

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIA EXATAS E ENGENHARIAS

DANIEL SERAFIN

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROTURBINA HIDRÁULICA
PELTON EM UMA BARRAGEM DE PEQUENO PORTE DE UMA PROPRIEDADE
RURAL**

BENTO GONÇALVES

2020

DANIEL SERAFIN

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROTURBINA HIDRÁULICA
PELTON EM UMA BARRAGEM DE PEQUENO PORTE DE UMA PROPRIEDADE
RURAL**

Trabalho apresentado como requisito final
para aprovação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso II da Universidade de
Caxias do Sul no curso de Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Jean Greselle
Balotin

BENTO GONÇALVES

2020

DANIEL SERAFIN

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA MICROTURBINA HIDRÁULICA
PELTON EM UMA BARRAGEM DE PEQUENO PORTE DE UMA PROPRIEDADE
RURAL**

Trabalho apresentado como requisito final
para aprovação na disciplina Trabalho de
Conclusão de Curso II da Universidade de
Caxias do Sul no curso de Engenharia
Mecânica.

Banca Examinadora

Prof. Me. Jean Greselle Balotin
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. André Carlos Contini
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Evandro Paese
Universidade de Caxias do Sul – UCS

BENTO GONÇALVES

2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Luis e Clarice, por todo o apoio, por sempre acreditarem no meu sucesso acadêmico e profissional, por se sacrificarem tanto para tornar esse sonho realidade, por todo amor, carinho e conselhos, além da compreensão pelas vezes que a faculdade me fez ausente, enfim, minha gratidão eterna.

Ao meu irmão Cássio, por todo o apoio, por sempre torcer pelo meu sucesso acadêmico, pessoal e profissional, por toda amizade e união, além das inúmeras dicas e orientações durante o período acadêmico.

Ao meu orientador, professor Jean Greselle Balotin, pela confiança, disponibilidade, apoio e dedicação, que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho. Com sua ajuda, passo por essa importante etapa da minha vida.

A minha namorada, Tainara Brun, por sempre acreditar em mim, apoiar, incentivar, pela companhia e auxílios durante os testes experimentais, pelas conversas e risos nos momentos de preocupações, enfim, por todo amor, sou imensamente grato por você.

Agradeço a todos os meus familiares, por sempre estarem presentes, pelos conselhos e ensinamentos, que, com certeza fizeram com que eu me tornasse uma pessoa melhor. Aos meus amigos, pela parceria e apoio, enfim, pela amizade verdadeira. A todos os professores, técnicos dos laboratórios, funcionários e colegas da UCS, que pude conhecer e adquirir muito conhecimento. Todos contribuíram muito durante minha trajetória acadêmica, tornando-a mais prazerosa e agradável.

RESUMO

A utilização da energia contida nos fluidos tem sido fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Atualmente, com a crescente demanda de energia elétrica, pequenos projetos hidrelétricos com baixo custo de fabricação e fácil instalação, tornam-se uma solução atrativa em lugares afastados de grandes centros. As turbinas hidráulicas são equipamentos projetados especificamente para transformar a energia hidráulica de um fluxo de água em energia mecânica na forma de torque e velocidade de rotação, resumindo, transformam força e pressão da água em energia elétrica. São utilizadas em situações onde exista uma vazão sob pressão ou em desnível e a faixa de operação é ampla, podendo ser em uma queda abaixo de 20 m até acima de 1000 m. Tendo em vista isso, o presente trabalho apresenta o dimensionamento, projeto, construção e testes de uma microturbina hidráulica Pelton em uma barragem de pequeno porte de uma propriedade rural. A turbina pode ser de grande utilidade complementando o abastecimento energético de pequenas residências, desde a utilização para alguns equipamentos internos e armazenamento de produtos, assim como em serviços gerais necessários em propriedades rurais. Ao finalizar, construiu-se a turbina Pelton conforme projeto e dimensionamento, pôde-se comparar com dados teóricos e verificar a produção de energia. Ao analisar, verificou-se que a turbina obteve um rendimento de apenas 24,5% comparando com o potencial hidrelétrico do local. Entretanto, entende-se que efetuando algumas alterações no projeto, pode-se aumentar significativamente os resultados, tornando possível a utilização em pequenas residências e serviços na propriedade rural.

Palavras-chave: Energia elétrica. Turbina Hidráulica. Microturbina Pelton. Dimensionamento.

ABSTRACT

The use of energy contained in fluids has been fundamental for the development of humanity. Nowadays, with the growing demand for energy, hydroelectric projects with low manufacturing cost and easy installation become an attractive solution in places far from large centers. Hydraulic turbine are equipment specifically designed to transform the hydraulic energy of a water flow into mechanical energy in the form of torque and speed of rotation, in short, transforming the force and pressure of water into electrical energy. They are used in situations where there is a flow under pressure or in unevenness and the operating range is wide, and it can be in a drop below 20 meters up to above 1000 meters. In view of this, the present work presents the dimensioning, design, construction and tests of a Pelton hydraulic micro turbine in a small dam of a rural property. The turbine can be of great use in complementing the energy supply of small residences, from the use for some internal equipment and storage of products, as well as in general services needed in rural properties. At the end, the Pelton turbine was built according to the design and dimensioning, it was possible to compare with theoretical data and verify the energy production. When analyzing, it was found that the turbine obtained a yield of only 24,5% compared to the hydroelectric potential of the site. However, it is understood that by making some changes in the project, the results can be significantly increased, making it possible to use them in small residences and services on the rural property.

Keywords: Electrical energy. Hydraulic turbines. Micro Pelton turbine. Dimensioning.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Local de desenvolvimento da turbina hidráulica | 14 |
| Figura 2 - Desenho esquemático do projeto na propriedade rural..... | 14 |
| Figura 3 - Consumo de energia da residência durante o período de ago. 2018 a jul. 2019..... | 15 |
| Figura 4 - Sistema diretor e rotor de uma turbina hidráulica do tipo Pelton | 18 |
| Figura 5 - Desenho esquemático de uma roda Pelton | 23 |
| Figura 6 - Gráfico para determinação do número de jatos de uma turbina Pelton | 27 |
| Figura 7 - Detalhamento da pá de uma roda Pelton | 30 |
| Figura 8 - Ângulos da pá | 31 |
| Figura 9 - Bico injetor de uma turbina Pelton | 32 |
| Figura 10 - Agulha e ponta do bocal de um bico injetor | 33 |
| Figura 11 - Fluxograma de atividades | 35 |
| Figura 12 - Modelagem do projeto da turbina Pelton..... | 37 |
| Figura 13 - (a) Rotor Pelton montado. (b) Pá do rotor usinada..... | 38 |
| Figura 14 - (a) Bico injetor modelado. (b) Bico injetor fabricado e montado..... | 38 |
| Figura 15 - (a) Dinamômetro modelo DD-300. (b) Tacômetro modelo MDT-2238A..... | 39 |
| Figura 16 - Equipamentos utilizados para analisar a geração de energia..... | 40 |
| Figura 17 - Turbina Pelton instalada na propriedade rural | 40 |
| Figura 18 - Testes realizados com o gerador em laboratório | 45 |
| Figura 19 - Comparação da velocidade de rotação..... | 45 |
| Figura 20 - Comparação entre potência estimada e encontrada experimentalmente | 46 |
| Figura 21 - Comparação entre potência da turbina e potência encontrada em laboratório utilizando 370 rpm..... | 47 |
| Figura 22 - Estimativa da potência com o aumento da velocidade de rotação da turbina..... | 47 |
| Figura 23 - Comparação da força do jato d'água | 48 |
| Figura 24 - Aumento de vazão para 0,012 m ³ /s..... | 49 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classificação das centrais hidrelétricas | 20 |
| Tabela 2 - Classificação das PCHs de acordo com a potência e queda de projeto..... | 20 |
| Tabela 3 - Classificação das turbinas hidráulicas | 22 |
| Tabela 4 - Valores de η_A indicados para turbinas hidráulicas. | 25 |
| Tabela 5 - Rendimento de uma turbina Pelton | 26 |
| Tabela 6 - Dados iniciais do local da implementação a turbina | 35 |
| Tabela 7 - Dados iniciais do dimensionamento do rotor Pelton..... | 42 |
| Tabela 8 - Dimensionamento da pá da turbina Pelton..... | 43 |
| Tabela 9 - Dimensionamento do bico injetor | 43 |
| Tabela 10 - Dados resultantes da microcentral hidrelétrica | 44 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| P | Potência disponível [W] |
| Q | Fluxo de água [m ³ /s] |
| H | Altura de queda [m] |
| g | Aceleração da gravidade [m/s ²] |
| η | Eficiência do projeto [-] |
| P _h | Potência hidráulica [W] |
| ρ | Massa específica da água [kg/m ³] |
| n _{qA} | Velocidade de rotação específica [-] |
| n | Velocidade de rotação [rpm] |
| Y | Salto energético específico [J/kg] |
| n _s | Velocidade específica [rpm] |
| d | Diâmetro máximo do jato [m] |
| D | Diâmetro da roda [m] |
| a | Número de jatos |
| N | Potência [cv] |
| c ₁ | Velocidade absoluta do jato [m/s] |
| k _c | Coefficiente de bico |
| u ₁ | Velocidade periférica da roda [m/s] |
| k _u | Coefficiente de resistência |
| i | Relação de transmissão |
| D _a | Diâmetro externo do rotor [m] |
| z | Número aproximado de pás |
| b | Largura da pá [m] |
| h | Altura da pá [m] |
| h ₁ | Dimensão complementar [m] |
| h ₂ | Dimensão complementar [m] |
| t | Profundidade da pá [m] |
| a | Largura de abertura da pá [m] |
| k | Deslocamento da pá |
| d _s | Diâmetro de saída do bocal [m] |
| d _r | Diâmetro da seção de entrada do bocal [m] |
| d _e | Diâmetro da entrada do bocal [m] |

| | |
|-------|---------------------------|
| d_h | Diâmetro da haste [m] |
| d_a | Diâmetro da agulha [m] |
| l_a | Comprimento da agulha [m] |
| I | Curso da agulha [m] |
| F | Força do jato d'água [N] |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. | TEMA | 14 |
| 1.2. | JUSTIFICATIVA DO TEMA | 15 |
| 1.3. | OBJETIVOS DO TRABALHO | 16 |
| 1.3.1. | Objetivo geral | 16 |
| 1.3.2. | Objetivos específicos | 16 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1. | MÁQUINAS DE FLUIDO..... | 17 |
| 2.1.1. | Definição de máquina de fluido | 17 |
| 2.1.2. | Principais tipos de máquinas de fluido | 17 |
| 2.2. | MÁQUINAS DE FLUXO | 17 |
| 2.2.1. | Elemento construtivos de uma máquina de fluxo | 18 |
| 2.3. | MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS | 19 |
| 2.3.1. | Definição de centrais hidrelétricas | 19 |
| 2.3.2. | Princípios gerais de funcionamento de uma microcentral hidrelétrica | 19 |
| 2.3.3. | Classificação de microcentrais hidrelétricas | 20 |
| 2.3.4. | Potência de uma microcentral hidrelétrica | 21 |
| 2.4. | TURBINAS HIDRÁULICAS | 21 |
| 2.4.1. | Características e funcionamento das turbinas hidráulicas | 21 |
| 2.4.2. | Potência Hidráulica | 22 |
| 2.4.3. | Classificação das turbinas hidráulicas | 22 |
| 2.5. | TURBINA PELTON | 23 |
| 2.5.1. | Velocidade de rotação específica | 24 |
| 2.5.2. | Rendimento de uma turbina Pelton | 25 |
| 2.5.3. | Determinação número de jatos | 26 |
| 2.5.4. | Velocidade do jato | 27 |
| 2.5.5. | Diâmetro máximo do jato | 27 |
| 2.5.6. | Velocidade periférica da roda | 28 |
| 2.5.7. | Diâmetro da roda | 28 |
| 2.5.8. | Número aproximado de pás | 29 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 2.5.9. | Dimensionamento da pá..... | 29 |
| 2.5.10. | Bico injetor | 32 |
| 2.5.11. | Força do jato d'água..... | 34 |
| 3. | MATERIAIS E MÉTODOS | 35 |
| 3.1. | MÉTODOS PARA DIMENSIONAMENTO DA TURBINA PELTON..... | 35 |
| 3.1.1. | Dimensionamento do rotor Pelton | 36 |
| 3.1.2. | Dimensionamento do bico injetor..... | 37 |
| 3.2. | PROJETO, FABRICAÇÃO E CONTRUÇÃO DA TURBINA | 37 |
| 3.3. | PROCEDIMENTO DE TESTES | 41 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 42 |
| 4.1. | DIMENSIONAMENTO DA TURBINA | 42 |
| 4.2. | COMPARAÇÃO TEÓRICA VERSUS EXPERIMENTAL DA TURBINA | 44 |
| 4.2.1. | Potência e velocidade de rotação | 44 |
| 4.2.2. | Força do jato d'água..... | 48 |
| 4.3. | ANÁLISE COM VARIAÇÃO DE VAZÃO..... | 49 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 50 |
| 6. | TRABALHOS FUTUROS | 51 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a energia contida nos fluidos e a sua utilização econômica têm sido um dos fatores primordiais para o desenvolvimento da humanidade. Tem-se usado essa tecnologia em todo o mundo, por diversas sociedades e culturas, por muitos séculos (HENN, 2006).

