

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA MECÂNICA

CAROLINY CLARA CALDART  
GUSTAVO ZANDONADI MACHADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DA  
REDE PÚBLICA DE ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE UMA  
TURBINA PELTON INSTALADA EM UMA CAIXA D'ÁGUA.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016

CAROLINY CLARA CALDART  
GUSTAVO ZANDONADI MACHADO

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DA  
REDE PÚBLICA DE ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE UMA  
TURBINA PELTON INSTALADA EM UMA CAIXA D'ÁGUA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Lourenço.

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2016



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Caroliny Clara Caldart**

**Estudo da viabilidade de geração hidroelétrica da rede pública de abastecimento com a aplicação de uma turbina Pelton instalada em uma caixa d'água.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 21/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcos Antonio de Souza Lourenço - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Rubens Gallo - (Membro)

Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior - (Membro)



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Mecânica**  
**Curso de Engenharia Mecânica**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gustavo Zandonadi Machado**

**Estudo da viabilidade de geração hidroelétrica da rede pública de abastecimento com a aplicação de uma turbina Pelton instalada em uma caixa d**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 21/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Marcos Antonio de Souza Lourenço - Presidente (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof(a). Me(a). José Aparecido Lopes Junior - (Membro)  
\_\_\_\_\_  
Prof(a). Dr(a). Rubens Gallo - (Membro)

## AGRADECIMENTOS

“Primeiramente à Deus.

Um sincero agradecimento à minha mãe Silmara e minha avó Geni por todo amor e suporte que sempre me deram.

À toda minha família que sempre me apoiou, me incentivou nos momentos mais difíceis e nunca me deixaram desistir.

Aos meus amigos e colegas que fizeram esses cinco anos se tornarem mais fáceis, foram momentos inesquecíveis, sorrisos e lágrimas que nos fizeram chegar até aqui.

Aos meus companheiros de *fundamentos do coffee break*, este curso foi fundamental para a realização desse trabalho.

Agradeço ao Gustavo pelo compartilhamento da ideia e toda parceria durante a graduação e no desenvolvimento do trabalho.” Caroliny Clara Caldart.

“Agradeço primeiramente aos meus pais por todo amor, carinho e força. Vocês não imaginam a importância de cada telefonema, cada conversa que tivemos nos momentos que pensei em desistir. Serei eternamente grato pela oportunidade que me deram.

A minha irmã Fernanda por ser meu maior exemplo. Você é a melhor pessoa do mundo.

A minha avó Genny por cada bolo feito na sexta-feira, sem saber se eu voltaria para casa no final de semana.

A todos os meus amigos, em especial aos camaradas da LPK, por esses 5 anos morando juntos.

Ao Amarildo, pai do meu grande amigo Du, por uma conversa simples que poderia até ter passado batida, mas que me fez estar aqui hoje.

Agradeço a Carol por toda parceria durante o curso e pelo compartilhamento de ideias durante esta etapa final.” Gustavo Zandonadi Machado.

“Agradecemos ao nosso orientador Marcos Lourenço pelos ensinamentos e suporte durante a realização do trabalho; e à nossa universidade, UTFPR, pelo ensino de qualidade.” Caroliny e Gustavo.

*“Fé no Pai que o inimigo cai”*

## RESUMO

CALDART, Caroliny C.; MACHADO, Gustavo Z.. **ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DA REDE PÚBLICA DE ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE UMA TURBINA PELTON INSTALADA EM UMA CAIXA D'ÁGUA**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

A matriz energética mundial tem fontes de energia finitas que com o tempo tendem a se esgotar, porém a demanda energética não segue o mesmo caminho, sua tendência é aumentar. Devido também a questão ambiental a utilização de fontes renováveis de energia tem aumentado gradualmente e o estudo de novas possibilidades de geração de energias renováveis se faz necessário. O presente projeto consiste no estudo de uma nova possibilidade de microgeração residencial que utiliza o potencial hidráulico da rede pública de abastecimento, que chega até a caixa d'água e move uma turbina Pelton instalada na mesma. A partir do dimensionamento foi estimada a geração de energia elétrica, o custo de instalação do sistema e uma análise de viabilidade financeira simples foi realizada, que consiste na relação do investimento inicial comparado com a economia anual de energia gerada.

