técnicos e de seu preço, a capacidade de imediato atendimento, em caso de problemas durante o funcionamento, e a disponibilidade para fornecimento de peças sobressalentes por parte do fabricante, devem ser analisadas durante o processo de escolha da turbina, (ELETROBRÁS, 2000).

2.5.1 Componentes de uma turbina hidráulica

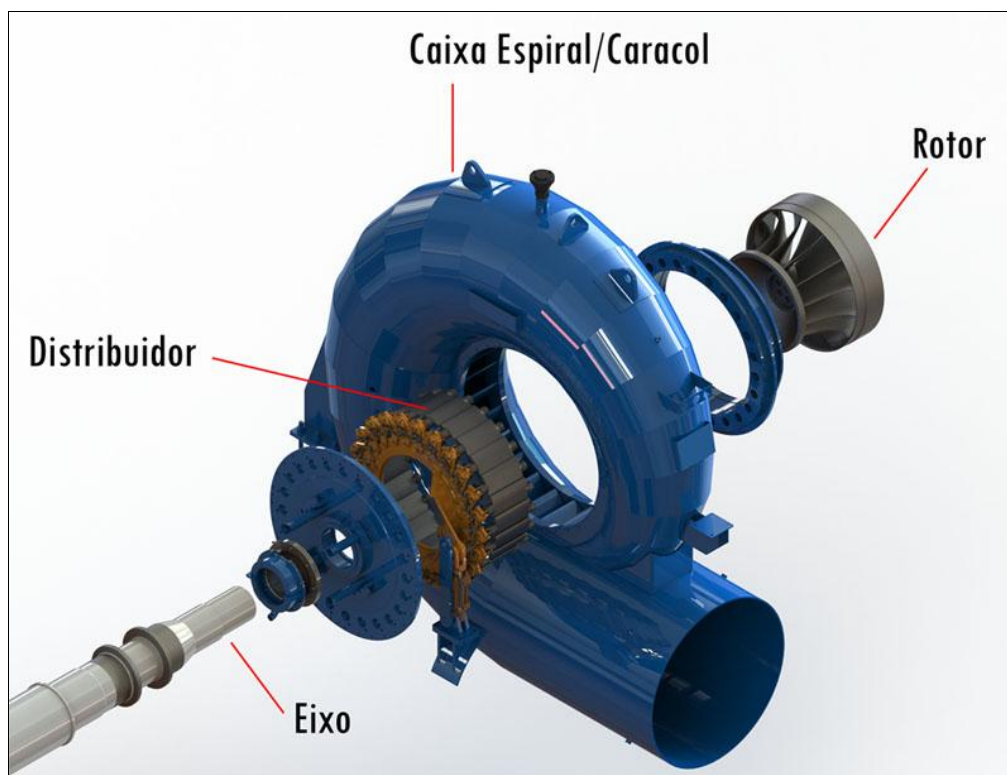
As turbinas hidráulicas são constituídas basicamente por duas partes, o rotor e o distribuidor.

O distribuidor é um elemento fixo, cujas funções são o direcionamento da água ao rotor seguindo uma direção adequada, alterar a seção de saída do distribuidor, indo de zero, fechado, até a abertura máxima, modificando a vazão, e a transformação total ou parcial da energia de pressão em energia cinética na entrada do rotor.

O rotor é um órgão móvel que gira em torno de um eixo. É constituído por um sistema de pás fixas a um eixo e é responsável por converter grande parte da energia hidráulica em trabalho mecânico.

Os componentes de uma turbina Francis estão representados conforme **Figura 10**.

Figura 10: Componentes de uma turbina hidráulica Francis.



(Fonte: Hidroenergia, disponível em <http://www.hidroenergia.com.br/tipos-de-turbinas-hidraulicas/>).

2.5.2 Classificação das turbinas quanto à ação e reação

Segundo UERJ (2016), as turbinas de ação não trabalham imersas na água, mas sim ao ar livre. A água encontra a roda móvel (rotor) através de jatos, sendo a pressão de entrada e de saída iguais.

As turbinas de reação trabalham no seio da água turbinada. A água penetra na roda móvel por toda a periferia, fazendo a descarga paralelamente ao eixo de rotação. Nas turbinas de reação a pressão de saída é inferior a de entrada e são normalmente utilizadas para médias e baixas quedas.

2.5.1.1 Velocidade de Rotação da turbina

A escolha da velocidade de rotação da turbina depende da potência nominal, da altura de queda, do tipo de turbina e do tipo de gerador.

As características de cada turbina devem ser tratadas juntamente com o tipo específico da turbina, porém a influência do tipo de gerador na escolha da velocidade de rotação da unidade pode ser considerada de um modo abrangente para os diversos modelos de turbinas.

A velocidade de rotação da turbina pode ser calculada através da Equação 24, (ELETROBRÁS, 2000).

$$n = 120 \frac{f}{p} \quad (24)$$

Onde:

n: velocidade de rotação síncrona (rpm)

f: frequência de rede (Hertz)

p: número de polos do gerador

A **Tabela 6** a seguir apresenta as velocidades de rotação comumente utilizadas na frequência de 60 Hz.

Tabela 6: Velocidades de rotação em função do número de polos.

Nº de polos	Rotação (RPM)
4	1800
6	1200
8	900
10	720
12	600
14	514,3
16	450
18	500
20	360
24	300
28	257,1
30	240
32	255
36	200

(Fonte: Eletrobrás)

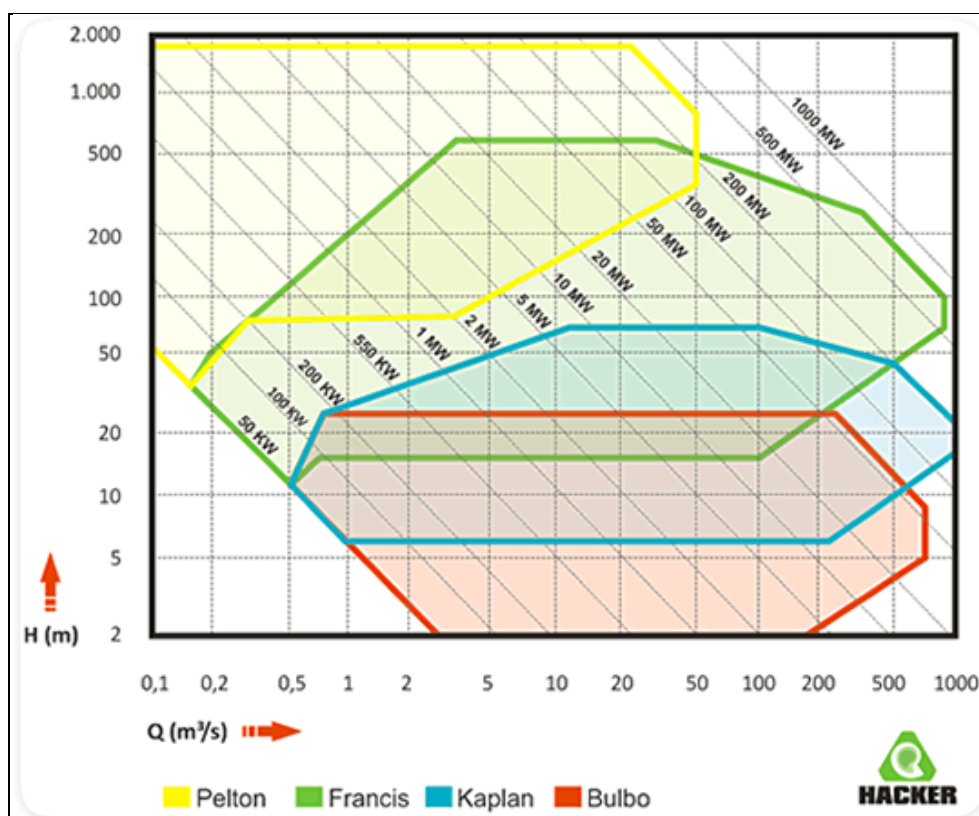
2.6 SELEÇÃO DO TIPO DE TURBINA

Em instalações de pequeno porte, visa-se gerar energia elétrica ao menor custo possível, o que significa que a turbina deve ser dimensionada respeitando-se a rotação mínima do gerador, bem como utilizar modelos padrão dos fabricantes, ao contrário das grandes usinas, onde o alto investimento do projeto em geral, possibilita a fabricação de um modelo

especial, específico, para a usina definida, buscando-se o melhor rendimento, (ELETROBRÁS,2000).

Para a definição do tipo de turbina, os parâmetros vazão (m^3/s) e de queda líquida do projeto (m), devem ser utilizados, conforme gráfico da **Figura 11**.