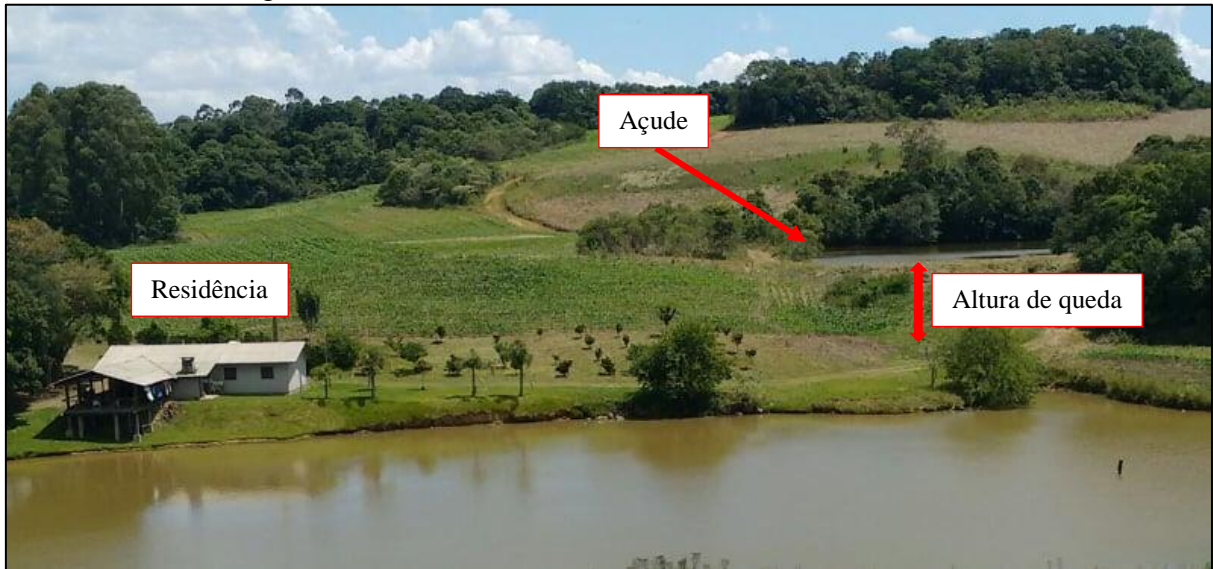
Pequenos aproveitamentos hidroenergéticos, com o propósito de complementar a energia produzida pelas formas atuais, de maneira ambientalmente conveniente e com baixos custos de construção e instalação, em sistemas isolados ou interligados, pode se tornar vantajoso, principalmente no meio rural. Conforme Khennas e Barnett (2000), uma micro-hidrelétrica pode ser considerada uma tecnologia descentralizada de geração de energia usada para o desenvolvimento de um país. Acredita-se que existem milhares de plantas na faixa de “micro” operando com sucesso em diversos países. Assim, pressupõe que os desenvolvimentos destes tipos de centrais tornam-se viáveis.

Com a inovação tecnológica dos equipamentos geradores de energia e a variedade de pequenas turbinas hidráulicas, que atendem o mercado de mini e micro-hidrelétricas, fizeram com que aumentasse o aproveitamento de recursos em locais de baixa altura útil da queda d’água ou pequena vazão (AFSHAR et al, 1990 apud SOSNOSKI, 2015).

Portanto, como atualmente em uma propriedade rural familiar há um açude, o qual a água é proveniente de fontes, assim, permanentemente há uma entrada de água e conseqüentemente uma saída contínua desta água, e logo após o local de saída da água apresenta-se um terreno íngreme, despertou-se o interesse em desenvolver uma microturbina hidráulica Pelton e acoplar um gerador já existente, com a finalidade de aproveitar a queda d’água para gerar energia, dessa forma complementar o abastecimento energético de uma pequena residência ou utilizar a mesma em serviços necessários na propriedade rural.

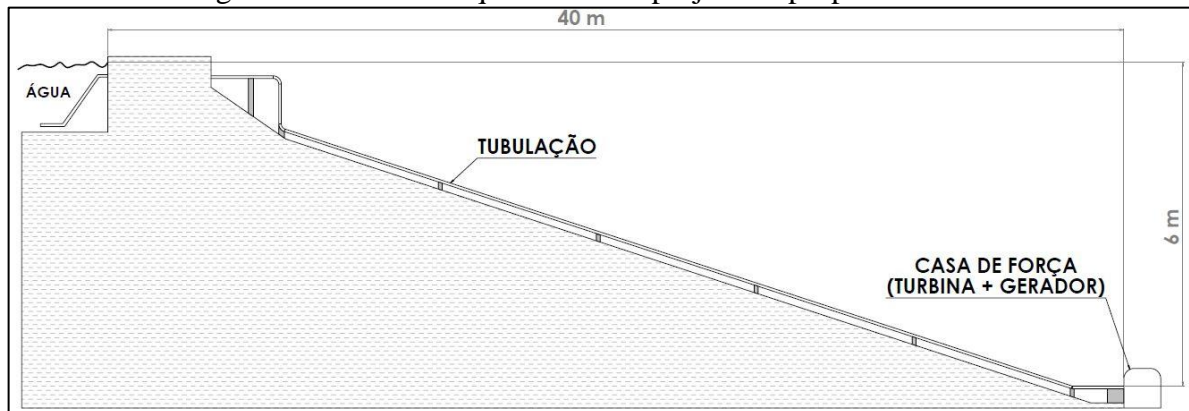
Sabe-se que o fluxo de água disponível na represa é baixo e a turbina hidráulica demanda uma quantidade mínima de água para um melhor rendimento, porém, com um aumento da vazão de saída comprometeria o nível de água do açude. Desta forma, como o objetivo é apenas complementar o abastecimento da residência e, outros serviços na propriedade rural não são realizados com frequência, não haverá necessidade do uso contínuo da turbina para a geração de energia, assim, será utilizada uma tubulação já construída com o intuito de aumentar a vazão nos momentos em que a mesma for utilizada. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, o local onde será desenvolvida a turbina hidráulica e um desenho esquemático com medidas aproximadas do projeto a ser elaborado.

Figura 1 - Local de desenvolvimento da turbina hidráulica



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 2 - Desenho esquemático do projeto na propriedade rural



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Portanto, o desafio é dimensionar e instalar a turbina Pelton de modo a conseguir suprir a demanda de energia com as condições iniciais dispostas, além de verificar possíveis aperfeiçoamentos, caso necessário, para aumentar a geração de energia.

1.1. TEMA

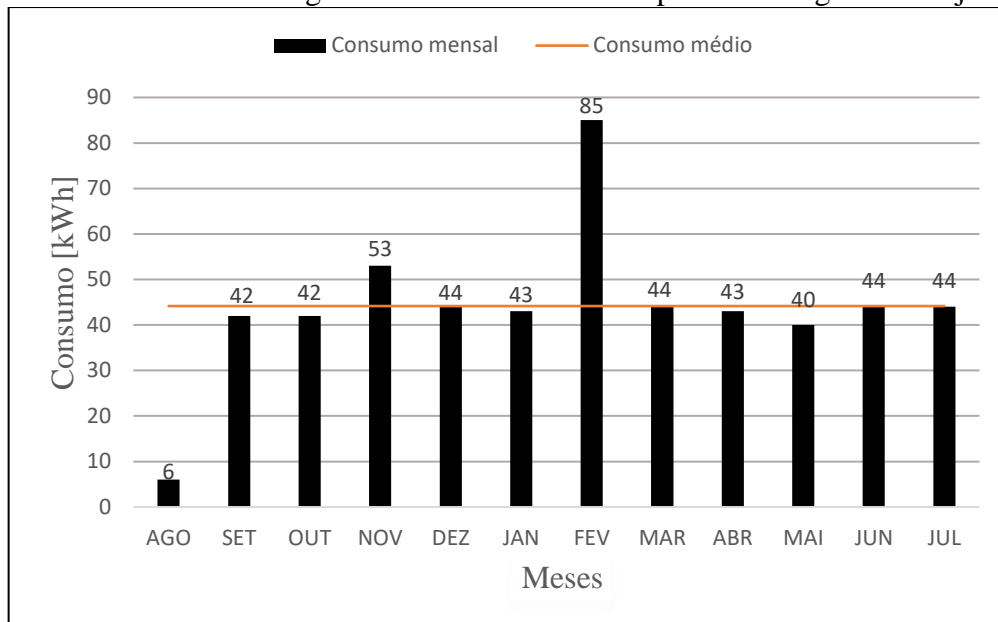
Projeto e implementação de uma microturbina hidráulica Pelton a ser utilizada em uma represa de pequeno porte.

1.2. JUSTIFICATIVA DO TEMA

Partindo das informações mencionadas anteriormente, o presente trabalho propõe a construção de uma microturbina hidráulica, para que desta maneira, o potencial hidroenergético possa ser aproveitado com o intuito de gerar energia para complementar o consumo energético de uma residência ou gerar energia o suficiente para atender a demanda de outros serviços em propriedades rurais. Além de tomar como base este projeto para saber a viabilidade de possíveis construções em locais com dimensões similares distantes de grandes centrais hidrelétricas.

A Figura 3 apresenta o consumo de energia da residência no período de 1 ano, de agosto de 2018 a julho de 2019. O consumo médio mensal foi de 44,16 kWh.

Figura 3 - Consumo de energia da residência durante o período de ago. 2018 a jul. 2019



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Sabendo que na residência há um consumo baixo de energia e que está localizada no interior de seu município, entende-se que foram gastos valores elevados para a construção e instalação da linha de transmissão, desta forma percebe-se que o desenvolvimento de micro-hidrelétricas abateria esses gastos e tornam-se fontes de energia ideal para regiões remotas.

Em relação ao agronegócio, para facilitar e reduzir tempo de execução, algumas atividades necessitam o uso da eletricidade, que geralmente não é entregue em toda a propriedade. Estendendo o alcance, entende-se que haveria aumento de produção e maior comodidade para o trabalhador. Outro fator significativo é que, em regiões mais afastadas de grandes centros, possíveis necessidades de reparos nas linhas de transmissão, por falta de

eletricidade em algumas localidades, podem demorar muito tempo, acarretando em perdas para produtores rurais que necessitam armazenar seus produtos, pequenas turbinas poderiam substituir a forma convencional nessas ocasiões.

Além disso, muitas pessoas vivem sem o benefício da eletricidade, para essas pessoas, mesmo o acesso a eletricidade limitado em capacidade, deve melhorar drasticamente a qualidade de vida. O nível de equipamentos e serviços médicos seriam melhorados e atualizados mais facilmente.

Neste caso também, a ideia é descentralizar a produção de energia, com equipamentos que não necessitam de tecnologia tão avançada como de hidrelétricas de grande escala, que podem ser considerados simples de instalar, operar e fazer manutenção, para dar conta da crescente demanda de energia vista a cada ano.

1.3. OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1. Objetivo geral

Projeto e instalação de uma microturbina hidráulica Pelton para ser utilizada em uma barragem de pequeno porte de uma propriedade rural.

1.3.2. Objetivos específicos

- a) Coletar informações do local a ser implementada a turbina Pelton;
- b) Dimensionar a turbina Pelton;
- c) Projetar a microcentral hidrelétrica em um *software* CAD, além de definir equipamentos e instrumentações necessárias para avaliar o funcionamento da turbina Pelton;
- d) Fabricar e construir a turbina Pelton conforme projeto;
- e) Instalar, realizar testes na turbina e confrontar os dados com os valores encontrados teoricamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será exposto o referencial bibliográfico fundamental para entender o dimensionamento e o funcionamento de uma microturbina hidráulica Pelton para posteriormente efetuar o desenvolvimento e construção.

2.1. MÁQUINAS DE FLUIDO

2.1.1. Definição de máquina de fluido

Segundo Henn (2006), máquina de fluido é um equipamento que promove a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido, convertendo energia mecânica em energia de fluido ou energia de fluido em energia mecânica. No primeiro caso, em que o nível energético de um fluido aumenta a partir da entrega de energia mecânica, costuma-se denominar máquina de fluido geradora. No segundo caso, em que a energia mecânica é gerada a partir da redução do nível energético de um fluido, a máquina é geralmente chamada de máquina de fluido motora.