**Palavras-chave:** Microgeração de energia elétrica. Instalações hidráulicas. Turbina Pelton.

## ABSTRACT

CALDART, Caroliny C.; MACHADO, Gustavo Z.. **ESTUDO DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO HIDROELÉTRICA DA REDE PÚBLICA DE ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE UMA TURBINA PELTON INSTALADA EM UMA CAIXA D'ÁGUA**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Today, its well known the world energy resources by fossil fuels has a well defined limit of use, in contrast with the increasing demand for energy. Also, due to mainly environmental issues, these fossil sources tends to be gradually replaced by renewable energy resources, as its impact on the environment and climate change is less pronounced. From this background, the present work aims to analyze the viability of microgeneration on urban residences, using a so called Pelton turbine, running based on the hydraulic head of the public water supply network. From the design, were determined the electricity generation, the cost of system installation and a simple, yet effective, financial viability analysis was performed, consisting of the initial investment ratio compared to the annual savings generated energy.

**Keywords:** Microgeneration of electricity. Hydraulic installations. Pelton turbine.



## SUMÁRIO

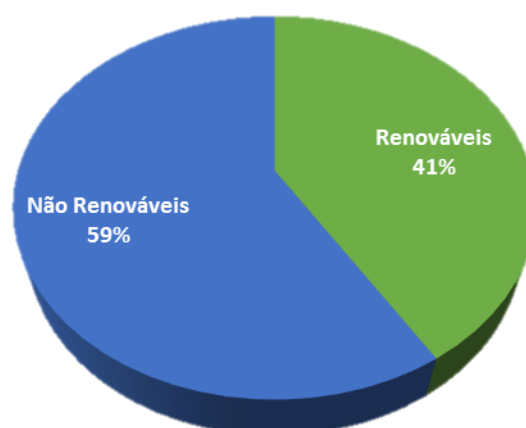
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 <i>Objetivo geral.....</i>	12
1.1.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	12
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Estrutura do trabalho.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Geração distribuída.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Energia hidráulica.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Máquinas de fluxo.....</b>	<b>16</b>
2.4.1 <i>Turbomáquinas.....</i>	17
2.4.1.1 <i>Elementos construtivos.....</i>	17
2.4.1.2 <i>Classificação.....</i>	17
2.4.1.2.1 <i>Segundo o sentido de transmissão.....</i>	18
2.4.1.2.2 <i>Segundo a forma dos canais entre pás do rotor.....</i>	18
2.4.1.2.3 <i>Segundo a trajetória do fluido no rotor.....</i>	18
2.4.2 <i>Principais tipos de turbomáquinas.....</i>	18
2.4.2.1 <i>Turbina Francis.....</i>	19
2.4.2.2 <i>Turbina Kaplan.....</i>	19
2.4.2.3 <i>Turbina Pelton.....</i>	20
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Coleta de dados.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Seleção do local de instalação da turbina.....</b>	<b>24</b>
3.2.1 <i>Perdas de carga.....</i>	25
<b>3.3 Dimensionamento.....</b>	<b>28</b>
3.3.1 <i>Dimensionamento do rotor.....</i>	28

3.3.2 Dimensionamento das pás.....	33
<b>3.4 Instalação na caixa d'água.....</b>	<b>34</b>
3.4.1 Estrutura.....	35
3.4.2 Sensores de nível de água.....	36
<b>3.5 Conversão de energia.....</b>	<b>37</b>
3.5.1 Alternador.....	37
3.5.2 Inversor de frequência.....	38
<b>3.6 Potência útil.....</b>	<b>39</b>
<b>4 VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>42</b>
4.1 Custos.....	42
4.2 Geração.....	43
4.3 Economia.....	44
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Iniciou-se esta pesquisa refletindo sobre a matriz energética mundial, esta que é composta por uma grande variedade de fontes de energia. Dentre elas podem ser citadas algumas como o petróleo, gás natural, carvão mineral, energia nuclear, energia hidráulica, energia eólica, biomassa, entre outras. Apesar da diversidade na maioria dos países as fontes não renováveis são as mais utilizadas. No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), em dados divulgados no Balanço Nacional de Energia (BNE) de 2016 tem-se que 58,8% da energia ofertada é oriunda de fontes não renováveis de energia, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Repartição da oferta interna de energia.



Fonte: BNE, 2016.

Apesar de ser maior, a utilização de fontes não renováveis vem diminuindo gradualmente. Essa diminuição pode ser notada comparando os dados do Balanço Nacional de Energia de 2015, com uma oferta de 60,6%, e de 2016, com 58,8%. Observa-se uma redução de 1,8%. Essa queda se dá principalmente pela redução da geração com utilização de derivados de petróleo e o incremento da geração com biomassa e eólica.