Figura 11: Seleção do tipo de turbina



(Fonte: Hacker, disponível em <<http://www.hacker.ind.br/>>)

2.6.1 Turbina Francis

A turbina Francis “é aquela em que o fluxo de água se desenvolve no rotor da turbina, na maior parte de sua trajetória, em um fluxo normal ao seu eixo”. (Universidade de São Paulo (USP), 1999, p. 1).

Segundo a Universidade de São Paulo (1978), nas turbinas Francis a água é colocada em uma câmara espiral e se direciona ao rotor por meio de diversas palhetas-guia móveis (e ajustáveis) constituindo condutos convergentes que transformam a energia dinâmica em energia cinética. Caso a carga no interior da turbina cair de forma brusca, o regulador aciona o mecanismo o qual fecha as palhetas. A turbina Francis tem uma câmara espiral projetada para que apresente uma seção transversal sempre menor, à medida que a vazão diminui, podendo

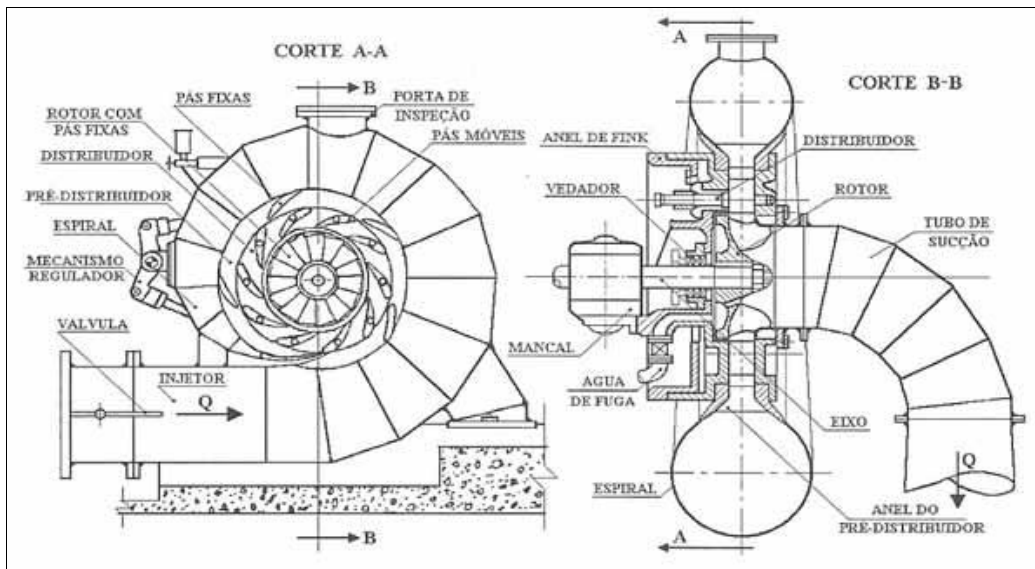
conservar a velocidade constante. Em caso de cargas menores de 12 m, a turbina Francis pode ser instalada em canal de céu aberto.

Este autor ainda cita que, após deixar o rotor, a água segue para um tubo de sucção. Este tem uma secção transversal que segue aumentando para que se reduza a velocidade de descarga.

Segundo Macintyre (1983), existem dois tipos de turbina Francis, a de caixa aberta e a caixa espiral. A de caixa aberta é mais indicada para aproveitamentos hidrelétricos com queda até 10 m, e a de caixa espiral é indicada para quedas acima de 10 m.

Em minicentraís o eixo dispõe-se horizontalmente, pela facilidade de instalação e manutenção, conforme representado na **Figura 12**.

Figura 12: Turbina Francis caixa espiral



(Fonte: SOUZA, SANTOS, BORTONI (1999))

2.6.2 Turbina Kaplan

Caracterizadas por trabalharem com altas velocidades em baixas quedas e altas vazões, as turbinas do tipo Kaplan (**Figura 13**), também conhecidas como turbinas Hélice, como o próprio nome já sugere, tem as suas pás no formato de hélices, com seu fluxo sempre seguindo a orientação do rotor (axial).

Figura 13: Demonstração de Turbina Kaplan.



(Fonte: <http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-kaplan-560.html>)

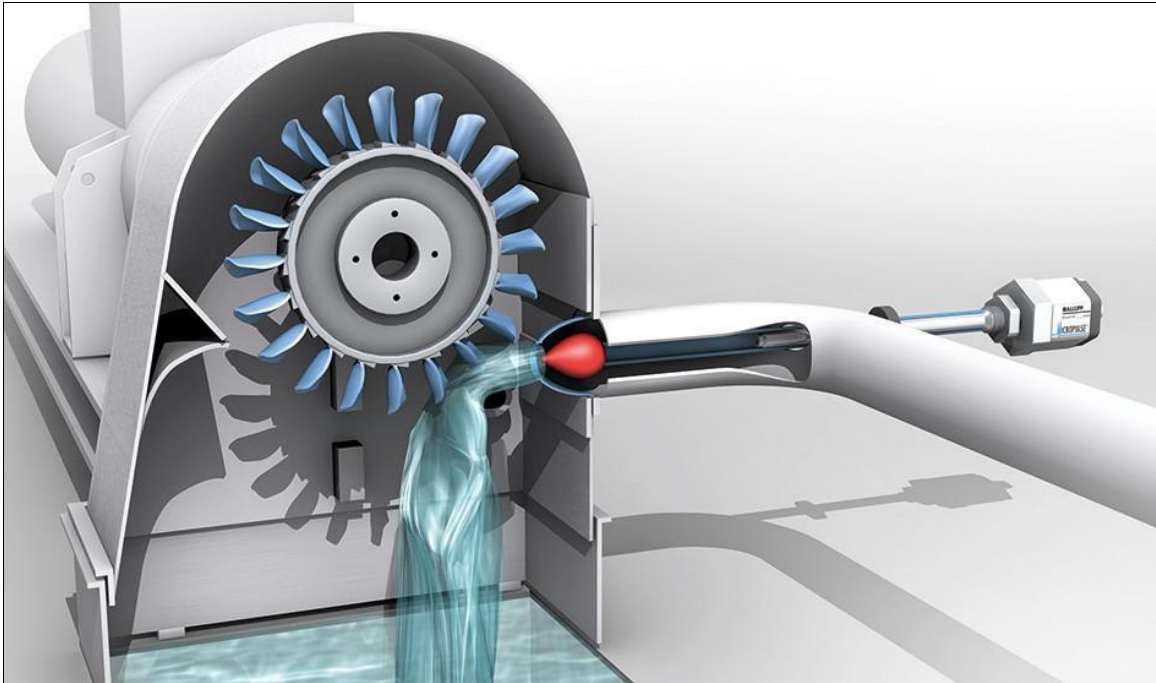
2.6.3 Turbinas Pelton

Trata-se de uma turbina com deslocamento tangencial, mais utilizada em projetos com grande queda líquida de água. A água é conduzida através de uma tubulação, e então é impulsionada por injetores, **Figura 14**, fazendo com que a água atinja diretamente as pás do rotor.

O controle de vazão e velocidade da turbina é feito de maneira a restringir a passagem de água pelos bicos injetores, sem perda do rendimento do equipamento, podendo ser realizado de forma manual ou hidráulica (MACINTYRE, 1983).

Souza, Santos e Bortoni (1999) destacam que a turbina Pelton é utilizada em quedas altas e pequenas vazões, com eixo horizontal, no caso de ter um ou dois jatos e eixo vertical se existirem entre três a seis, e sua potência pode chegar a mais de 100 MW por unidade e quedas da ordem de 1900 m.

Figura 14: Turbina Pelton

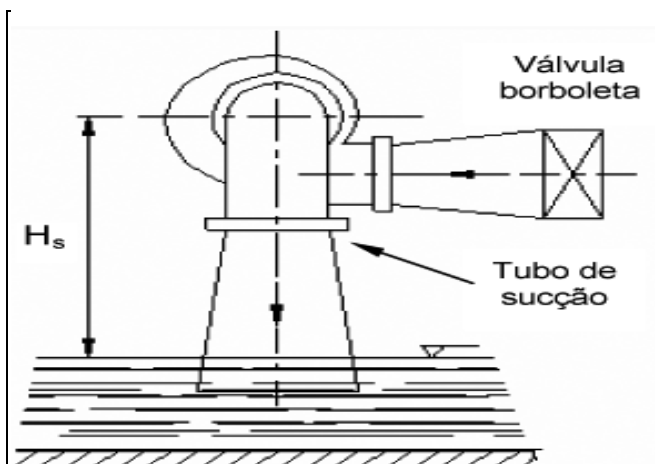


(Fonte: <https://www.balluff.com/local/br/industry-area/applications/energy/high-reliability/>).