2.1.2. Principais tipos de máquinas de fluido

Conforme Domínguez (2012), as máquinas de fluido são divididas geralmente em dois principais tipos através do princípio de funcionamento: as máquinas de deslocamento positivo e as máquinas de fluxo.

As máquinas de deslocamento positivo consistem em uma forma móvel de volume variável que altera a pressão do fluido através da máquina. Neste caso apenas a energia de pressão estática é trocada.

Já nas máquinas de fluxo, por vezes chamadas de máquinas dinâmicas, em momento algum o fluido é confinado. Nesse segundo tipo, são as máquinas em que o momento cinético varia à medida que o fluido passa pelo interior do equipamento.

2.2. MÁQUINAS DE FLUXO

Máquina de fluxo pode ser determinada como um transformador de energia, porém sendo necessariamente o trabalho mecânico uma das formas de energia, onde um fluido, que

em momento algum é confinado, passa pela máquina e entra em contato com um elemento rotativo.

Como exemplos de máquinas de fluxo, pode-se citar: as turbinas hidráulicas, os ventiladores, as bombas centrífugas, as turbinas a vapor, os turbos compressores e as turbinas a gás (HENN, 2006).

2.2.1. Elemento construtivos de uma máquina de fluxo

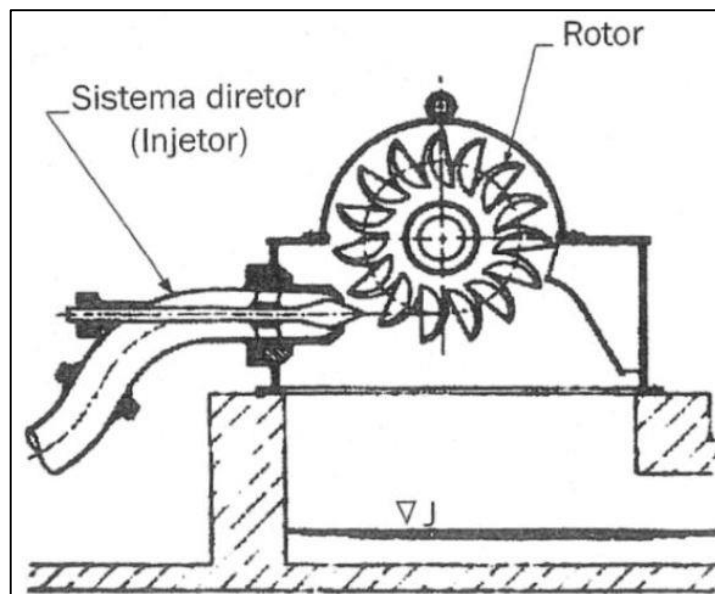
Segundo Henn (2006), nas máquinas de fluxo há determinados elementos construtivos essenciais para o funcionamento do equipamento, tais como:

- Sistemas diretores;
- Rotores.

A função do sistema diretor é coletar o fluido e direcionar por um caminho determinado. Esta função, geralmente, é seguida por outra de transformador de energia. Exemplificando, em uma bomba centrífuga, o sistema diretor de saída é um difusor, que transforma energia cinética em energia de pressão.

Já em uma turbina hidráulica do tipo Pelton, o sistema diretor é um injetor, que ao contrário do difusor mencionado anteriormente, transforma energia de pressão em energia cinética que será encaminhada ao rotor através de jatos orientados. A Figura 4 demonstra o sistema diretor de uma turbina hidráulica do tipo Pelton.

Figura 4 - Sistema diretor e rotor de uma turbina hidráulica do tipo Pelton



Fonte: Henn (2006).

Ainda conforme Henn (2006), o rotor pode ser considerado o principal elemento de uma máquina de fluxo, é responsável pela transformação de energia mecânica em energia de fluido, ou de energia de fluido em energia mecânica. É formado por um número definido de pás giratórias, por onde passa o fluido de trabalho. A Figura 4 mostra o rotor de uma turbina do tipo Pelton.

2.3. MICROCENTRAIS HIDRELÉTRICAS

2.3.1. Definição de centrais hidrelétricas

De acordo com Soares Júnior (2013, p. 5), “Podemos definir uma usina hidrelétrica como um conjunto de obras e equipamentos, cujo fim é a geração de energia elétrica através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio. ”

Segundo Henn (2006), uma central hidrelétrica é constituída basicamente da seguinte forma:

- a) Barragem: tem por finalidade o aumento do nível d'água para produzir uma queda;
- b) Tomada d'água: que é responsável por captar e permitir o acesso da água à tubulação que a levará até turbina;
- c) Casa de força: local onde encontra-se instalados a turbina e o gerador;
- d) Turbina: responsável pela transformação de energia hidráulica em mecânica;
- e) Gerador: responsável por transformar a energia mecânica disponível no eixo da turbina em energia elétrica;
- f) Conduto forçado: responsável por conduzir a água por uma tubulação submetida à pressão interna;

2.3.2. Princípios gerais de funcionamento de uma microcentral hidrelétrica

A geração de energia a partir da água depende de uma combinação de altura e vazão. Ambos necessitam estar acessíveis para produzir eletricidade. A água é direcionada por um conduto até a turbina, a queda da água gera pressão na extremidade inferior do conduto e, emergindo do tubo obtém força para acionar a turbina. A turbina, por sua vez, aciona o gerador, produzindo energia elétrica (SINGH, 2009).

De acordo com Singh (2009), mais vazão ou mais altura de queda, que é a diferença de altitude entre a entrada da água no conduto e a turbina, produz mais eletricidade. A quantidade

de energia elétrica produzida sempre será menor que a entrada de energia da água, devida às ineficiências da turbina e outros equipamentos do sistema, além da perda de pressão durante a queda d'água devido ao atrito entre a água e a tubulação.

2.3.3. Classificação de microcentrais hidrelétricas

Segundo Singh (2009), projetos de energia hidrelétrica são usualmente classificados em pequenas ou grandes hidrelétricas. Diferentes países seguem divergentes normas, assim, no mundo inteiro não há consenso sobre este assunto.

No Brasil, as centrais hidrelétricas são classificadas de acordo com sua potência. As microcentrais hidrelétricas são consideradas as menores, as quais produzem no máximo 100 kW de potência, conforme mostra a Tabela 1 (ELETROBRAS, 2000).

Tabela 1 - Classificação das centrais hidrelétricas

| Classificação de centrais hidrelétricas | |
|------------------------------------------------|----------------------------------|
| Tipo | Capacidade (kW) |
| Grandes centrais | $P > 100000$ |
| Médias centrais | $P = 30000 \text{ kW a } 100000$ |
| Pequenas centrais | $P = 1000 \text{ a } 30000$ |
| Minicentrais | $P = 100 \text{ a } 1000$ |
| Microcentrais | $P \leq 100$ |

Fonte: Adaptado Eletrobrás (2000).

Ainda conforme a Eletrobrás (2000), pequenas centrais hidrelétrica podem ser classificadas também de acordo com a altura de queda e a potência, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das PCHs de acordo com a potência e queda de projeto

| Classificação das centrais | Potência - P (kW) | Altura de queda – H (m) | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------|-------------|
| | | Baixa | Média | Alta |
| Micro | $P < 100$ | $H < 15$ | $15 < H < 50$ | $H > 50$ |
| Mini | $100 < P < 1000$ | $H < 20$ | $20 < H < 100$ | $H > 100$ |
| Pequenas | $1000 < P < 30000$ | $H < 25$ | $25 < H < 130$ | $H > 130$ |

Fonte: Adaptado Eletrobrás (2000).

De acordo com Penche (2004), microcentrais hidrelétricas também podem ser

classificadas como:

- a) Esquemas a fio d'água;
- b) Esquemas com casa de força localizada na base de uma barragem;
- c) Esquemas integrados em um canal ou em um tubo de abastecimento de água.

2.3.4. Potência de uma microcentral hidrelétrica

Conforme Singh (2009), para conhecer o potencial energético de uma microcentral hidrelétrica, é necessário conhecer a quantidade de fluxo de água disponível no local e a altura disponível de queda d'água. A quantidade de água disponível é a quantidade que pode ser desviada através de uma tubulação em um determinado período de tempo. A altura de queda é a diferença vertical no nível através do qual a água passa.

A potência disponível é exatamente proporcional à altura de queda e o fluxo de água disponível, conforme mostra a Equação (1).

$$P = \rho Q H g \eta \quad (1)$$

Onde:

P = potência disponível [W];

Q = fluxo de água disponível [m³/s];

H = altura de queda disponível [m];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

η = eficiência do projeto, considerando a perda de carga do conduto e a eficiência da turbina e do gerador [-].

2.4. TURBINAS HIDRÁULICAS

2.4.1. Características e funcionamento das turbinas hidráulicas

Segundo Singh (2009), a turbina pode ser considerada o principal equipamento de uma central hidrelétrica, pois tem o objetivo de transformar a energia potencial da água em energia mecânica rotacional.

De acordo com Soares Júnior (2013), as turbinas hidráulicas possuem um princípio comum de funcionamento. Geralmente de um reservatório, a água é conduzida de um duto

fechado até um conjunto de palhetas ou injetores que transferem a energia do fluxo de água em potência de eixo. A pressão e a velocidade da água na saída da turbina são menores que na entrada. O eixo do rotor é suportado por mancais. As palhetas podem ser fixas no rotor ou estáticas e podem ser ajustadas para controlar a velocidade de rotação ou o fluxo e a potência gerada.

2.4.2. Potência Hidráulica

A potência hidráulica a disposição da turbina é diretamente proporcional ao fluxo de água e a altura de queda, dada pela Equação (2) (SINGH, 2009).

$$P_h = \rho Q H g \quad (2)$$

Onde:

P_h = potência hidráulica [W];

ρ = massa específica do fluido [kg/m^3].

2.4.3. Classificação das turbinas hidráulicas

Segundo Singh (2009), turbinas hidráulicas podem ser classificadas como máquinas de grande, média ou baixa altura de queda. Porém, geralmente são classificadas pelo princípio de funcionamento segundo a variação de pressão estática, definidas como turbinas de impulso ou ação e reação. A classificação básica das turbinas mais utilizadas é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação das turbinas hidráulicas

| Classificação | Tipo de turbina |
|-----------------|-------------------------------|
| Impulso ou ação | Pelton |
| | Fluxo Cruzado (Michell-Banki) |
| Reação | Francis |
| | Kaplan |

Fonte: Adaptado Singh (2009).

De acordo com Penche (2004), nas turbinas de ação a pressão da água é convertida em energia cinética antes de entrar em contato com as pás do rotor. Geralmente no bocal do conduto

encontra-se um injetor, que converte a pressão da água em um jato de alta velocidade que atinge as pás da turbina, convertendo em força e permitindo que o rotor gire.

Conforme Singh (2009), as turbinas de impulso ou ação são mais usadas para aplicações em micro-hidrelétricas porque possuem várias vantagens, como simples design, melhor acesso às peças de trabalho, além de ser mais fácil de fabricar e manter, conseqüentemente, possuem custos mais baixos de produção.

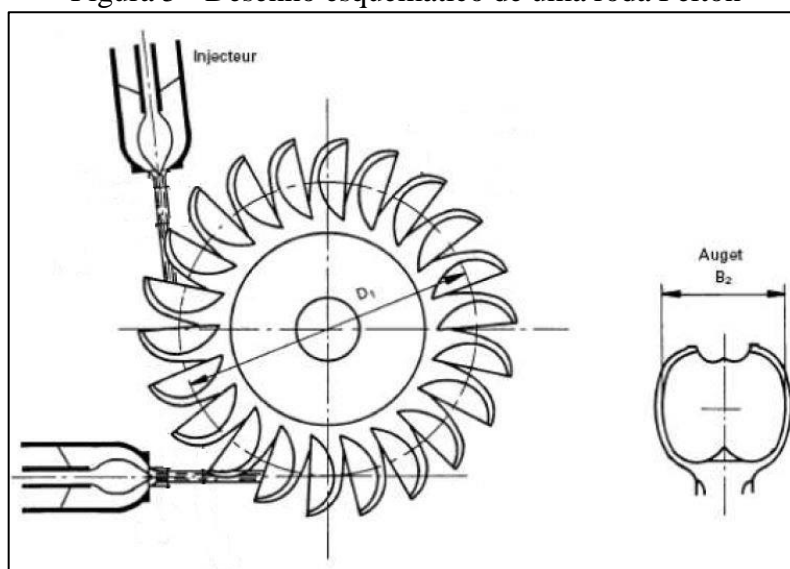
Já nas turbinas de reação a parte rotativa está sempre submersa. A pressão da água aplica uma força na face das pás, que diminui à medida que passa pela turbina. A diferença de pressão na superfície das pás impõe forças que fazem com que o rotor gire (PENICHE, 2004).

As turbinas de reação requerem uma fabricação mais sofisticada, pois envolvem o uso de lâminas maiores e mais intrincadamente perfiladas. Desta forma torna-as menos atrativas para o uso em micro-hidrelétricas. Entretanto, os custos mais altos são geralmente compensados pela alta eficiência (SINGH, 2009).