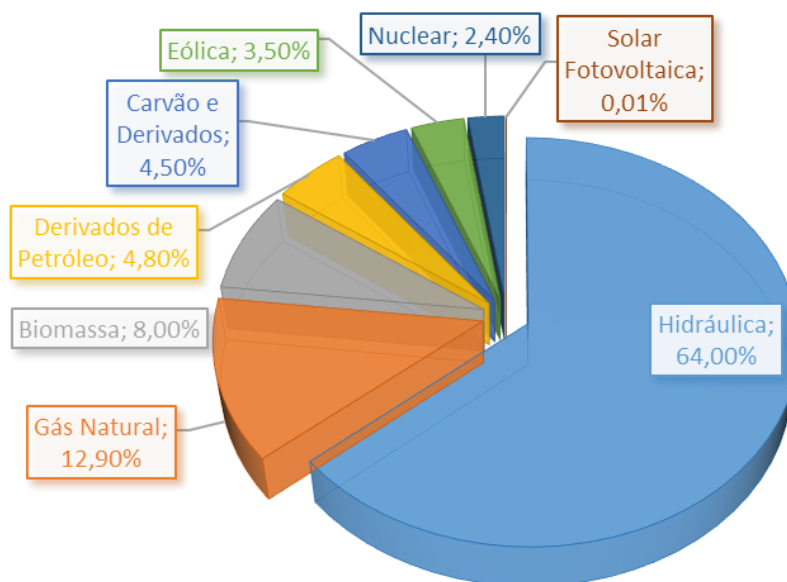
Considerando que a demanda de energia elétrica tem uma taxa de crescimento acima do PIB, gerando assim uma maior necessidade de produção de energia com o

passar do tempo, acompanhando o desenvolvimento industrial, tecnológico e a taxa de crescimento populacional. Segundo dados de 2013 da EPE, a eletricidade representa aproximadamente 17% da demanda de energia brasileira, com projeções para aumentar para 23% até 2050. Tal aumento da demanda pede que se aumente a capacidade de geração. Sabe-se que as fontes de origem fóssil, como o petróleo e o gás natural, além de grandes emissores de gases de efeito estufa, causam impactos ambientais e também possuem uma reserva finita, dessa forma torna-se conveniente o estudo e aprimoramento de fontes e gerações de energia renováveis.

O estudo de novas fontes de geração de energia é um desafio moderno. Todo e qualquer estudo pode fazer a diferença em uma eventual crise energética.

Em termos de consumo, no Brasil, segundo BNE de 2016, 64% vêm da energia hidráulica, como pode ser observado na Figura 2. Tal porcentagem se dá visto que o Brasil possui um dos cinco maiores potenciais hidrelétricos do mundo, estimado em 260 GW (ANEEL, 2008). A energia hidráulica é realmente uma boa alternativa, quando bem utilizada. Ela causa poucos impactos ambientais, apresenta custos razoáveis e pode ser usada em pequenas ou grandes potências (NOGUEIRA e FILHO, 2007).

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira.



Fonte: BNE, 2016.

Constatou-se que alguns dos problemas encontrados na utilização de grandes centrais hidrelétricas (GCH) envolvem impacto ambiental devido à vasta área de

alagamento e também o referente às perdas na transmissão da energia gerada até o ponto de consumo. É nesse contexto que surge a ideia da geração descentralizada de energia, onde há o estímulo da criação de pequenas centrais geradoras, mais próximas das unidades consumidoras e diminuindo assim problemas das questões ambientais, de transmissão e de distribuição.

Seguindo esse contexto de incentivar o desenvolvimento da geração distribuída e a utilização de fontes renováveis o Ministério de Minas e Energia (MME) lançou um programa que tem como objetivo estimular a geração de energia pelos próprios consumidores, é o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD). Nesse programa o consumidor que gera energia em sua própria residência tem benefícios como a criação de créditos de energia, que funciona da seguinte forma: quando a geração for maior do que o consumo, pode-se abater os valores da fatura dos meses seguintes, é o chamado Autoconsumo remoto, onde o consumidor pode também abater a fatura de outros imóveis que estejam em seu nome.

O incentivo da geração descentralizada de energia promove inúmeros benefícios a todos. Ainda mais quando esse incentivo parte do governo em promover uma geração residencial e com fontes alternativas e renováveis de energia. É nesse contexto que esse trabalho apresenta uma alternativa de geração que utiliza o potencial da água que chega até a residência por meio da rede pública de abastecimento.