2.6.4 Tubo de sucção

O tubo de sucção, **Figura 15**, tem a função de propiciar que a água ao sair do receptor, escoe de forma contínua, ao invés de ser descarregada livremente na atmosfera. Permite que a pressão à saída do rotor seja inferior à pressão atmosférica e em certos casos permite localizar a turbina dentro dos limites considerados pela cavitação, independentemente do nível da água à jusante.

Figura 15: Tubo de sucção



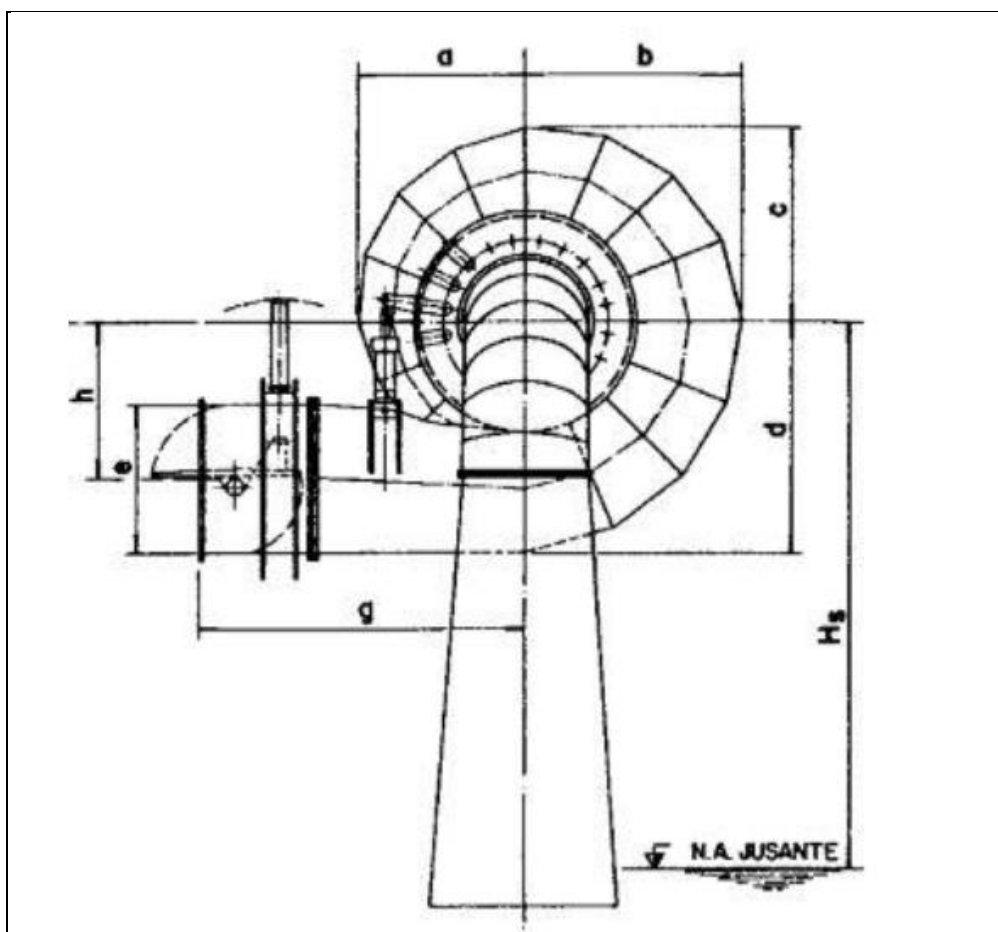
(Fonte: Macintyre, 1983)

2.6.4.1 Altura de Sucção

Pressão nula na entrada do tubo de sucção nunca poderá ocorrer, uma vez que ocorreria a vaporização da água na temperatura ambiente, logo geraria o fenômeno da cavitação, sendo extremamente prejudicial à turbina, (MACINTYRE, 1983).

De acordo com Macintyre (1983), para que este fenômeno não ocorra é necessário que o valor da altura de sucção, **Figura 16**, não ultrapasse determinado limite e que o tubo de sucção deve ficar abaixo do nível de água.

Figura 16: Altura de sucção H_s



(Fonte: Eletrobrás)

2.5.5 Volante de Inércia

Nas unidades geradoras de pequena capacidade pode ocorrer que o efeito de inércia das massas girantes seja insuficiente para garantir uma regulação estável. Sendo assim, o

regulador não terá capacidade para controlar as variações bruscas de carga na unidade geradora, dentro das condições estabelecidas, (ELETROBRÁS, 2000).

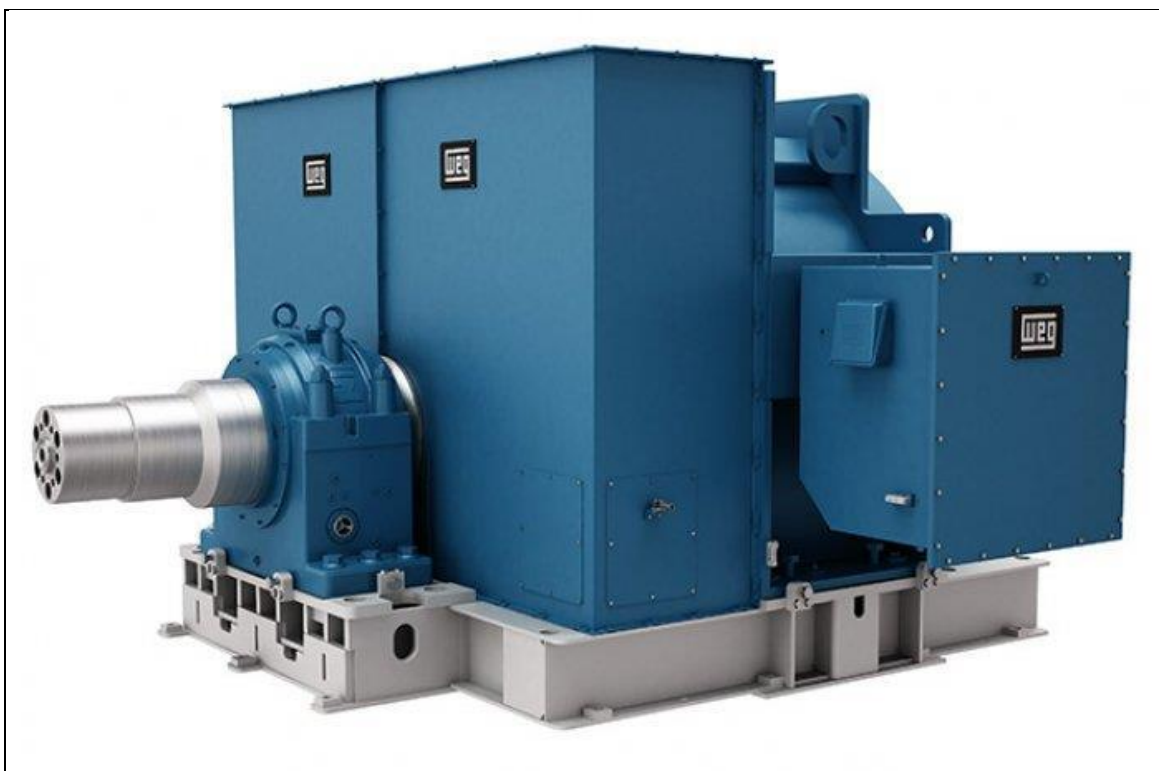
Torna-se assim, necessário, o acréscimo de material que resulte em aumento do efeito de inércia. Sendo previstos discos de aço ou ferro fundido ligado diretamente ao eixo do gerador, denominado volantes de inércia.

2.7 GERADORES

Gerador, ou gerador síncrono, **Figura 17**, pode ser definido como uma máquina elétrica girante, capaz de converter energia mecânica em energia elétrica, onde sua rotação é suprida por uma fonte de energia mecânica, no caso de uma usina hidrelétrica, uma turbina, (KOSOW, 2000).

Para Lima (2002), a rotação da turbina hidráulica tem que ser compatível com a do gerador, já para a Eletrobrás (2000), pode se haver uma conversão de rotação entre turbina e gerador, adotando-se o acionamento indireto através de um multiplicador de velocidade.

Figura 17: Gerador síncrono marca WEG.



(Fonte: WEG, 2016)

2.7.1 Potência nominal de geração

Após o cálculo da potência disponível no eixo da turbina é possível determinar a potência do gerador, através da Equação 25.

$$P_g = P_t \frac{\eta_g}{F_p} \quad (25)$$

Onde:

P_g : potência do gerador (kVA)

P_t : potência no eixo da turbina (kW)

η_g : rendimento do gerador

F_p : fator de potência

Segundo Eletrobrás (2000), o rendimento do gerador deve ser obtido junto ao fabricante do equipamento. Porém, na falta de informações, podem ser utilizados os seguintes valores:

- 96% para geradores de até 1 MVA
- 97% para geradores de até 10 MVA
- 98% para geradores de até 30 MVA

2.7.2 Rotação nominal do gerador

A rotação nominal do gerador deve ser estabelecida de acordo com a velocidade nominal síncrona da turbina, para a frequência de 60 Hz.