2.5. TURBINA PELTON

A turbina Pelton é chamada assim devido ao nome de seu idealizador, Lester Allen Pelton. Após realizar diversos ensaios com variados tipos de pás, em 1880, Pelton patenteou a turbina, vendendo seus direitos a uma empresa (MACINTYRE, 1983). A Figura 5 apresenta um desenho esquemático de uma turbina Pelton.

Figura 5 - Desenho esquemático de uma roda Pelton



Fonte: Moreira Costa e Kakazu (2010).

Segundo Penche (2004), turbinas Pelton são turbinas de ação ou impulso em que um ou mais jatos colidem com uma roda que possui um número definido de pás. Cada jato emite água através de um bico injetor com uma válvula de agulha para controle de fluxo. Geralmente são usadas em alturas de queda que variam de 60 a mais de 1000 m.

De acordo com Singh (2009), o impulso resultante do jato emitido pelo bico injetor gira a roda, transmitindo energia para o eixo da turbina. As pás são divididas em duas metades, para que a área central seja capaz de desviar a água do jato que se aproxima.

Essas turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal. O eixo vertical permite a incidência de quatro e seis jatos, enquanto o eixo horizontal permite a incidência de um ou dois jatos, entretanto é mais econômico, pois permite um acesso mais fácil para a inspeção ou manutenção, não havendo necessidade de desmontar a turbina para tais trabalhos (MACINTYRE, 1983).

Conforme Pfleiderer (1979), o melhor rendimento total possível é quando o rotor Pelton com eixo horizontal é acionado por um só jato. Já o eixo vertical permite maiores velocidades e é favorito em grandes instalações.

Para microturbinas Pelton há limites reduzidos, não obrigatórios, mas que podem ser tomados como diretrizes levando em consideração as condições locais de aplicação. Nesses casos pode-se fazer a utilização da turbina em alturas de queda abaixo de 20 metros e vazão de até 0,001 m³/s (EISENRING, 1991).

2.5.1. Velocidade de rotação específica

Conforme Henn (2006, p. 109), o tipo de turbina mais adequado à determinada situação pode ser demonstrado através da velocidade de rotação específica (n_{qA}).

A velocidade de rotação específica está associada à forma e às proporções dos rotores de máquinas de fluxo e o seu valor, além de servir de base para caracterizar séries de máquinas geometricamente semelhantes em catálogo de fabricantes, é fundamental para a seleção do tipo de máquina mais adequado à determinada situação. Isto porque, com base em ensaios de modelos, pesquisadores e fabricantes determinaram faixas de valores de n_{qA} para as quais os diversos tipos de máquinas possuem o seu melhor rendimento.

A velocidade de rotação específica pode ser expressa conforme Equação (3).

$$n_{qA} = 10^3 n \frac{Q^{1/2}}{Y^{3/4}} \quad (3)$$

Onde:

n_{qA} = velocidade de rotação específica ou coeficiente de forma do rotor [-];

n = velocidade de rotação da máquina [rps];

Q = vazão da máquina [m³/s];

Y = salto energético específico [J/kg].

Para a turbina Pelton os valores indicados de n_{qA} são de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de n_{qA} indicados para turbinas hidráulicas.

| Tipo de turbina hidráulica | Valores de n_{qA} |
|----------------------------|---------------------|
| Pelton | $n_{qA} = 5$ a 70 |

Fonte: Adaptado Henn (2006).

Já Macintyre (1983), menciona que poder-se-ia firmar que as rodas Pelton poderiam ser construídas com qualquer velocidade específica, o que não ocorre devido a existência de um limite prático para o valor do raio, que nunca deve ser inferior a três vezes o diâmetro máximo do jato. Acrescenta, que os melhores rendimentos são obtidos para valores de raio específico entre oito a quinze vezes o diâmetro do jato, o que corresponde a velocidades específicas entre 16 a 30 rpm, obtidas pela Equação (4).

$$n_s = 240 \frac{d}{D} \quad (4)$$

Onde:

n_s = velocidade específica [rpm];

d = diâmetro máximo do jato [m];

D = diâmetro da roda [m].

2.5.2. Rendimento de uma turbina Pelton

Segundo Macintyre (1983), para o rendimento total de uma turbina Pelton podem-se

adotar os valores da Tabela 5.

Tabela 5 - Rendimento de uma turbina Pelton

| n_s | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| η | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,84 | 0,83 | 0,81 | 0,77 |

Fonte: Adaptado Macintyre (1983).

Turbinas Pelton de grandes potências têm rendimento total acima de 90%, podendo chegar a 94%.

Eisenring (1991), acrescenta que a eficiência de pequenas turbinas hidráulicas Pelton, fabricadas localmente, normalmente não é tão alta quanto em turbinas de grande escala. Assim recomenda-se calcular parâmetros da turbina com uma eficiência de 0,7 a 0,85, que pode resultar em uma eficiência de 0,5 a 0,6 em algumas instalações com geradores elétricos. Conforme o autor, provou-se razoável calcular com tais eficiências em várias instalações.

Existem muitos fatores que podem influenciar no rendimento de uma turbina, como a organização geométrica e forma das pás, o desalinhamento do jato d'água, perdas na tubulação, desgaste dos componentes, entre outros.

2.5.3. Determinação número de jatos

Conforme Macintyre (1983), as turbinas Pelton podem ser de um, dois, quatro ou até seis jatos. A incidência de jatos sobre o rotor, em cada volta, depende do número dos mesmos, desta forma, quanto maior a queda, menor deverá ser o número de jato, do mesmo modo, quanto maior o número de jatos, maior será a potência para uma mesma queda, porém será maior o desgaste por abrasão, caso a água contiver areia em suspensão.

Para a determinação do número de jatos, Macintyre (1983) sugere a Equação (5).

$$a = \left(\frac{n\sqrt{N}}{25H} \right) \quad (5)$$

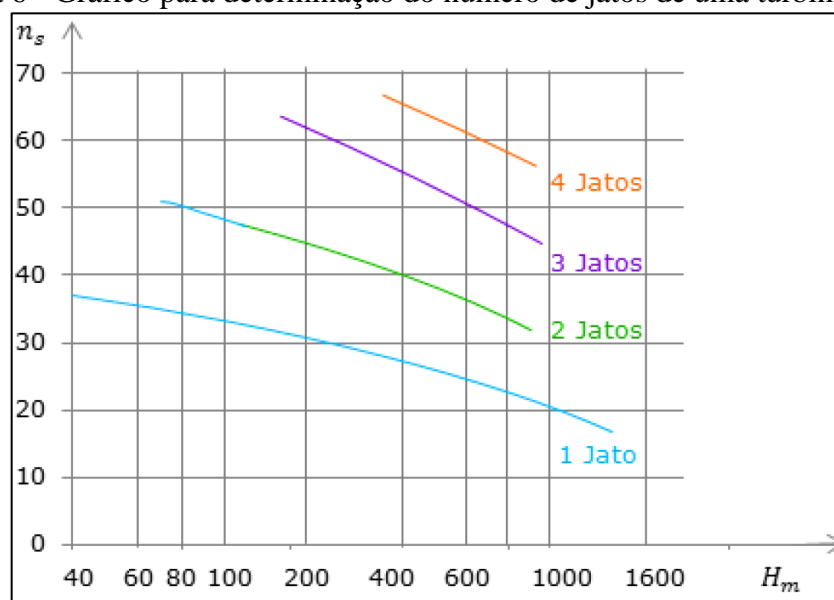
Onde:

a = número de jatos;

N = potência [cv];

Macintyre (1983), sugere também o gráfico da Figura 6 para definir o número de jatos, que utiliza a velocidade específica.

Figura 6 - Gráfico para determinação do número de jatos de uma turbina Pelton



Fonte: Macintyre (1983 apud OST; KRAULICH, 2013)

2.5.4. Velocidade do jato

A velocidade do jato é a velocidade com que a água sai do bico injetor, Eisenring (1991) sugere ser calculada pela Equação (6). A equação mostra que a velocidade do jato não depende de sua seção transversal, mas apenas da altura de queda disponível.

$$c_1 = k_c \sqrt{2gH} \quad (6)$$

Onde:

c_1 = velocidade absoluta do jato [m/s];

k_c = coeficiente de bico (0,96 a 0,98);

2.5.5. Diâmetro máximo do jato

O diâmetro máximo do jato é fundamental para o dimensionamento da pá da turbina e do bico injetor. Segundo Eisenring (1991), pode ser encontrado através da Equação (7).

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi c_1}} \quad (7)$$

Onde:

d = diâmetro máximo do jato [m];

2.5.6. Velocidade periférica da roda

Para o dimensionamento do rotor pelton é necessário descobrir a velocidade periférica da roda, pode ser conhecida através da Equação (8) (EISENRING, 1991).

$$u_1 = k_u \sqrt{2gH} \quad (8)$$

Onde:

u_1 = velocidade periférica da roda [m/s];

k_u = coeficiente de resistência (0,45 a 0,49).

2.5.7. Diâmetro da roda

O raio da roda Pelton é a distância do eixo de rotação ao eixo de arremesso do jato. O diâmetro da roda pode ser definido pela Equação (9) (EISENRING, 1991).

Macintyre (1983), afirma também que por questões de limite prático, o valor do raio nunca deve ser inferior a três vezes o diâmetro máximo do jato.

$$D = \frac{60u_1 i}{\pi n} \quad (9)$$

Onde:

D = diâmetro da roda [m];

i = relação de transmissão (rpm da máquina acionada/rpm da turbina; $i = 1$ se o gerador estiver acoplado diretamente).

Já o diâmetro externo do rotor pode ser encontrado através da Equação (10), após a definição da altura da pá.

$$D_a = D + 1,2h \quad (10)$$

Onde:

D_a = diâmetro externo do rotor [m];

h = altura da pá [m].

2.5.8. Número aproximado de pás

Vários autores mostram diferentes equações com várias considerações sobre o número de pás ideal para o rotor Pelton. Conforme Eisenring (1991), o número de pás influencia diretamente na eficiência da turbina, porém não há grande interferência na velocidade do rotor. Para o cálculo do número aproximado de pás da turbina aconselha-se utilizar a Equação (11).

Complementando, Macintyre (1983) afirma que o número deve ser inteiro e múltiplo de 2 ou 4. Também, um número de pás muito pequeno permite que há uma perda de água sem efetuar trabalho e um número excessivo eleva o custo e pode até reduzir o rendimento.

$$z \approx \frac{D\pi}{2d} \quad (11)$$

Onde:

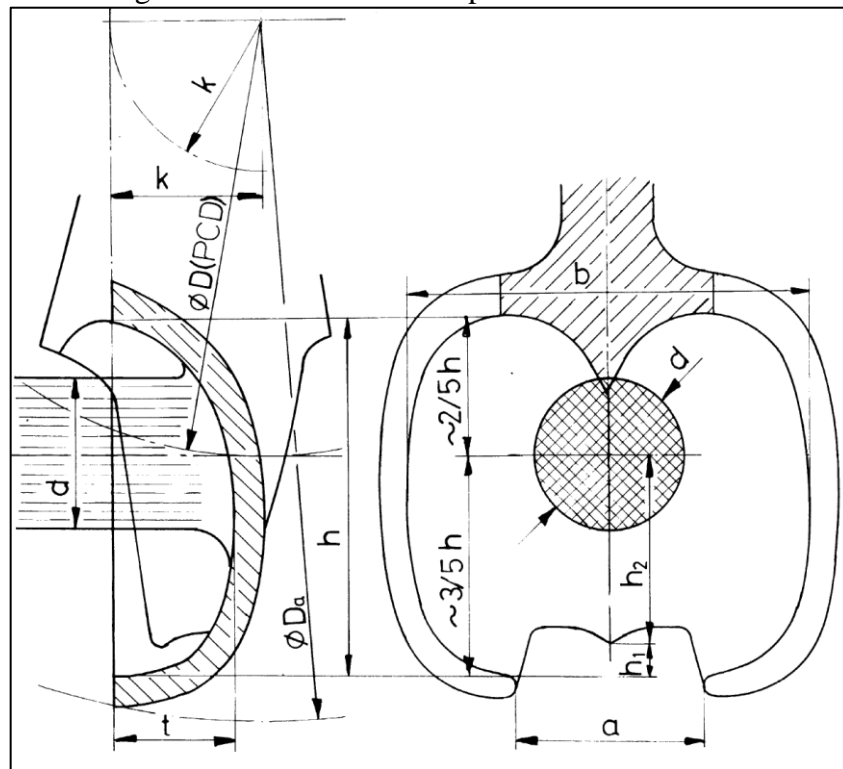
z = número aproximado de pás;

2.5.9. Dimensionamento da pá

A peça que exige maior cuidado no projeto de uma roda Pelton é a pá, a qual indica o bom funcionamento da turbina. Ela possui duas partes côncavas onde a água porta-se para transformar sua energia cinética em trabalho mecânico. No centro há um gume, para receber a água sem choque, dividindo o jato em duas partes iguais e na ponta extrema existe um corte. A forma da superfície interna lembra a de um semielipsóide e seu acabamento deve ser o melhor possível para reduzir atritos. Com a melhora dos processos de fabricação, garantindo precisão nas dimensões e balanceamento, fabricantes adotaram a fundição para produzir as pás (MACINTYRE, 1983).