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo geral*

Projetar um sistema composto por uma turbina Pelton que será instalado na caixa d'água, juntamente um alternador e um inversor de voltagem, visando um baixo custo de fabricação e instalação, a fim de se gerar energia elétrica a partir do consumo de água residencial.

### *1.1.2 Objetivos específicos*

- Dimensionar as pás e rotor da turbina Pelton;

- Estudar a geração de energia do projeto;
- Estudar a viabilidade econômica de instalação.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, conforme descrito abaixo:

No Capítulo 1 apresentou-se uma introdução abordando o assunto de estudo e os objetivos para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 desenvolveu-se um referencial teórico do tema, abordando a geração descentralizada de energia, energia hidráulica e as máquinas de fluxo.

O Capítulo 3 é composto pela metodologia onde são apresentados todos os meios utilizados para se cumprir os objetivos deste trabalho. Parte da coleta de dados, dimensionamentos, escolha de equipamentos e cálculo de potência.

O Capítulo 4 trata da viabilidade econômica do projeto, traz resultados onde são mostrados os custos, a geração de energia do projeto e um estudo da economia.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Geração distribuída

Para dar início a este tópico que aborda o referencial teórico podemos dizer que não existe um consenso quanto ao significado de geração distribuída (GD), visto que muitos fatores podem afetar sua definição como tecnologias envolvidas, potência, entre outras. No entanto de acordo com Borbely:

GD é qualquer tecnologia de geração de energia elétrica em pequena escala, que fornece energia elétrica próxima ou no próprio local de carga. Pode ser interligado a rede de distribuição, diretamente para as instalações do cliente ou ambos (BORBELY, 2001, p. 28).

No Brasil, geração distribuída foi definida de forma oficial através do Decreto nº 5.163 de 30 de Julho de 2004, e foi definida da seguinte forma:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei nº 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.

Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput (BRASIL, 2004, p. 5).

Cabe dizer que as crises energéticas e a preocupação com os impactos ambientais ocasionam o aparecimento de novos problemas que influenciam na indústria energética (TECNALIA, 2007).

Assim, as inovações tecnológicas, o aumento do consumo de energia, o aumento dos custos de distribuição da energia e a preocupação com as mudanças climáticas fazem com que o interesse em formas de geração distribuída de energia venha crescendo gradualmente.

Segundo Tecnalía (2007):

A maioria das grandes centrais geradoras de energia se encontram situadas a grandes distâncias dos centros de consumo, assim, é necessário implantar um sistema com uma infraestrutura complexa para transportar a energia e

fazer com que a mesma chegue para os usuários com ótimas condições de uso (TECNALIA, 2007, p. 8).

Pode-se dizer que uma das vantagens da GD sobre a geração central é que ela economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas existentes nesse sistema, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica.

O crescimento da GD nos próximos anos parece inexorável. Atualmente, segundo Adjuto (2016), os equipamentos do sistema possuem um alto custo, mas com o tempo as expectativas são de que os preços de aquisição diminuam e o retorno do investimento ocorra em menor prazo. Previsões da Aneel dizem que, até 2024 cerca de 1,2 milhão de residências no Brasil vão contar com o sistema de GD.

No Brasil, desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade. São as chamadas micro e minigeração distribuída de energia elétrica, que são inovações que aliam a economia financeira, a consciência socioambiental e a autossustentabilidade.

Em 2015 a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015 onde ela revisa a Resolução Normativa nº 482/2012. Nela ficam estabelecidas novas regras que entraram em vigor em 1º de março de 2016, e segundo as mesmas fica permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 megawatts (MW), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

A norma também cita que quando a quantidade de energia gerada em um mês for superior à energia consumida no mesmo período, o consumidor ganha créditos, com prazo de validade de até 60 meses, que podem ser utilizados para abater as próximas faturas. Esse sistema de créditos ao consumidor foi chamado de “autoconsumo remoto”.

No que diz respeito aos procedimentos legais para a instalação de uma unidade de micro ou minigeração distribuída, a ANEEL simplificou o processo criando formulários padrões para a solicitação de acesso pelo consumidor e também reduziu o prazo para a distribuidora conectar usinas microgeradoras para 34 dias. Atualmente,



segundo a ANEEL, no Brasil existem mais de 4000 consumidores que possuem micro ou minigerações distribuídas residenciais.