Quando o acionamento direto do gerador resultar antieconômico, adota-se o acionamento indireto do gerador através de um multiplicador de velocidade. Para este caso, utilizam-se geradores de 4, 6 ou 8 polos,(ELETROBRÁS, 2000).

2.7.3 Tensão de geração

Segundo o Manual de Diretrizes de Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS), quando o gerador está ligado ao sistema de transmissão através de um transformador, a determinação da tensão de geração é geralmente baseada em fatores econômicos.

A **Tabela 7** apresenta uma orientação para seleção da tensão de geração que resulta numa solução economicamente atraente.

Tabela 7: Tensão de geração econômica.

Tensão do Gerador	Potência do Gerador
220/380 ou 480V	até 2 MVA
2300 V	até 3 MVA
4160 V	até 5 MVA
6900 V	até 15 MVA
13800 V	Acima de 100 MVA

(Fonte: Eletrobrás)

Para aplicação de geradores em baixa tensão, sugere-se que a tensão seja a maior possível (até 480 V), tendo em vista que o custo dos geradores varia pouco com a tensão.

Recomenda-se também que a distância entre o gerador e o transformador elevador não ultrapasse 50 m, (ELETROBRÁS, 2000).

2.8 VIABILIDADE ECONÔMICA

Segundo Woiler e Mathias (2008), a análise de viabilidade econômica de um projeto ou investimento deve ser feito por meio da análise de dados coletados internamente em uma empresa com o objetivo de implantar melhorias e inovações. A não realização desta análise pode colocar em risco todo o investimento. Hirschfeld (2002) ainda afirma que o estudo de viabilidade de um investimento é a investigação do projeto a ser executado com o propósito de verificar sua justificativa.

Para Souza (2003), realizar um investimento é trocar algo certo (recursos econômicos) por algo incerto (fluxos de caixa gerados pela aplicação do capital), ou seja, é o comprometimento de recursos na esperança de benefícios futuros.

Casarotto Filho e Kopittke (2008) propõem a análise dos seguintes indicadores:

- Valor Presente Líquido (VPL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR);
- Tempo de Recuperação de Capital (Payback);

2.8.1 Fluxo de caixa

Para Matarazzo (2003), o fluxo de caixa objetiva expor a movimentação de entradas e saídas de caixa, possibilitando ao gestor visualizar se haverá faltas ou sobras no caixa para a tomada de decisão de quais recursos a empresa deve aplicar. Hirschfeld (2000) afirma que quando usado ao iniciar um investimento, será capaz de indicar certezas e incertezas, verificando a viabilidade do empreendimento.

2.8.2 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

De acordo com Bianchini (2014), a TMA é uma taxa que tem por objetivo reduzir os custos do negócio, sendo necessária para o cálculo do VPL e da TIR. Nas palavras de Schroeder et. al (2005), a TMA tem papel fundamental na decisão de investimento e pode ser estabelecida pela própria empresa.

2.8.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Silva et. al (2007), afirma que o VPL de um investimento é a diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa com o desconto do fluxo de caixa a uma taxa “K” definida pela empresa. Nas falas de Abreu et. al (2008), o intuito do valor presente líquido é verificar a diferença entre o valor de um projeto e o custo na data atual. Um resultado positivo do VPL quer dizer que o projeto vale mais do que custa, caso contrário, deve ser descartado.

Souza e Clemente (2001) determinam os seguintes preceitos para a análise de decisão sobre o investimento:

- Se $VPL > 0$, o projeto é economicamente atrativo;
- Se $VPL = 0$, é indiferente investir no projeto;
- Se $VPL < 0$, o projeto não é economicamente atrativo;

Motta e Calôba (2002) definem a Equação 26 do VPL como a somatória dos fluxos de caixa para o instante ($t = 0$), considerando uma taxa de juros (i).

$$VPL = \frac{FC_0}{(1+i)^0} + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_2}{(1+i)^2} + \frac{FC_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{FC_n}{(1+i)^n} \quad (26)$$

Onde:

FC = Fluxos de Caixa;

i = taxa de juros (TMA);

2.8.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Newman e Lavelle (2000) definem a TIR como a taxa de juros paga sobre o saldo devedor de um empréstimo, de tal modo que o programa de pagamento restrinja este saldo à zero.

Motta e Calôba (2002) afirmam que a TIR é um índice utilizado para medir a rentabilidade do investimento por unidade de tempo. Gitman (2007) complementa dizendo que a taxa interna de retorno é indispensável para equiparar o valor atual das entradas ao investimento inicial.

Para Hastings (2003), a análise de decisão através da TIR deve ser feita de acordo com as seguintes condições:

- Se $TIR > TMA$, o projeto é economicamente atrativo;
- Se $TIR = TMA$, é indiferente investir no projeto;
- Se $TIR < TMA$, o projeto não é economicamente atrativo;

Para o cálculo da TIR, Gitman (2010) recomenda o uso de calculadoras financeiras uma vez que envolvem técnicas complexas de tentativa e erro.

2.8.5 Payback descontado

De acordo com Gitman (2007), o Payback é utilizado para mensurar o tempo necessário para o capital investido retornar a empresa considerando a mudança de valor do dinheiro com o tempo. Portanto, quanto maior for o Payback maior o tempo necessário para retornar o capital investido.

Conforme Bianchini (2014), o Payback consiste em calcular em que quantidade de tempo o investimento irá se pagar utilizando as entradas e saídas de caixa que foram efetuadas após a data do pagamento inicial.

3 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

O referido trabalho apresenta encaminhamento metodológico de cunho quantitativo, pois segundo Prodanov (2013), a pesquisa quantitativa considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números e informações para classifica-las e analisá-las e requer uso de recursos de técnicas estatísticas.

A fim de detalhar os processos necessários para a realização dos resultados, baseado nas informações localizadas no referencial teórico, a metodologia do presente trabalho foi dividida em dois tópicos identificados como materiais de suporte e métodos utilizados.

3.1 MATERIAIS DE SUPORTE

Conforme listado abaixo, os materiais de suporte detalham todos os instrumentos, ferramentas, utensílios e equipamentos necessários para a realização das atividades propostas.

3.1.1 Plantas

A planta original do lote rural e a ferramenta de imagens via satélite “Google Earth”, foram utilizadas para a localização da área e afluente em que se encontra a minicentral hidrelétrica, bem como suas instalações e características da propriedade.

3.1.2 Instrumentos de medição

Para o levantamento dos dados e realização dos cálculos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Trensas;
- Cronômetros;
- Objeto flutuador (garrafa PET);
- Medidor de nível;
- Fita métrica;
- Calculadora.

3.2 MÉTODOS UTILIZADOS

Com a teoria abordada no referencial teórico e o auxílio dos materiais de suporte, os métodos utilizados para a realização dos objetivos do trabalho serão organizados em tópicos conforme abaixo.

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo, **Figura 18**, localiza-se na zona rural do distrito de Palmitópolis pertencente ao município de Nova Aurora, Oeste Paranaense, na bacia hidrográfica Piquiri (Paraná II), com área total de 24.171,70 km².

Figura 18: Vista aérea da propriedade.



(Fonte: Google Earth, 2018).

A propriedade tem como um de seus limites de divisão o manancial Rio Água Grande, apresentando no local, uma queda d'água característica, conforme **Figura 19**.

Figura 19: Queda d'água.



(Fonte: Autor, 2018).

3.2.2 Localização da casa de máquinas

A casa de máquinas fica localizada logo após a queda d'água, visando um maior desnível geográfico e conseqüentemente uma maior potência hidráulica.

3.2.3 Levantamento de dados

O levantamento de dados visa determinar o potencial hidrelétrico disponível da minicentral hidrelétrica e o consumo total a ser consumido na propriedade, assim como a avaliação operacional dos elementos e equipamentos existentes em operação na central geradora.

Logo, será possível determinar a viabilidade econômica para reativação da usina como fonte alternativa de energia a ser utilizada principalmente nos tanques de piscicultura.

Para tal finalidade, a demanda energética da propriedade, vazão disponível e queda de projeto devem ser estipuladas.

3.2.3.1 Demanda energética da propriedade

Baseado nas informações dos equipamentos previstos a serem instalados na propriedade, obtidos através do proprietário da mesma e pelo técnico da Cooperativa responsável pelo projeto dos açudes, verificou-se a demanda energética total requerida. Ressaltando que os equipamentos serão instalados futuramente, futuras mudanças poderão ocorrer na demanda energética total.

Essa demanda energética será calculada com base na soma da potência requerida de todos os equipamentos dispostos, tendo em vista não ser possível estimar quais equipamentos estarão em funcionamento conjuntamente.