Para o dimensionamento dos pontos detalhados na Figura 7, Eisenring (1991) sugere:

Figura 7 - Detalhamento da pá de uma roda Pelton



Fonte: Eisenring (1991).

Largura da pá, Equação (12).

$$b = (2,5 \text{ a } 3,2)d \quad (12)$$

Onde:

b = largura da pá [m].

Altura da pá, Equação (13).

$$h = (2,1 \text{ a } 2,7)d \quad (13)$$

Onde:

h = altura da pá [m].

Dimensões complementares, Equações (14 e 15).

$$h_1 = (0 \text{ a } 0,35)d \quad (14)$$

$$h_2 = (0,85 \text{ a } 1,5)d \quad (15)$$

Profundidade da pá, Equação (16).

$$t \approx 0,9d \quad (16)$$

Onde:

t = profundidade da pá [m].

Largura de abertura da pá, Equação (17).

$$a \approx 1,2d \quad (17)$$

Onde:

a = largura de abertura da pá [m]

Deslocamento da pá, Equação (18).

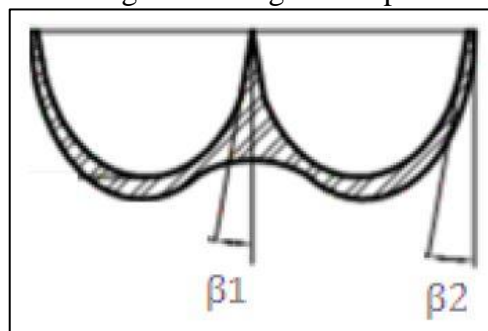
$$k = (0,1 \text{ a } 0,17)D \quad (18)$$

Onde:

k = deslocamento da pá.

Em relação aos ângulos da pá, mostrados na Figura 8, Pfeleiderer (1979) afirma que a superfície das pás deve ser formada de maneira que ao longo de toda sua aresta de saída exista um ângulo suficientemente pequeno. Menciona que deve se tomar o valor mais próximo possível do limite entre 4° a 7° , sendo estes valores para que o jato não alcance a próxima pá.

Figura 8 - Ângulos da pá



Fonte: Pfeleiderer (1979).

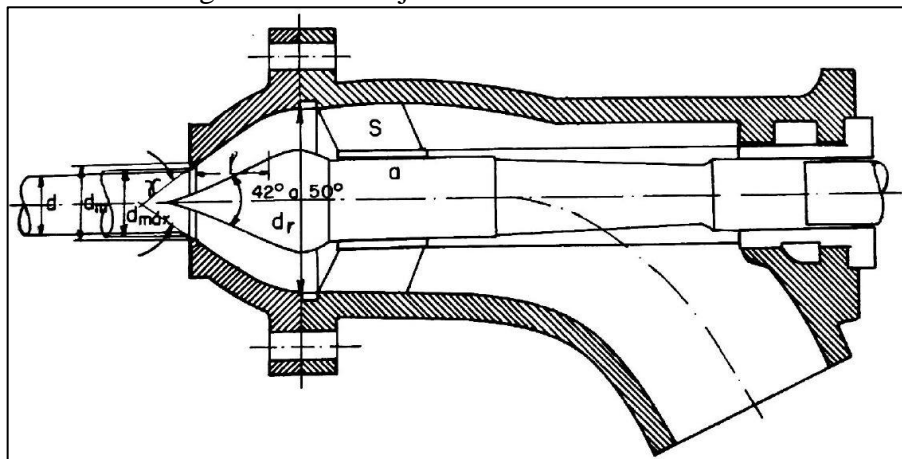
Acrescentando, Macintyre (1983) afirma que polindo a superfície ativa da pá, o valor dos ângulos tem um limite mínimo em torno de 4° a 5°, porém em geral é da ordem de 10°.

2.5.10. Bico injetor

De acordo com Macintyre (1983), o sistema diretor nas turbinas Pelton é o bico injetor, que tem por finalidade direcionar e regular o jato d'água para o acionamento da turbina.

A forma adotada de seção de saída é sempre circular, pois fornece menor área lateral do jato para uma mesma descarga, assim, menor atrito da água contra o ar que a envolve. Geralmente, o bico recebe a forma de um cone cujas geratrizes formam com o eixo um ângulo compreendido entre 60 a 90°. A Figura 9 apresenta um bico injetor com bocal e agulha.

Figura 9 - Bico injetor de uma turbina Pelton



Fonte: Macintyre (1983).

Para o dimensionamento dos principais pontos do bico injetor adotou-se como referência Macintyre (1983). O diâmetro de saída do bocal é encontrado a partir da Equação (19).

$$d_s = \frac{d}{(1,12 \text{ a } 1,27)} \quad (19)$$

Onde:

d_s = diâmetro de saída do bocal [m].

Para o diâmetro da seção de entrada do bocal, pode-se adotar a Equação (20).

$$d_r = (2,6 \text{ a } 2,8)d \quad (20)$$

Onde:

d_r = diâmetro da seção de entrada do bocal [m].

As curvas da tubulação e do bocal devem ter raios grandes, nunca inferiores a quatro vezes o raio das tubulações. O diâmetro de entrada do bocal é igual ao da tubulação que o alimenta e até quatro ou cinco vezes o diâmetro do jato, conforme Equação (21).

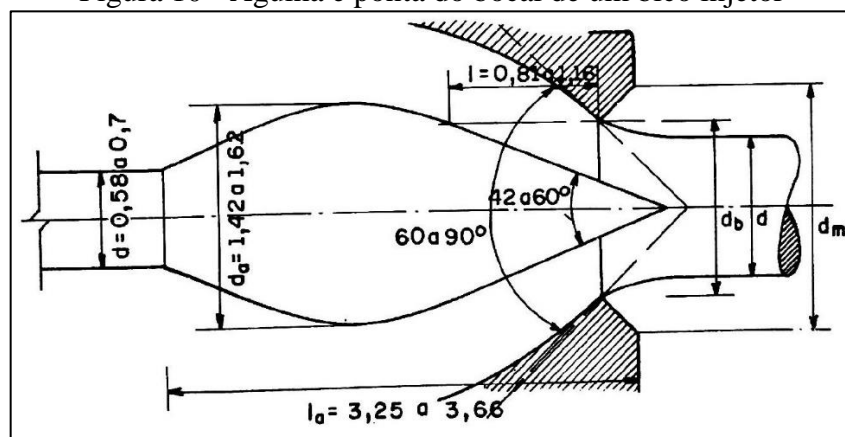
$$d_e = (4 \text{ a } 5)d \quad (21)$$

Onde:

d_e = diâmetro de entrada do bocal [m].

A Figura 10 apresenta demais grandezas da agulha e da ponta do bocal, expressas em função do diâmetro do jato (d). Além disso, para o ângulo da ponta da agulha o autor sugere de 42° a 60° e para o ângulo do bocal de 60° a 90° .

Figura 10 - Agulha e ponta do bocal de um bico injetador



Fonte: Macintyre (1983).

Diâmetro da haste, Equação (22)

$$d_h = (0,58 \text{ a } 0,7)d \quad (22)$$

Onde:

d_h = diâmetro da haste [m].

Diâmetro da agulha, Equação (23).

$$d_a = (1,42 \text{ a } 1,62)d \quad (23)$$

Onde:

d_a = diâmetro da agulha [m].

Comprimento da agulha, Equação (24).

$$l_a = (3,25 \text{ a } 3,66)d \quad (24)$$

Onde:

l_a = comprimento da agulha [m].

Curso da agulha, Equação (25).

$$I = (0,81 \text{ a } 1,16)d \quad (25)$$

Onde:

I = curso da agulha [m].

2.5.11. Força do jato d'água

De acordo com Eisenring (1991), a força com que o jato d'água incide sobre a pá da turbina é diretamente proporcional a velocidade do jato e a vazão disponível, conforme a Equação (26). Esta equação considera que a força é maior quando o rotor inicia sua rotação.

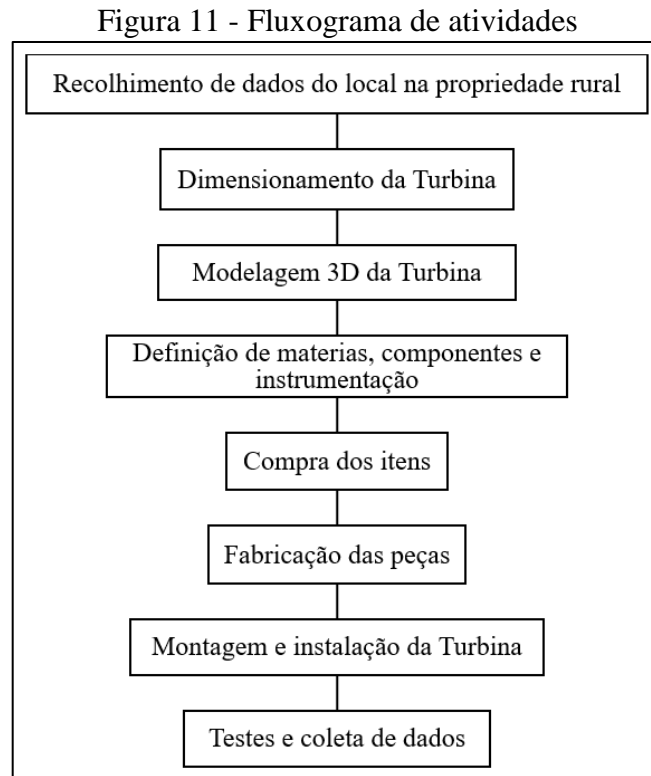
$$F = 2Qc_1 1000 \quad (26)$$

Onde:

F = força com que o jato incide sobre a pá da turbina [N].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será abordada a metodologia utilizada para a construção da turbina Pelton. A Figura 11 apresenta as etapas tomadas desde a análise do local e recolhimento de informações na propriedade rural até testes e coleta de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1. METODOS PARA DIMENSIONAMENTO DA TURBINA PELTON

Para o início do dimensionamento, algumas informações do local da implementação da turbina foram indispensáveis, como a altura de queda e a vazão, conseqüentemente pode-se calcular a velocidade de rotação específica, que comprova que o local está apto a instalar a turbina Pelton, com valor dentro do intervalo recomendado. A Tabela 6 apresenta dados iniciais.

Tabela 6 - Dados iniciais do local da implementação a turbina

| | |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|
| Vazão (Q) | 0,008 m ³ /s |
| Altura de queda (H) | 5,5 m |
| Velocidade de rotação específica (n _{qA}) | 22,48 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para medir a altura de queda, devido a distância elevada entre o açude e o ponto de saída de água da tubulação, foi utilizado o método com mangueira de nível. Já para descobrir a vazão disponível, no final da tubulação foi colocado um reservatório e por um determinado período encheu-se o mesmo, posteriormente a quantidade de água do reservatório foi mensurada. Este procedimento foi repetido algumas vezes, assim pode-se obter maior confiabilidade. Desta forma, pode-se dimensionar o rotor Pelton e o bico injetor, baseando-se nas equações da seção 2.5.

Além de cálculos geométricos, dados resultantes como o potencial elétrico da microcentral e a potência hidráulica foram estimadas baseando-se nas Equações das seções 2.3.4 e 2.4.2, respectivamente. A força com que o jato d'água incide sobre as pás da turbina também foi encontrado teoricamente, através da Equação 26 encontrada na seção 2.5.11.

3.1.1. Dimensionamento do rotor Pelton

O processo de dimensionamento do rotor Pelton iniciou-se com a utilização dos dados iniciais recolhidos do local da implementação da turbina. Desta forma, através das Equações mostradas da seção 2.5.4 até a seção 2.5.8, pode-se calcular a velocidade do jato, o diâmetro máximo do jato e a velocidade periférica, definir a velocidade de rotação e o diâmetro do círculo, além do número de pás ideal para o rotor. Nesta etapa, para definir o diâmetro da roda e, conseqüentemente a velocidade de rotação, conforma Equação 9, foi optado por acoplar o eixo da turbina diretamente no eixo do gerador, pela facilidade de operação e diminuição de custos.

O dimensionamento da pá do rotor Pelton é feito através de dados práticos e, em sua grande maioria, em função do diâmetro máximo do jato. Os valores necessários para definir a geometria da pá, de acordo com Figura 7, foram encontrados a partir das Equações apresentadas na seção 2.5.9.