3.2.3.2 Vazão disponível

Para a determinação da vazão do curso de água do rio, utilizou-se o método do flutuador, conforme abordado no item 2.3.1.1, tendo em vista a falta de recursos e equipamentos mais precisos.

Para determinar a largura do rio, foram feitas duas medições de sua seção transversal. Para determinar sua profundidade, foram realizadas duas séries de dozes medições em diferentes pontos, obtendo sua profundidade média.

Com os valores de profundidade média e seção transversal do rio, obteve-se a área transversal média.

Para a realização do cálculo da velocidade, foram demarcados dois pontos lineares à margem do rio à uma distância de 10 metros entre si, lançando o objeto flutuador no rio, em torno de 5 metros antes do ponto demarcado, para que sua velocidade seja constante na chegada da primeira marcação. Foram então cronometrados os tempos que o objeto flutuador levou para percorrer os 10 metros demarcados, em quatro tentativas realizadas, sendo possível encontrar a velocidade superficial do rio, conforme Equação 18.

Com os valores de velocidade e área transversal média definidos, a vazão disponível poderá ser determinada pela Equação 15.

3.2.3.3 Queda bruta

Com o auxílio de uma trena e uma mangueira de nível, e seu devido alinhamento, foi possível encontrar a diferença de altura entre o reservatório e o canal de fuga.

3.2.4 Queda líquida

Para que a queda líquida ou queda de projeto fosse determinada, foi necessário estimar as perdas de cargas através do item 2.2.4.

Pela Equação 9, determinou-se a queda de projeto.

3.2.5 Potencial hidrelétrico disponível

Com valores de vazão do afluente e a queda líquida de projeto determinados, foi possível verificar o potencial hidrelétrico disponível, a partir da Equação 20, com o objetivo de verificar a satisfação da demanda energética máxima necessária.

3.2.6 Equipamentos de geração

Neste caso, para os equipamentos de geração, foram consideradas duas possíveis hipóteses. Sendo a primeira, realizar a escolha de uma nova turbina que seja compatível com o gerador existente, e a segunda, realizar a seleção de um novo grupo gerador (turbina e gerador), com base nos dados recolhidos anteriormente.

3.2.6.1 Turbina / Gerador

Com base nos dados de vazão disponível, queda líquida, demanda energética e análise prévia da **Figura 11**: Seleção do tipo de turbina fez-se contato com os fornecedores “B&G Tornearia” e “Flessak – Trabalhando com energia”, com o propósito de apresentação de modelos de equipamentos que atendessem o pressuposto.

3.2.7 Tubulação forçada

Para determinar se a tubulação forçada está adequada as condições de operação indicadas pela Eletrobrás (2000), utilizou-se da Equação 2, Equação 3 e Equação 8, à fim de se encontrar a espessura mínima da tubulação, a pressão hidrostática interna e velocidade de escoamento do fluido, respectivamente.

3.2.8 Altura de sucção

Conforme abordado no item 2.6.4.1, a altura de sucção deve ser definida a fim de se evitar o fenômeno da cavitação, conforme limite admissível informado pelo fabricante.

3.2.9 Potencial hidrelétrico instalado

Com a escolha do grupo gerador (turbina e gerador), foi possível estimar o potencial hidrelétrico instalado, de acordo com a Equação 19 e dados informados pelos fabricantes.

3.2.10 Viabilidade econômica de reativação

Para determinar a viabilidade econômica do investimento a ser feito para reativação da Minicentral Hidrelétrica, devem ser analisados os indicadores de VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e Tempo de Recuperação de Capital (Payback).

Para que o investimento seja economicamente viável, o VPL (Valor Presente Líquido) deve ser maior que zero, e a TIR (Taxa Interna de Retono) deve ser maior que a TMA (Taxa mínima de atratividade).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a aplicação dos métodos propostos no encaminhamento metodológico, os resultados obtidos podem ser descritos através dos seguintes tópicos:

4.1 LOCAL DA CASA DE MÁQUINAS

Conforme abordado no item 3.2.2, a casa de máquinas fica localizada logo após a queda d'água, visando um maior desnível geográfico e consequentemente uma maior queda de projeto, conforme demonstra a **Figura 20** e **Figura 21**.

Figura 20: Localização da casa de máquinas.



(Fonte: Autor, 2018)

Figura 21: Foto panorâmica da localização da casa de máquinas.



(Fonte: Autor, 2018).

4.2 DEMANDA ENERGÉTICA TOTAL

Para a determinação da demanda energética foram levantados todos os equipamentos consumidores de energia na propriedade, sendo composto por uma casa, um galpão de máquinas, trinta e seis aeradores, e duas motobombas responsáveis pela renovação de água dos tanques.

A **Tabela 8** mostra o levantamento de cargas total da propriedade.

Tabela 8: Levantamento de cargas

Equipamento	Potência nominal (W)	Quantidade	Potência parcial (W)
Lâmpadas fluorescentes	20	20	400
Tomadas	100	10	1000
Chuveiro elétrico	8000	1	16000
Ferro elétrico	1000	1	1000
Geladeira	300	1	300
TV	50	2	100
Computador	250	1	250
Máquina de solda	8000	1	8000
Aerador 2cv	1500	36	54000
Motobomba 60cv	45000	1	45000
Motobomba 20cv	15000	1	15000

(Fonte: Autor, 2018).

A demanda total da propriedade foi determinada a partir da somatória de todos os equipamentos consumidores de energia em conjunto, obtendo um valor total de 141,05 kW.

4.2.1 Valor do consumo energético anual

O consumo energético anual foi determinado com base na estimativa de funcionamento dos equipamentos necessários para manter a boa qualidade da água nos açudes da propriedade, sendo fornecidos pelo técnico expedista responsável, estimando um tempo de funcionamento de 12h/dia para as motobombas e 11h/dia para os aeradores, apresentando um consumo de 39.420kWh/mês.

O consumo médio de energia para a residência da propriedade também foi determinado a partir da média dos últimos 10 meses do ano, cujo valor é de 273,10kWh/mês.

Somando-se esses valores, obteve-se um consumo total de energia na propriedade de 39.693,10kWh/mês.

Considerando o valor do kWh rural de R\$ 0,38kWh (Segundo Copel, Nov/2018) e multiplicando por 12 meses, chegou-se ao valor anual de R\$ 181.000,00.

4.3 LEVANTAMENTO HIDROLÓGICO

Para o cálculo da vazão do rio foram efetuadas duas medições da seção transversal do rio, resultando em uma média de 8,4m de largura.

Para o cálculo da profundidade do rio, **Figura 22**, foram realizadas duas séries de dez medições em diferentes pontos. Por se tratar de uma superfície rochosa (laje rochosa) a profundidade média nos diferentes pontos apresentou medidas semelhantes, conforme **Tabela 9**, resultando em uma média de 1,50m.

Figura 22: Leito do rio

(Fonte Autor, 2018).

Tabela 9: Medição da profundidade do rio

Medição	Série 01 (m)	Série 02 (m)
1	1,48	1,54
2	1,45	1,51
3	1,52	1,51
4	1,50	1,45
5	1,50	1,43
6	1,47	1,55
7	1,42	1,58
8	1,46	1,55
9	1,55	1,46
10	1,55	1,44

(Fonte Autor, 2018).

Com os valores de largura e profundidade média, respectivamente, foi encontrada uma área transversal média de 12,6m².

A velocidade de escoamento foi calculada através da medição de cinco séries cronometradas, conforme **Tabela 10**, em um percurso de 10m ao longo do leito do rio, utilizando-se como objeto flutuador uma garrafa PET, parcialmente ocupada por água, atingindo uma média de 9,46s.

Tabela 10: Tempo de deslocamento do flutuador

Medição	Tempo cronometrado (s)
1	9,81
2	10,24
3	9,02
4	8,68
5	9,56

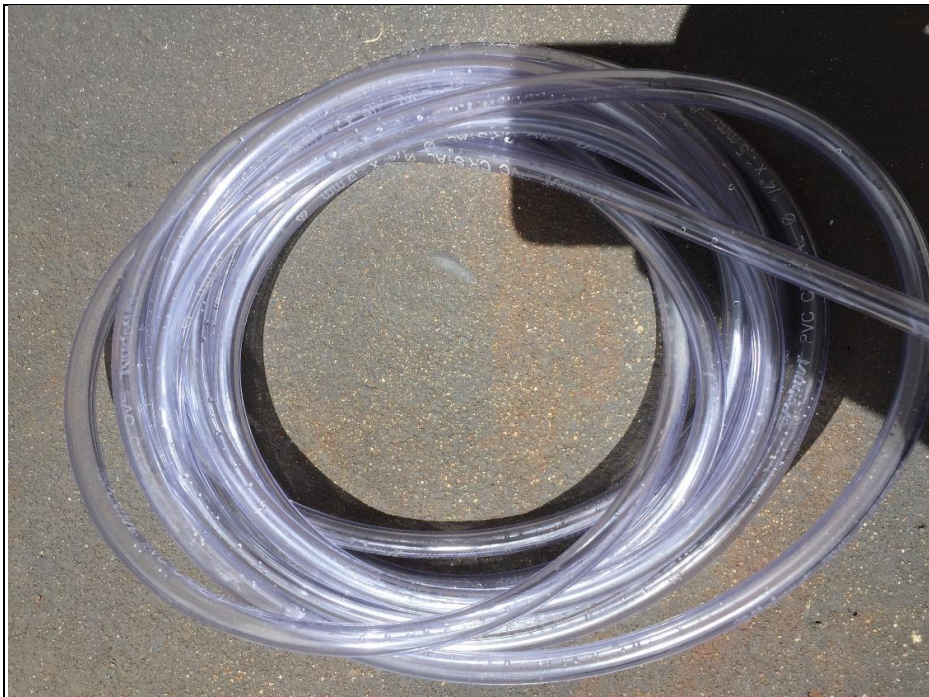
(Fonte:Autor, 2018)

Através da Equação 21, a velocidade média superficial encontrada foi de 1,06m/s. Para córregos com leito irregular, utiliza-se como velocidade média 80% (oitenta por cento) da velocidade superficial calculada, alcançando um valor de 0,85m/s.

Com os valores de velocidade média do rio e área transversal média calculados, foi possível determinar, através da Equação 19, uma vazão disponível equivalente a 10,71m³/s.

4.4 QUEDA BRUTA

Para a realização do levantamento topográfico utilizou-se uma mangueira de nível, conforme **Figura 23**, obtendo uma queda bruta total de 14m.

Figura 23: Mangueira utilizada para medição de nível.

(Fonte: Autor, 2018)

4.5 QUEDA DE PROJETO

Para a determinação da queda líquida ou queda de projeto, adota-se 3% de perda de carga para minicentrals com distância entre o canal de adução e a casa de máquinas de até 80m lineares. O método clássico para cálculo de perda de carga deve ser utilizado quando a distância entre casa de máquinas e tomada d'água exceder 800m. (ELETROBRÁS, 2000).

Para a distância entre a casa de máquinas e o canal de adução de 20m, foi adotado o valor de perda de carga de 3% da queda bruta, totalizando 13,58m de queda líquida.

4.6 POTENCIAL HIDRELÉTRICO DISPONÍVEL

Através dos valores de queda líquida de 13,58m e vazão do afluente de 10,71m³/s, temos que o potencial hidrelétrico disponível no período de medição da vazão (períodos de chuvas regulares e estiagens alteram o valor deste potencial) foi de 1.041,36kW, conforme Equação 23.

Comparando a potência demandada na propriedade, cujo valor é de 141,5kW, é observado um aproveitamento de cerca de 13,59% do potencial disponível.

4.7 SELEÇÃO DA TURBINA / GERADOR

Os dois fabricantes cotados apresentaram a seguinte solução, como se segue, conforme **Tabela 11**.

Tabela 11: Especificações técnicas da turbina-gerador

	Parâmetros	Fabricantes	
		"B&G"	Flessak
Especificações	Modelo da turbina	Francis	Francis
	Potência no eixo da turbina (kW)	180,5	186,5
	Rotação da turbina (RPM)	900	450
	Vazão (m ³ /s)	1,5	1,5
	Diâmetro do rotor (mm)	495	508
	Altura de sucção Hs (m)	3	4
	Rendimento da turbina	90%	93%
	Potencia do gerador (kVA)	-	220
	Rendimento do gerador	-	91%
	Fator de potência	-	0,90

(Fonte: Autor, 2018).

Para o caso da empresa “B&G Tornearia”, fez-se uma cotação de preços considerando apenas a seleção de uma nova turbina, visto que o gerador existente na casa de máquinas se encontra em boas condições de operação.

A compatibilidade de funcionamento do gerador existente com a nova turbina foi considerada no momento da escolha.

A **Figura 24** apresenta o gerador instalado na casa de máquinas.

Figura 24: Gerador da casa de máquinas.



(Fonte: Autor, 2018).

Para que o gerador trabalhe em sua frequência efetiva (60hz), deverá ser feito uma relação de transmissão de 2:1, visto que a turbina selecionada trabalha a 450rpm e o gerador a 900rpm.

A **Tabela 12** informa os dados técnicos do gerador utilizado.

Tabela 12: Dados técnicos do gerador

Dados técnicos	
Fabricante	ASEA
Rotação (RPM)	900
Potência	220kVA
Tensão	440v
Frequência (Hz)	60
Número de polos	8

(Fonte: Autor, 2018)

Já a empresa “Flessak – Trabalhos com energia” apresentou uma cotação de preços considerando apenas equipamentos novos, sendo esses, turbina e gerador.

As propostas técnicas podem ser encontradas detalhadamente nos ANEXOS A e B.

4.8 VERIFICAÇÃO DO CONDUTO FORÇADO

Visto que será mantido o conduto forçado já existente na minicentral, foram feitos os cálculos para verificação, a fim de conferir se o conduto se enquadra nas condições de operação indicadas pela Eletrobrás (2000).

Primeiramente, precisa-se encontrar a carga total sobre a tubulação, onde se considera a soma da queda bruta com a sobrepressão causada pelo golpe de aríete, que segundo Eletrobrás (2016), pode ser considerado como 20% (vinte por cento) da queda bruta, resultando em uma carga total sobre a tubulação de 16,8m.

Seguindo a norma ABNT NBR 6648:2014, a qual define para tubulação em que há a passagem de fluidos pressionados a temperatura ambiente, como aço ASTM A283, com uma tensão admissível resistente a tração no valor de 1400kgf/cm².

Fundamentado pela Equação 3, admitindo um coeficiente para soldas para o pior caso de 0,8 e uma pressão hidrostática máxima interna obtida pela Equação 4 de 1,64kgf/cm², obteve-se uma espessura de parede no valor de 1,68mm. Porém, o conduto forçado existente tem espessura de parede de 10 mm, valor consideravelmente maior que a espessura mínima requerida.

Descontando-se a espessura da tubulação existente com seu diâmetro externo de 655 mm, o diâmetro interno da tubulação será de 635 mm.

Conforme abordado em teoria, a velocidade da tubulação em aço não poderá ser maior que a velocidade máxima admissível de 5,0m/s. Sendo assim, através da Equação 8, com a

vazão de engolimento das turbinas indicadas pelos fabricantes de $1,5\text{m}^3/\text{s}$, chegou-se a uma velocidade média de $4,74\text{m/s}$.

Com a obtenção desses dados, pode-se verificar que a tubulação existente na minicentral atende as condições de operação indicadas pela Eletrobrás.

4.9 ALTURA DE SUCCÃO

Segundo dados fornecidos, para o fabricante “B&G Tornearia”, seu modelo permite um correto funcionamento sem que haja a ocorrência de cavitação no circuito quando operado em uma altura de até 3 metros em relação ao nível d’água do canal de fuga.

Para a turbina Francis do fabricante “Flessak – Trabalhos com energia”, seu modelo permite um funcionamento adequado sem que haja cavitação quando operado em uma altura de até 4 metros em relação ao nível d’água do canal de fuga.

4.10 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Para a proposta da empresa “B&G Tornearia”, o cálculo de viabilidade econômica foi determinado a partir de um fluxo de caixa anual com o valor inicial de R\$ -160.000,00, que seria o valor do investimento para a reativação da Minicentral Hidrelétrica. Considerando uma economia anual de R\$ 181.000,00 devido à autossuficiência da propriedade em geração de energia, conforme item 4.2.1, o mesmo valor foi adotado como entrada no fluxo de caixa em uma projeção de 10 anos.

A taxa mínima de atratividade foi definida pelo proprietário considerando o financiamento feito para os serviços de reativação da usina com juros de 7,0% a.a (Pronanpe 2018/19). Portanto, foi definida uma TMA através da multiplicação da taxa de juros de 7,0% a.a pelo retorno de 60% exigido sem a taxa de juros, obtendo a TMA para este investimento de 11,2% a.a.

O VPL foi determinado pela Equação 26 utilizando os fluxos de caixa e a TMA calculada, resultando em um valor de R\$ 897.070,31.

A TIR foi calculada através da ferramenta Excel com o auxílio da “Função TIR”, onde as variáveis foram alimentadas com os valores do fluxo de caixa, obtendo-se um valor de 113%.

Para o cálculo do Payback Descontado foi necessário determinar o saldo do projeto durante cada ano. Para isso, soma-se o fluxo de caixa do ano avaliado com o VPL do ano

seguinte. O saldo do projeto é negativo no início devido ao investimento de recursos, porém, se o investimento gerar uma boa rentabilidade este valor tende a se tornar positivo, representando o tempo de retorno em que o investimento irá se pagar.