Nota-se que para efetuar o dimensionamento da pá do rotor, em alguns casos houve a necessidade do autor decidir um valor dentro de um intervalo determinado. Nestes casos, em sua grande maioria foi optado por a escolha de um valor médio e, em outros momentos, foi analisado a geometria resultante da peça e determinado um valor mais próximo do menor ou do maior acessíveis.

3.1.2. Dimensionamento do bico injetor

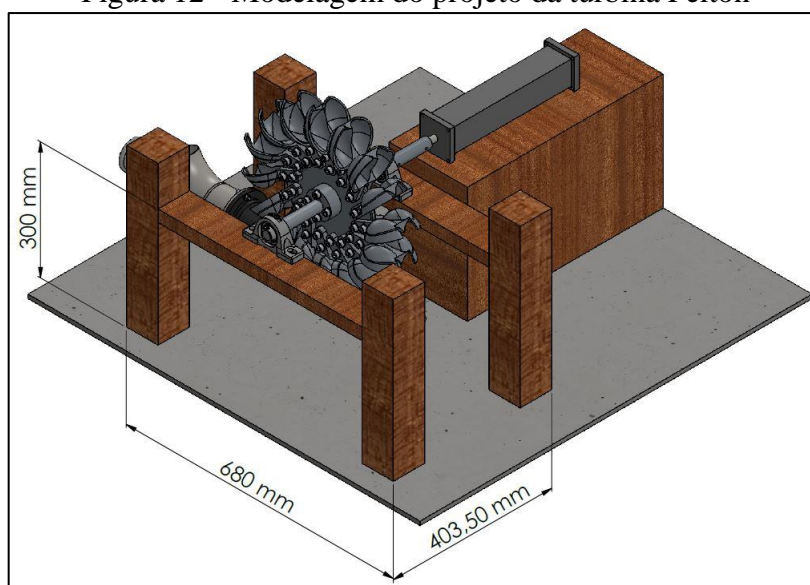
Assim como para o dimensionamento da pá da turbina, o bico injetor é dimensionado, em sua grande maioria, em função do diâmetro máximo do jato, além de informações pré-estabelecidas, como o ângulo da ponta da agulha e o ângulo do bocal. Os valores essenciais para o dimensionamento do bico injetor, de acordo com as Figuras 9 e 10, foram calculados através das Equações vistas na seção 2.5.10.

Neste caso, também houve a necessidade de optar por valores dentro de um determinado intervalo em algumas equações, porém, em sua grande maioria, optou-se na utilização dos menores valores disponíveis, pois, como a tubulação já estava construída antes do dimensionamento, acabou sendo montada com um diâmetro menor do que o diâmetro ideal para a entrada do bocal, calculado através da Equação 21. Desta forma, a utilização de menores valores acessíveis, proporcionou melhor concordância geométrica do componente.

3.2. PROJETO, FABRICAÇÃO E CONTRUÇÃO DA TURBINA

Com parâmetros geométricos e de operação definidos teoricamente, pode-se dar início a modelagem da turbina hidráulica em um *software* CAD. Assim como em seu dimensionamento, o projeto foi dividido em quatro conjuntos para melhor entendimento, em base da turbina e do gerador, rotor, bico injetor e gerador elétrico. A Figura 12 a modelagem do projeto com algumas medidas.

Figura 12 - Modelagem do projeto da turbina Pelton



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A base da turbina e do gerador tem a função de suportar todo o sistema de funcionamento da turbina, manter o alinhamento dos componentes em altas rotações para que efetuem suas movimentações da melhor maneira possível, além de adaptados para facilitar a instalação e manutenção da turbina. A base e suporte foram feitos com concreto e madeiras, além de mancais com rolamentos para posicionar o eixo da turbina.

Em relação ao rotor da turbina, o disco e as pás projetadas são de alumínio, desse modo, dificulta a oxidação e o desgaste do material em contato com a água, facilita a usinagem e evita o sobrepeso dos componentes. As peças foram elaboradas em processos de usinagem, visando a diminuição da complexidade de produção e bom acabamento das peças. A Figura 13(a) apresenta o rotor da turbina Pelton montado, a Figura 13 (b) mostra a pá da turbina usinada.

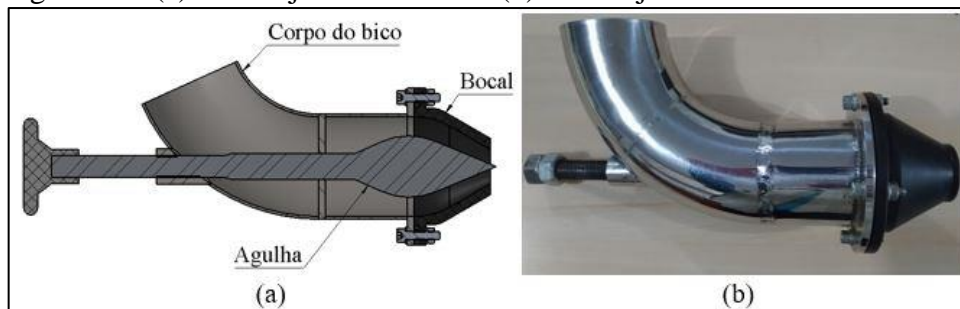
Figura 13 - (a) Rotor Pelton montado. (b) Pá do rotor usinada



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Tratando-se do bico injetor, para facilitar a análise, pode-se dividir em corpo do bico, agulha e bocal de saída, conforme apresentado na Figura 14(a), a Figura 14(b) exhibe o bico após ser fabricado e montado.

Figura 14 - (a) Bico injetor modelado. (b) Bico injetor fabricado e montado.



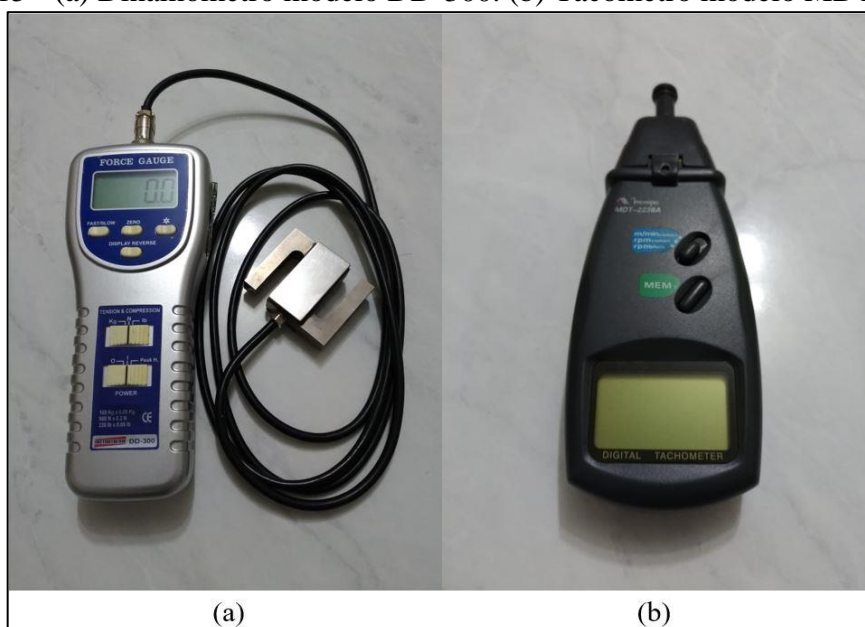
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para o corpo, foi utilizado aço inox SAE 304, assim, evita-se a oxidação do material e suporta o aumento de pressão na saída da tubulação, em conjunto da necessidade da utilização do processo de solda em alguns componentes. A agulha projetada é de aço inox SAE 420, também visando a diminuição da oxidação, assim como o desgaste da peça em contato com níveis elevados de velocidade e pressão da água. O bocal de saída elaborado é de polímero, visando a facilidade de usinagem, alívio de peso do conjunto, não oxidação e diminuição de custos. Todas as peças foram produzidas através do processo de usinagem.

Finalizando o projeto, foi utilizado um gerador trifásico de 500 W particular, o qual não havia informações relevantes, como curvas de rendimento, além de demais informações importantes. Diante disso, testes em laboratório foram realizados, utilizando um torno mecânico, com o intuito de verificar e assim estimar a potência gerada com diferentes rotações.

Além disso, a turbina conta com instrumentação para análise de alguns resultados. A Figura 15(a) apresenta um dinamômetro, utilizado para verificar a força com que o jato incide sobre a pá, e a Figura 15(b) apresenta um tacômetro, utilizado para verificar a velocidade de rotação da turbina.

Figura 15 - (a) Dinamômetro modelo DD-300. (b) Tacômetro modelo MDT-2238A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O tacômetro MDT-2238A, opera em uma faixa de 2,5 a 99999 rpm (foto) e 0,5 a 19999 rpm (contato), possui resolução de 0,1 rpm (2,5 a 999,9 rpm – foto) e 0,1 rpm (0,5 a 999,9 rpm – contato), além do mais, possui exatidão de $\pm 0,05\%$. Já o dinamômetro digital é do modelo DD-300, opera até 100 kgf e 980 N, possui resolução de 0,05 kgf e 1,2 N, e tem exatidão de \pm

0,5% dentro de $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Um conjunto de instrumentos para verificar potência gerada também foi utilizado, composto de cabos, conectores, ponte retificadora trifásica, dois multímetros modelo MINIPA TRUE RMS ET-2702 e um reostato, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Equipamentos utilizados para analisar a geração de energia



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Finalizada a fabricação das peças do equipamento, foi viabilizada a montagem e posteriormente a instalação da turbina na propriedade rural, conforme exibe a Figura 17.

Figura 17 - Turbina Pelton instalada na propriedade rural



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.3. PROCEDIMENTO DE TESTES

Para o teste experimental, o seguinte procedimento foi realizado:

- a) O registro de saída da água foi aberto até encher toda a tubulação;
- b) O bico injetor foi liberado, posicionando a agulha do bico no ponto estabelecido no dimensionamento;
- c) Ajustou-se o registro até atingir a vazão medida na coleta de dados iniciais;
- d) Foi aguardado o sistema entrar em funcionamento e permanecer assim por um determinado período de tempo, devido a possíveis variações de vazão;
- e) Finalizou-se o teste avaliando a velocidade de rotação utilizando o tacômetro, além da potência fornecida pelo equipamento;
- f) Para outras análises, aumentou-se a vazão com o intuito de verificar o comportamento da turbina em diferentes situações;

Para a obtenção da força com que o jato incide sobre a pá da turbina os procedimentos foram semelhantes, porém, retirou-se o rotor da turbina e foi posicionada a célula do dinamômetro na frente do jato, aproximadamente na mesma distância em que a pá do rotor estaria posicionada, assim, através da força de compressão, pode-se encontrar um valor aproximado da força do jato. O mesmo foi realizado inúmeras vezes, com intenção de obter maior confiabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado os resultados do dimensionamento do rotor e do bico injetor da tubina Pelton, comparações de alguns cálculos realizados teoricamente com testes experimentais efetuados após a instalação da turbina, assim como a potência fornecida pelo sistema com diferentes vazões.