Para a obtenção do Payback é necessário que se divida o último saldo negativo pelo VPL do ano seguinte, e seu resultado somado ao último ano em que o saldo é negativo. Deste modo, obteve-se um retorno de investimento em aproximadamente um ano, conforme se segue na **Tabela 13** e **Tabela 14**.

Tabela 13: Fluxo de caixa do investimento proposta B&G

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente Líquido	Saldo
0	-R\$ 160.000,00	-R\$ 160.000,00	-R\$ 160.000,00
1	R\$ 181.000,00	R\$ 162.769,78	R\$ 2.769,78
2	R\$ 181.000,00	R\$ 146.375,71	R\$ 149.145,49
3	R\$ 181.000,00	R\$ 131.632,83	R\$ 280.778,32
4	R\$ 181.000,00	R\$ 118.374,85	R\$ 399.153,16
5	R\$ 181.000,00	R\$ 106.452,20	R\$ 505.605,36
6	R\$ 181.000,00	R\$ 95.730,40	R\$ 601.335,76
7	R\$ 181.000,00	R\$ 86.088,48	R\$ 687.424,24
8	R\$ 181.000,00	R\$ 77.417,70	R\$ 764.841,94
9	R\$ 181.000,00	R\$ 69.620,24	R\$ 834.462,18
10	R\$ 181.000,00	R\$ 62.608,13	R\$ 897.070,31

(Fonte: Autor, 2018).

Tabela 14: Indicadores econômicos proprosta B&G

Indicadores	
TIR = 113%	Payback Descontado
VPL = R\$ 897.070,31	0,98 anos
TMA = 11,2%	

(Fonte: Autor, 2018).

Para a proposta da empresa “Flessak”, a viabilidade econômica foi determinada a partir de um fluxo de caixa anual com o valor inicial de R\$ -630.000,00, que será o valor a ser investido na minicentral hidrelétrica caso essa proposta seja a mais viável.

Para uma projeção de 10 anos, foi adotado o valor de R\$ 181.000,00 de entrada anual no fluxo de caixa devido à autossuficiência da propriedade em geração de energia, conforme abordado no item 4.12.1.

O Valor Presente Líquido foi calculado através da Equação 26, onde se utilizou o TMA definido anteriormente de 11,2% a.a e a projeção do fluxo de caixa para 10 anos, resultando em um valor de R\$ 427.070,31.

A Taxa Interna de Retorno foi determinada pela ferramenta Excel, alimentando as variáveis na função “TIR”, onde se obteve um valor de 26%.

Após a determinação do saldo do projeto durante cada ano, o cálculo do Payback Descontado foi realizado. Para isso, o fluxo de caixa do ano avaliado é somado com o VPL do ano seguinte.

Para o cálculo do Payback foi necessário dividir o último saldo negativo pelo VPL do ano seguinte, e seu resultado somado ao último ano em que o saldo é negativo. Desta forma, o retorno de investimento foi obtido em aproximadamente 4,67 anos, segundo **Tabela 15** e **Tabela 16**.

Tabela 15: Fluxo de investimento proposta Flessak

Ano	Fluxo de Caixa	Valor Presente Líquido	Saldo
0	-R\$ 630.000,00	-R\$ 630.000,00	-R\$ 630.000,00
1	R\$ 181.000,00	R\$ 162.769,78	-R\$ 467.230,22
2	R\$ 181.000,00	R\$ 146.375,71	-R\$ 320.854,51
3	R\$ 181.000,00	R\$ 131.632,83	-R\$ 189.221,68
4	R\$ 181.000,00	R\$ 118.374,85	-R\$ 70.846,84
5	R\$ 181.000,00	R\$ 106.452,20	R\$ 35.605,36
6	R\$ 181.000,00	R\$ 95.730,40	R\$ 131.335,76
7	R\$ 181.000,00	R\$ 86.088,48	R\$ 217.424,24
8	R\$ 181.000,00	R\$ 77.417,70	R\$ 294.841,94
9	R\$ 181.000,00	R\$ 69.620,24	R\$ 364.462,18
10	R\$ 181.000,00	R\$ 62.608,13	R\$ 427.070,31

(Fonte: Autor, 2018)

Tabela 16: Indicadores econômicos proposta Flessak

Indicadores	
TIR =	26% Payback Descontado
VPL =	R\$ 427. 070,31 4,67 anos
TMA =	11,2%

(Fonte: Autor, 2018).

Com base nesses dados, para ambos os fornecedores o investimento se mostrou viável ($TIR > TMA$).

Porém, a proposta fornecida pela “B&G Tornearia” apresentou um valor de investimento consideravelmente menor, com retorno de investimento financeiro ainda no primeiro ano e VPL 2,1 vezes maior em relação ao da empresa “Flessak”.

Levando em consideração esses critérios, além da capacidade de imediato atendimento mediante problemas de funcionamento e disponibilidade para fornecimento de peças sobressalentes, a empresa escolhida para a reativação da minicentral foi a “B&G Tornearia”.

O fato de que a minicentral será reativada apenas para atender a demanda energética da propriedade também foi considerado.

4.11 POTENCIAL ELÉTRICO INSTALADO

Com os valores do rendimento da turbina de 90% e vazão de descarga turbinada de $1,5\text{m}^3/\text{s}$, fornecidos na Tabela 12. Considerando um rendimento de 90% para o gerador e queda líquida de 13,58m, através da Equação 22 verificou-se um potencial elétrico instalado de 161,86kW.

O rendimento adotado para o gerador é um valor conservador, considerando o indicado no Manual de Minicentraís Hidrelétricas da Eletrobrás (2000), cujo valor adotado é de 96% para geradores de até 1MVA.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De um modo geral, pode se afirmar que o presente estudo atingiu seus objetivos pressupostos, o qual se propôs uma propriedade rural autossuficiente, gozando do aproveitamento hidráulico local como fonte energética, garantindo o suprimento total de energia demandada para a propriedade.

O estudo econômico apresentou grande viabilidade na implantação do projeto de reativação, apresentando um custo de investimento relativamente baixo e um considerável retorno financeiro.

Há de se observar que, para um estudo de viabilidade mais preciso, um levantamento de custos com manutenção e operação deveria ser feito. Porém, devido à falta de informações na literatura e dificuldade para levantamento preciso desses custos, o mesmo não foi considerado.

Futuramente, um novo estudo econômico poderá ser feito para analisar a viabilidade de implantação da minicentral hidrelétrica no mercado livre de energia, setor que atualmente está em grande fase de expansão, sendo uma ótima oportunidade para aumentar seus lucros e rendimentos. Porém, necessita de um maior investimento, devido à necessidade de um controle mais preciso sobre a central geradora.

Portanto, tanto o objetivo geral quanto os objetivos específicos do presente trabalho foram atingidos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo de viabilidade econômica para implantação da minicentral hidrelétrica no mercado livre de contratos de energia.
- Projeto de viabilidade econômica para dimensionamento de central fotovoltaica na propriedade.
- Estudo de eficiência energética voltado a melhoria na capacidade de geração da minicentral hidrelétrica.
- Estudo de viabilidade econômica para implantação de sistema de monitoramento analógico na central geradora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBARELLO, L. **Guia para a implantação de pequenas centrais hidrelétricas – PCHs**. UFSM, Panambi, 2014.

ANEEL. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. 3^a. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

AZEVEDO NETTO, M. D. **Manual de Hidráulica**. 8^a. ed. São Paulo: Blucher, 1998.

BIANCHINI, B. J. **Estudo de viabilidade financeira na implantação de um aviário modelo dark house em uma propriedade rural no município de Nova Bréscia**. Lajeado: UNIVATES, 2014.

CASAROTTO FILHO, Nelson C.; KOPITTTKE, Bruno H. **Análise de Investimentos**. 10 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

DUTRA, K. Máquinas hidráulicas, Aula 14 - Turbinas hidráulicas, 12 Junho 2016. Disponível em: <https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2016/02/mh_aula-14_turbinas-hidrc3a1ulicas.pdf>.

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

ELETROBRÁS. **Manuais e diretrizes para estudos e projetos**. 2017. Disponível em: <<http://eletronbras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>

HACKER. Gerando energia, compromisso com o futuro. Disponível em: <<http://www.hacker.ind.br>>

HIRSCHFELD, H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 14^a. ed. São Paulo: Globo, 2000.

LIMA, S. Padronização de Projetos Elétricos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. **UNIFEI**, Itajubá, 2002.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

MATARAZO C. D. **Análise Financeira de Balanços: Abordagem básica e gerencial**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MOTTA, Regis R; CALÔBA, Guilherme M. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 2002.

PANORAMA DA AQUICULTURA. Importância de recirculadores na piscicultura. . Disponível em:

<<http://www.panoramadaaquicultura.com.br/edicoes2008.>>

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

SCHREIBER, Gerhard Paul. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Rio de Janeiro: ENGEVIX, 1987.

SILVA, Francimar N.; FERREIRA, Marco A. M.; PAZZINI, Felipe L. S.; ABRANTES, Luis A. **Abordagem Determinística e de Simulação de Risco como Instrumentos de Análise de Viabilidade Financeira em Investimentos Imobiliários**. Revista de Negócios da FURB, Blumenau, v.12, n.3, p.03-17, 2007.

SOUZA, Zulcy; SANTOS, Afonso H. M.; BORTONI, Edson da C. **Centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1999.

SOUZA, Acilon B. **Projetos de Investimento de Capital: Elaboração, Análise e Tomada de Decisão**. São Paulo: Atlas, 2003.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Turbina Francis**. Disponível em:

<<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/turbina2.htm>>

ANEXO A – PROPOSTA COMERCIAL FLESSAK


FLESAK ELETRO INDUSTRIAL S/A.

 CNPJ 77.804.599/0001 - 40 Insc. Est. 32.100794 - 58
 Av. Duque de Caxias, 282 Bairro Alvorada
 85601 - 190 Francisco Beltrão Paraná

 www.flessak.com.br
 (046) 3520 1060

Francisco Beltrão, 31 de outubro de 2018. AAAA:Rio Doce CGH/Gerador

Proposta nº 18.557.0

 À
 CGH Rio Doce
 A/C
 Sr. Lucas Cara Garcia

Ref.: Orçamento de geradores – CGH Rio Doce

I - ESCOPO DE FORNECIMENTO:

Gerador síncrono trifásico, com tecnologia, projeto e fabricação FLESAK. Com construção horizontal, autoventilado, unidirecional. Ligação em estrela. Classe de isolamento "F" (155°C) e elevação de temperatura 80°C. Sistema de excitação estática.

CGH	Rio Doce
Quantidade	01
Construção	Horizontal
Potência (kVA)	220
Tensão (V)	380
Frequência (Hz)	60
Rotação (rpm)	450
Fator de potência	0,9
Rendimento (100% carga, $\cos\phi=0,9$)	91,0%
Base para mancais	Sim
Rotor em balanço	Não
Mancais	02 guias
Tipo dos Mancais	Rolamento
Código FINAME	2080380
Classificação Fiscal	85.01.62.00

NOTAS TÉCNICAS

- ✓ Caixas terminal de fase, neutro e sinais.
- ✓ Três sensores de temperatura, tipo Pt100, por fase, nas bobinas do estator.
- ✓ Um sensor de temperatura, tipo Pt100, no pacote magnético.
- ✓ Um sensor de temperatura, tipo Pt100, por mancal.
- ✓ Resistência de aquecimento, com potência adequada ao porte do gerador.
- ✓ Suportes de fixação do gerador;
- ✓ Comissionamento – um técnico por período máximo de cinco dias por gerador.
- ✓ Montagem mecânica do gerador;

Considerações:

- Em caso de interrupção nos trabalhos destes profissionais por motivos alheios à Flessak, será apresentado relatório constando os trabalhos já executados e o motivo da parada, e avaliado o possível retorno da equipe técnica à matriz, até o restabelecimento das condições de trabalho. Os custos de deslocamento, assim como eventuais diárias técnicas serão repassados ao cliente;

ANEXO A – (CONTINUAÇÃO) PROPOSTA COMERCIAL FLESSAK

**FLESSAK ELETRO INDUSTRIAL S/A.**

CNPJ 77.804.599/0001 - 40 Insc. Est. 32.100794 - 58
 Av. Duque de Caxias, 282 Bairro Alvorada
 85601 - 190 Francisco Beltrão Paraná

- O equipamento de içamento (ponte rolante) deverá estar disponível e em perfeito funcionamento para nossa equipe de montagem;
- O equipamento de içamento (ponte rolante), deverá ser acionado eletricamente, caso seja manual será cobrado taxa adicional devido tempo maior para montagem;
- Em caso de não existência ou indisponibilidade da ponte rolante a Flessak reserva-se no direito de não realizar a montagem.
- ✓ Balanceamento dinâmico, em dois planos de simetria;
- ✓ Ensaio de rotina, conforme NBR 5117:
 - Resistência de isolamento dos enrolamentos;
 - Resistência ôhmica dos enrolamentos, a frio;
 - Tensão suportável;
 - Equilíbrio de tensões;
 - Sequência de fases;
 - Saturação em vazio;
 - Curto-circuito trifásico permanente;
- ✓ Documentos a fornecer:
 - Folha de dados elétricos;
 - Desenho dimensional geral externo;
 - Desenho do eixo e dados (Velocidade crítica);
 - Desenho das placas de ancoragem;
 - Desenho do conjunto (estator/roto);
 - Desenho da sequência de montagem (**obs.:** Será necessário desenho em dwg da casa de força e capacidade da ponte rolante com antecedência mínima de 30 dias antes do envio deste desenho). (**obs.:** O fornecimento deste desenho será realizado caso não seja eixo único entre turbina e gerador e a carcaça do gerador seja de nossa fabricação);
 - Manual de montagem, operação e manutenção do gerador;
 - Desenho do(s) mancal(is);
 - Desenho da posição da caixa(s) de ligação(ões) e acessórios;
 - PIT – Plano de Inspeção e Testes;

ANEXO A – (CONTINUAÇÃO) PROPOSTA COMERCIAL FLESSAK

**FLESSAK ELETRO INDUSTRIAL S/A.**

CNPJ 77.804.599/0001 - 40 Insc. Est. 32.100794 - 58
 Av. Duque de Caxias, 282 Bairro Alvorada
 85601 - 190 Francisco Beltrão Paraná

II - CONDIÇÕES COMERCIAIS

Os preços apresentados nesta proposta são válidos para as quantidades e especificações indicadas, diretamente vinculadas ao cumprimento dos eventos financeiros previstos nas condições de pagamento.

Descrição	Qtd.	Valor Total
Gerador horizontal - 220kVA - 450 rpm - 380 V	1	R\$ 260.000,00
Turbina Francis - 450 rpm - horizontal	1	R\$ 350.000,00
Instalação		R\$ 20.000,00
TOTAL TURBINA-GERADOR		R\$ 630.000,00

Esta proposta é válida como intenção de compra após assinada, e terá força contratual entre as partes.

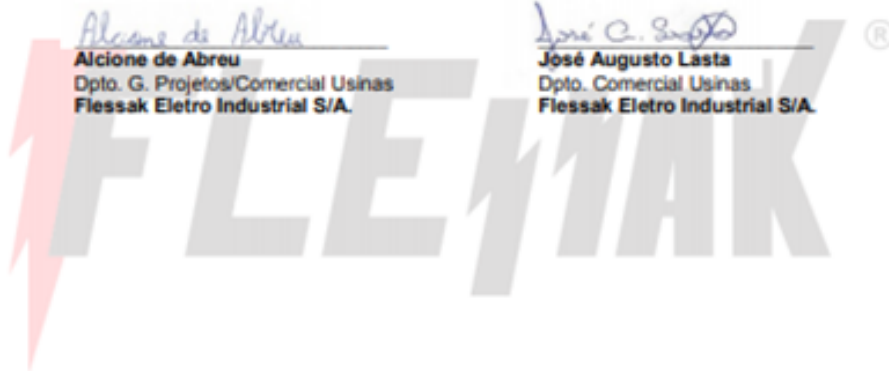
Francisco Beltrão, 31 de outubro de 2018.

Nome: _____
CGH Rio Doce

Nome: _____
CGH Rio Doce

Alicione de Abreu
 Alicione de Abreu
 Dpto. G. Projetos/Comercial Usinas
 Flessak Eletro Industrial S/A.

José Augusto Lasta
 José Augusto Lasta
 Dpto. Comercial Usinas
 Flessak Eletro Industrial S/A.



ANEXO B – PROPOSTA COMERCIAL B&G TORNEARIA**B&G TORNEARIA****Paulo E. F. Boaretto & Cia Ltda**

Cidade: Nova Aurora – Pr

CEP: 85410-000

Tel: (45) 99812-2515

Cliente: Lucas Cara Garcia

CGH Rio Doce

Ref.: Orçamento de revitalização CGH

- Instalação Turbina Francis
- Revisão no gerador

Descrição	Valor Total
Turbina Francis - 450 RPM - rotor 495 mm	R\$ 135.000,00
Revisão do gerador	R\$ 7.000,00
Instalação	R\$ 18.000,00
Valor Total	R\$ 160.000,00

Nova Aurora, 05 de setembro de 2018.

M. Boaretto