4.1. DIMENSIONAMENTO DA TURBINA

Primeiramente, com dados retirados e definidos do local na propriedade rural e, equacionamentos verificados, cálculos iniciais para o dimensionamento do rotor Pelton foram realizados. Inicialmente, através das Equações 6, 7 e 8, calculou-se a velocidade do jato, o diâmetro máximo do jato e a velocidade periférica da roda, conseqüentemente, pode-se analisar e estabelecer a velocidade de rotação e diâmetro do círculo utilizando a Equação 9, além de decidir o número de pás ideal para o rotor da turbina e o diâmetro externo após a definição da altura da pá baseando-se nas Equações 11 e 10. Estes resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados iniciais do dimensionamento do rotor Pelton

| | |
|-----------------------------------------|-----------|
| Velocidade do jato (c_1) | 10,07 m/s |
| Diâmetro máximo do jato (d) | 0,032 m |
| Velocidade periférica da roda (u_1) | 4,880 m/s |
| Velocidade de rotação (n) | 300 rpm |
| Diâmetro do círculo (D) | 0,311 m |
| Número de pás (z) | 16 |
| Diâmetro externo (D_a) | 0,404 m |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Para finalizar o rotor Pelton, calculou-se os valores aconselháveis para o projeto da pá da turbina. Nesta etapa verificou-se a largura, altura e profundidade da pá, assim como outras dimensões complementares, baseando-se na Equação 12 até a 18. Os resultados das medidas encontradas na Figura 7, podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dimensionamento da pá da turbina Pelton

| | |
|----------------------------|---------|
| Largura da pá (b) | 0,090 m |
| Altura da pá (h) | 0,077 m |
| Profundidade da pá (t) | 0,028 m |
| Largura abertura da pá (a) | 0,038 m |
| Deslocamento da pá (k) | 0,045 m |
| h_1 | 0,011 m |
| h_2 | 0,038 m |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Em relação ao bico injetor, inicialmente, através das Equações 19, 20 e 21, calculou-se os diâmetros de saída do bocal, da seção de entrada do bocal e da entrada do bocal, além de estabelecer ângulo do bocal. Posteriormente, baseando-se nas Equações 22 a 25, calculou-se as dimensões da agulha interna, partindo do diâmetro da haste e diâmetro da agulha, após, o comprimento e curso da agulha e, por fim, o ângulo da ponta da agulha. Estes resultados podem ser verificados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensionamento do bico injetor

| | |
|-------------------------------------------------|---------|
| Diâmetro de saída do bocal (d_s) | 0,025 m |
| Diâmetro da seção de entrada do bocal (d_r) | 0,082 m |
| Diâmetro de entrada do bocal (d_e) | 0,127 m |
| Diâmetro da haste (d_h) | 0,018 m |
| Diâmetro da agulha (d_a) | 0,045 m |
| Comprimento da agulha (I_a) | 0,103 m |
| Curso da agulha (I) | 0,025 m |
| Ângulo ponta agulha | 45° |
| Ângulo do bocal | 60° |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

Quanto aos resultados do dimensionamento do bico injetor, alguns valores calculados não puderam ser colocados em prática. Como a tubulação de saída de água do açude já estava construída com diâmetro de 75 mm, o diâmetro de entrada do bocal e o diâmetro da seção de entrada do bocal foram definidos conforme o diâmetro interno da tubulação, desta forma, menor do que o aconselhado pela Equação 21, porém aptos, pois de acordo com Macintyre (1983),

afirmado na seção 2.5.10, o diâmetro de entrada do bocal pode ser o mesmo da tubulação. Assim, como para fabricar o corpo do bico utilizou-se um tubo de 76,2 mm, o diâmetro interno resultou em aproximadamente 72,2 mm para ambas variáveis mencionadas. À vista disso, conforme declarado na seção 3.1.2, optou-se por dimensionar os demais parâmetros do bico os menores possíveis estabelecidos pela referência utilizada.

A potência elétrica gerada e a potência hidráulica disponível também foram estimadas, além da força com que o jato d'água incide sobre a pá. Para estimar a potência fornecida pela microcentral, de acordo com Eisenring (1991), conforme afirmado na seção 2.5.2, para o rendimento de uma turbina Pelton, estabeleceu-se um rendimento de 0,5, considerado bastante conservador. Tais resultados podem ser observados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados resultantes da microcentral hidrelétrica

| | |
|----------------------------------------------------|----------|
| Potência estimada da microcentral hidrelétrica (P) | 215,5 W |
| Potência hidráulica disponível (P_h) | 431 W |
| Força do jato d'água | 161,22 N |

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

4.2. COMPARAÇÃO TEÓRICA VERSUS EXPERIMENTAL DA TURBINA

Para uma boa avaliação da turbina projetada e posteriormente construída, foram realizados testes experimentais, coletando informações do gerador em laboratório, variando a velocidade de rotação e verificando a potência fornecida pelo mesmo. Dados da velocidade de rotação resultante da turbina em vazio e com carga foram medidas, além disso, a força com que o jato d'água incide sobre a pá e a potência gerada pelo sistema foram avaliadas. Subsequentemente, foram realizadas comparações com os valores encontrados durante os cálculos teóricos.

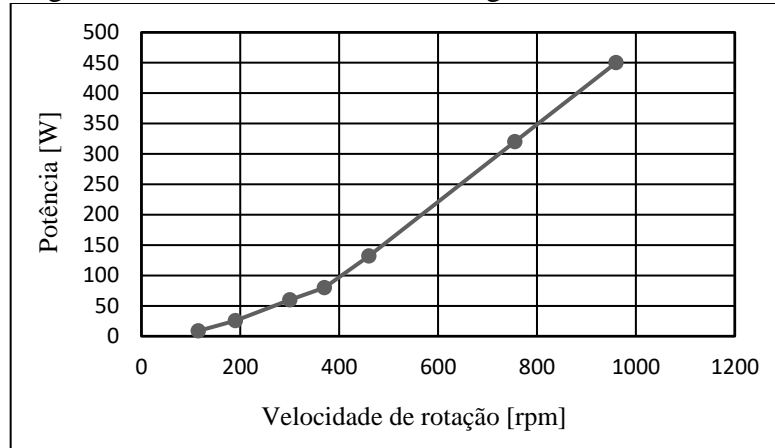
4.2.1. Potência e velocidade de rotação

Inicialmente, verificou-se em laboratório a relação entre velocidade de rotação e potência do gerador. Os testes mostram que o gerador, ao alcançar a velocidade de 300 rpm, conforme determinado em projeto, gera aproximadamente 60 W, apenas 27,8% do potencial estimado da microcentral hidrelétrica, demonstrando que a aplicação pré-definida do gerador, acoplado-o diretamente no eixo não é adequada. Percebe-se também que, para obter a potência

desejada de 215,5 W, há necessidade de o gerador alcançar aproximadamente 580 rpm.

Entende-se também, que não é possível afirmar que os valores seriam replicados na propriedade rural, devido a diferença dos equipamentos, entretanto, aproveita-se como base para estimar a potência gerada pelo sistema, além de obter informações para possíveis adaptações futuras. A Figura 18 apresenta os valores encontrados em laboratório.

Figura 18 - Testes realizados com o gerador em laboratório

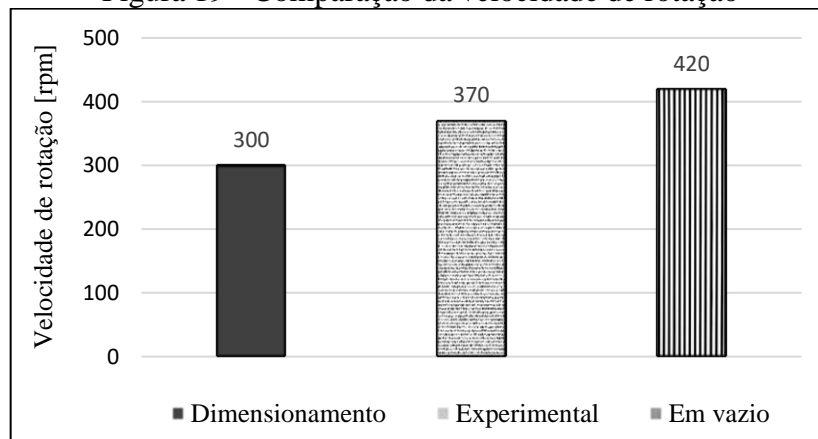


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Em seguida, instalou-se o gerador na turbina na propriedade rural, assim dados de velocidade de rotação e potência foram recolhidos.

No tocante a velocidade de rotação, o gráfico da Figura 19 mostra a comparação de resultados em três diferentes ocasiões: a velocidade de rotação já definida durante dimensionamento, a velocidade medida experimentalmente no momento de maior potência gerada e a velocidade em vazio, sem carga no gerador, para melhor análise do comportamento da turbina.

Figura 19 - Comparação da velocidade de rotação

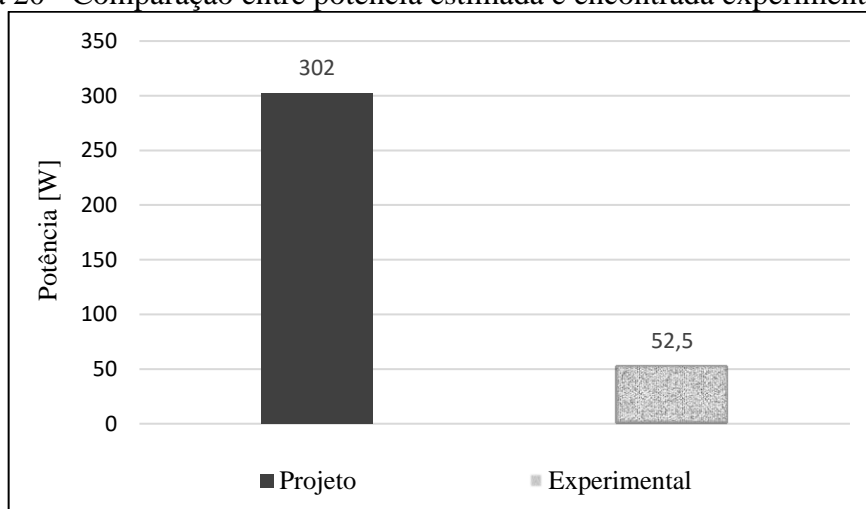


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nota-se que, comparando a velocidade de rotação estabelecida durante o dimensionamento com a velocidade medida no momento de maior potência, a velocidade encontrada durante o teste experimental é aproximadamente 23% maior do que a calculada teoricamente, isso pode ser explicado pelo fato da transmissão entre eixo da turbina e eixo do gerador não estar construída de forma adequada. De outra forma, há uma perda de velocidade em comparação com a velocidade de rotação medida em vazio, sem carga, de aproximadamente 12%, mostrando que com o aumento de carga no gerador, há uma diminuição da velocidade de rotação da turbina, desta forma pode se constatar um comportamento natural já esperado do sistema.

Em relação a potência, comparando o potencial energético estimado da microcentral, de 215,5 W, com a potência encontrada após os testes, pode ser verificado um rendimento bastante baixo, de apenas 24,4%, com geração de 52,5 W. O gráfico da Figura 20 mostra a comparação.

Figura 20 - Comparação entre potência estimada e encontrada experimentalmente



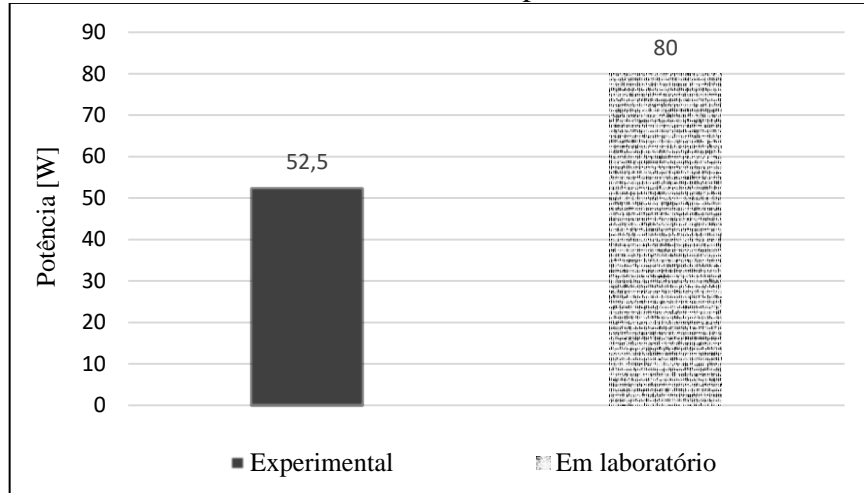
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Seguindo, o gráfico da Figura 21 apresenta a comparação entre a potência resultante da turbina com a potência encontrada nos ensaios em laboratório, utilizando a mesma velocidade de rotação nos dois equipamentos, de 370 rpm, com o intuito de gerar um gráfico de estimativa de potência para a turbina.

Analisando o gráfico, nota-se que adaptando a mesma velocidade de rotação o rendimento da turbina está aproximadamente 34% abaixo, onde em laboratório produz em torno de 80 W, a turbina apresentou apenas 52,5 W. Isso pode ser justificado simplesmente pela diferença construtivas dos equipamentos, possuírem diferentes torques e estarem adaptadas

para diferentes operações.

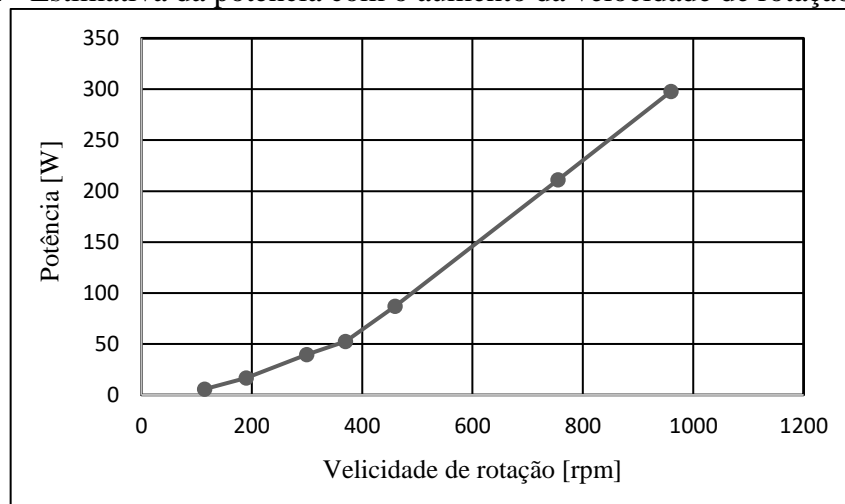
Figura 21 - Comparação entre potência da turbina e potência encontrada em laboratório utilizando 370 rpm



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Desta forma, baseando-se que o rendimento do gerador é 34% abaixo acoplado a turbina em relação aos testes em laboratório, pode-se estimar a potência da turbina aumentando a velocidade de rotação através dos dados retirados da Figura 18. A Figura 22 exibe o gráfico com essa estimativa.

Figura 22 - Estimativa da potência com o aumento da velocidade de rotação da turbina



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

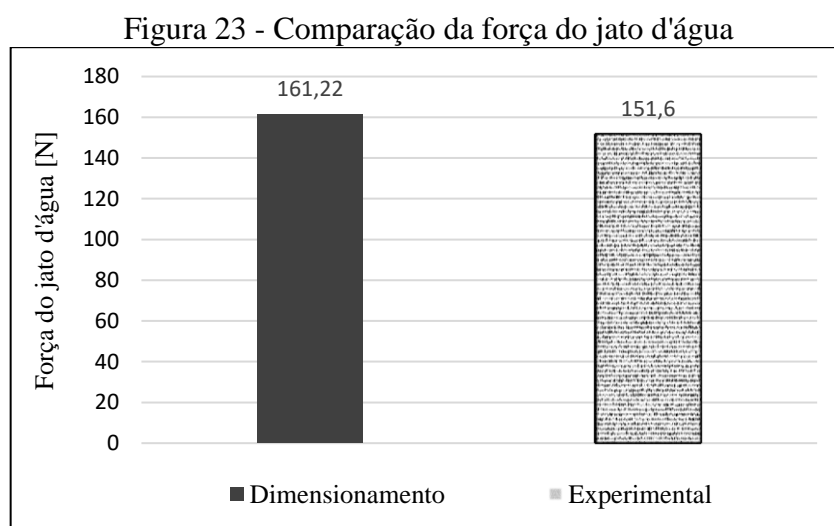
Desse modo, apesar de ser aconselhado a transmissão do eixo da turbina diretamente no eixo do gerador, por ser mais barato, melhor e mais eficiente, neste trabalho, como a condição do local é de queda muito baixa, torna-se necessário a utilização de um multiplicador

de velocidade do tipo correia e polia ou caixa de transmissão mecânica. Percebe-se que modificando o projeto inicial e adaptando um sistema de acoplamento com a intenção de aumentar a rotação do gerador para aproximadamente 780 rpm, mesmo que através destas alterações o sistema evidenciaria outras formas de perda de energia, a turbina estaria apta a gerar em torno de 215,5 W.

Observando as diferenças dos valores apresentados, pode-se também ponderar alguns aspectos em relação ao gerador. Para um projeto mais satisfatório, pode ser analisado a curva de rendimento, em resumo, o ponto da curva de tensão e corrente que combinados geram mais potência, além de outros parâmetros importantes como curva de torque e potência, ou simplesmente efetuar um estudo e selecionar um gerador de baixa rotação.

4.2.2. Força do jato d'água

Em relação a força com que o jato d'água incide sobre a pá da turbina, o resultado apresenta-se com maior similaridade, com um valor encontrado nos testes 6% abaixo do dimensionamento. O gráfico da Figura 23 apresenta a comparação entre valor de projeto e após os testes experimentais.



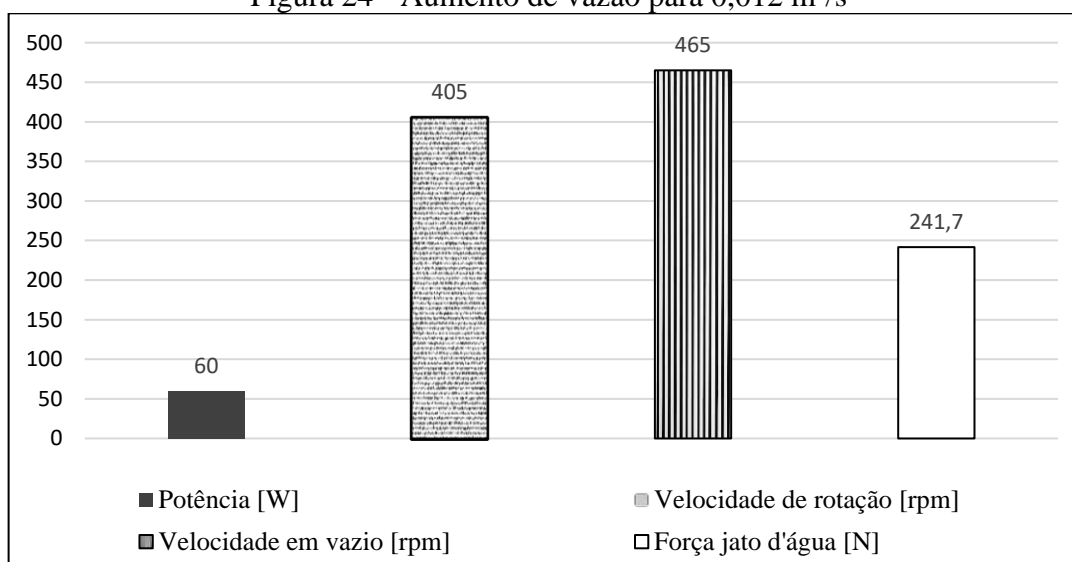
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Possíveis causas que podem influenciar a diferença são as perdas durante a passagem da água pela tubulação construída e eventuais inconformidades geométricas do bico injetor.

4.3. ANÁLISE COM VARIAÇÃO DE VAZÃO

Após a comparação entre dimensionamento e testes realizados com a construção do projeto, foi alterada a tubulação de saída do açude com o intuito de conseguir maior vazão e obter melhores resultados. Com a alteração, foi aumentado para 0,012 m³/s, desta forma houve aumento de aproximadamente 15% na potência gerada, alcançando 60 W e a velocidade de rotação, tanto em vazio como acoplado ao gerador, obteve aumento de aproximadamente 10%. Além disso, estimou-se a força com que o jato atinge a pá. Como a força é diretamente proporcional a vazão e a velocidade do jato, houve um aumento de aproximadamente 50% em relação a força com vazão de 0,008 m³/s, chegando a 241,7 N. Os valores podem ser observados no gráfico da Figura 24.

Figura 24 - Aumento de vazão para 0,012 m³/s



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nota-se que houve um aumento significativo nos resultados, tanto em velocidade de rotação como em torque de eixo, que resultariam em melhor desempenho em situação de alteração na forma de transmissão. Porém, com o aumento significativo de vazão, entende-se que podem ser feitas alterações geométricas no rotor e no bico injetor, com o objetivo de obter maior rendimento. Além disso, haveria espaço para a aplicação de outros tipos de turbina, que possuem bons rendimentos com vazão elevada e baixa altura de queda, como a turbina Francis e a Michell-Banki. Entretanto, no tocante a este trabalho, o aumento de vazão comprometeria o nível de água do açude.

5. CONCLUSÃO

Com o término do trabalho é possível determinar que o levantamento de informações da propriedade rural, o dimensionamento, projeto, fabricação e implementação da turbina Pelton foram efetuados de maneira satisfatória.

Os objetivos iniciais foram realizados, construiu-se a turbina conforme projeto e dimensionamento. Foi possível também, com a utilização de um gerador e alguns instrumentos, fazer um levantamento do comportamento da turbina após a instalação, verificando a velocidade de rotação, a potência gerada pelo equipamento e seu rendimento, além de apurar a força com que o jato incide sobre a pá. Assim, pode-se comparar valores encontrados teoricamente e estabelecer maior segurança na conclusão e estudo de viabilidade do projeto.

Em relação aos resultados obtidos nos testes experimentais, de potência e velocidade de rotação, o projeto apresentou grandes diferenças percentuais comparados ao potencial hidroenergético do local e a velocidade de rotação definida durante o dimensionamento, ou seja, diferenças elevadas para a validação do projeto da turbina. O projeto obteve um rendimento de apenas 24,4%, com geração de 52,5 W. Dessa forma, a baixa geração de energia elétrica não é capaz de complementar o abastecimento da residência de forma satisfatória ou de ser utilizada em outros serviços na propriedade rural. De outro modo, os resultados obtidos da força com que o jato d'água incide sobre a pá são mais similares, com diferença de apenas 6% em relação aos valores encontrados teoricamente.

Concluindo, pode-se afirmar que, apesar de incoerências em relação aos resultados, o equipamento abre uma série de possibilidades de estudos e melhorias. Modificando o sistema de transmissão entre eixo da turbina e do gerador, com o intuito de aumentar a velocidade de rotação, além de efetuar um estudo analisando curva de potência, torque e rendimento da turbina, o sistema poderia apresentar aumento significativo na geração de energia, podendo gerar mais de 215,5 W conforme estimativa realizada, tornando-se adequado para complementar o abastecimento de uma pequena residência, armazenar produtos, ser utilizado em serviços essenciais nas propriedades rurais ou lugares afastados, remotos e sem acesso à energia elétrica.

6. TRABALHOS FUTUROS

Com o trabalho finalizado, algumas oportunidades para otimização da turbina ou obtenção de maior energia foram observadas, as quais estão citadas abaixo:

- a) Desenvolvimento de um multiplicador de velocidade do tipo correia e polia ou uma caixa de transmissão mecânica, com o intuito de aumentar a velocidade de rotação do gerador;
- b) Instalar medidores e reguladores eletrônicos de vazão e pressão, para um melhor controle de funcionamento da turbina e coleta de dados mais eficiente, assim obtendo uma comparação entre dados analíticos e experimentais mais acurados;
- c) Desenvolver um sistema misto de geração de energia. Além da turbina hidráulica, incrementar um painel solar para gerar energia solar fotovoltaica, complementando o abastecimento energético;
- d) Efetuar um estudo da curva de eficiência da turbina Pelton, desta forma, encontrar o momento de maior rendimento da turbina;
- e) Construção de um sistema em módulo, ou seja, possibilidade de instalar mais de uma turbina no mesmo local, utilizando a mesma tubulação e condições do local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFSHAR, Abbas; JEMAA, Fethi Bem; MARIÑO, Miguel. A. **Optimization of hydropower plant integration in water supply system**. Houghton, Michigan. Journal of Water Resources Planning and Management, 1990.
- DOMINGUEZ, Urbano Sanchez. **Máquinas hidráulicas**. San Vicente del Raspeig: Club Universitario, 2012.
- EISENRING, Markus. **Harnessing water power on a small scale: Micro pelton turbines**. 1. Ed. St. Gallen: Swiss center for appropriate technology, 1991. Disponível em: <http://skat.ch/wp-content/uploads/2017/03/09-Micro-Pelton-Turbines.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2019.
- ELETOBRAS. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas Brasileiras, 2000. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>. Acesso em: 18 set. 2019.
- HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2. Ed. Santa Maria: UFSM, 2006.
- KHENNAS, Smail; BARNETT, Andrew. **Best practices for sustainable development of micro hydro power in developing countries**. Washington: ESMAP, 2000. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/pt/563161468781177561/pdf/multi-page.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.
- MACINTYRE, Archibald Joseph. **Máquinas motrizes hidráulica**. 1. Ed. Guanabara dois S.A. Rio de Janeiro, 1983.
- MOREIRA, Rodrigo Henrique Costa; KAKAZU, Thiago Ken. **Cavitação em bocal de uma turbina pelton**. Responsável: Prof. Eugênio Spanó Rosa, 2010. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, 2010. Disponível em: http://www.fem.unicamp.br/~phoenics/EM974/PROJETOS/PROJETOS%201%20SEM-10/TURMA%20B/G4/EM974_Relatorio%20Final.pdf. Acesso em: 29 set. 2019.
- OST, Ana Paula; KRAULICH, Claudia Vanessa. **Dimensionamento e modelagem de um rotor de turbina pelton para ser aplicado em uma bancada didática**. Orientador: Prof. Dr. Ademar Michels, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina. Horizontina, 2013.
- PENCHE, Celso. **Guide on how to develop a small hydropower plant**. Bruselas: TNSHP – Thematic Network on Small Hydropower, 2004. Disponível em: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/a/ab/Guide_on_How_to_Develop_a_Small_Hydropower_Plant.pdf. Acesso em: 11 set. 2019.
- PFLEIDERER, Carl; PETERMANN, Hartwig. **Máquinas de fluxo**. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

SINGH, Dilip. **Micro hydro power: resource assessment handbook**. New Delhi, India: APCTT – Asian and Pacific Center for Transfer of Technology, 2009.

SOARES JUNIOR, Ricardo Luiz. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005429.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2019.

SOSNOSKI, André Sandor Kajdacsy Balla. **Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-03052016-141852/publico/AndreSandorKajdacsyBallaSosnoski_PPGEC_Corrigida_2015.pdf. Acesso em: 20 ago. 2019.