Para se falar em geração de energia é necessário falar de formas de energias. Assim sendo, inicia-se abordando a energia hidráulica.

## **2.2 Energia hidráulica**

Uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico foi através do uso da energia hidráulica, principalmente para bombeamento de água e moagem de grãos. A grande disponibilidade de recursos, a facilidade de utilização e por ser renovável, são características que geram muitos pontos positivos para esse tipo de energia.

Ao contrário das demais energias renováveis, a energia hidráulica possui tecnologias de aproveitamento consolidadas e representa uma parcela significativa na matriz energética mundial. No Brasil, a contribuição da energia hidráulica para o desenvolvimento do país é expressiva e ela também desempenha papel importante no desenvolvimento de regiões afastadas dos centros urbanos e industriais (ANEEL, 2005).

Para se aproveitar a energia hidráulica a fim de se gerar energia elétrica, é necessário que se transforme a energia. A conversão é feita através das turbinas hidráulicas que são postas em rotação ao receber a massa de água, gerando energia cinética, esta que é convertida em energia elétrica através de um gerador.

## **2.3 Máquinas de fluxo**

Uma máquina de fluxo é o equipamento que promove a troca de energia entre um sistema mecânico e um fluido (HENN, 2006), transformando energia cinética em energia potencial e vice-versa. Elas podem ser classificadas como:

- Volumétricas (ou deslocamento positivo);
- Dinâmicas (ou turbomáquinas).

Nas máquinas de deslocamento positivo, a transferência de energia é feita por variações de volume que ocorrem devido ao movimento da fronteira na qual o fluido

está confinado. Diferente das máquinas de deslocamento positivo, as turbomáquinas não possuem um volume confinado (FOX, 2006), o fluido tem um fluxo contínuo através da máquina o que o sujeita a trocas de energia devido a efeitos dinâmicos.

### 2.3.1 Turbomáquinas

De acordo com Cláudio Mataix (1973, p. 18):

Turbomáquinas são máquinas de fluxo nas quais o intercâmbio de energia se dá da variação do movimento cinético do fluido, ao passar por um órgão que se move com movimento de rotação e possui lâminas ou pás, denominado rotor.

#### 2.3.1.1 Elementos construtivos

Os elementos construtivos fundamentais utilizados nas turbomáquinas são o rotor e o sistema diretor, nos quais acontecem os fenômenos fluidomecânicos essenciais para o funcionamento da máquina.

O rotor é o órgão principal de uma máquina de fluido, pois é onde acontece a transformação da energia. Ele é constituído de pás giratórias que dividem o espaço em canais por onde circula o fluido de trabalho, retirando ou cedendo energia para o mesmo (Brasil, 2013).

O sistema diretor tem como função coletar o fluido e direcionar seu fluxo para um determinado caminho. Em máquinas que transformam energia mecânica em potencial, o sistema diretor é colocado após o rotor, a fim de reduzir a parcela de energia cinética e aumentar a parcela de energia potencial. Já em máquinas que recebem energia potencial e a transforma em energia mecânica, coloca-se o sistema diretor antes do rotor, a fim de se realizar essa transformação de energia. Um caso específico é o da turbina Pelton, onde o sistema diretor se encontra na forma de um bico injetor, que aumenta a velocidade do fluido, transferindo energia para o rotor através de jatos.

#### 2.3.1.2 Classificação

Existem diversos critérios utilizados para se classificar uma turbomáquina, dentre eles pode-se destacar os seguintes:

#### 2.3.1.2.1 Segundo o sentido de transmissão

Na classificação das turbomáquinas segundo seu sentido de transmissão de energia, elas se dividem em motoras e geradoras. Uma turbomáquina motriz é a que transforma a energia potencial do fluido em trabalho mecânico, enquanto uma turbomáquina geratriz é a que recebe trabalho mecânico e o transforma em energia potencial do fluido (Henn, 2006). Como exemplo para esses dois tipos de turbomáquinas temos as turbinas hidráulicas e as bombas centrífugas, respectivamente.

#### 2.3.1.2.2 Segundo a forma dos canais entre pás do rotor

As turbomáquinas se dividem em máquinas de ação (*impulse turbomachines*) e máquinas de reação (*reaction turbomachines*). No caso das turbomáquinas de ação não há aumento ou diminuição da pressão do fluido, os canais do rotor agem como simples desviadores de fluxo. Um exemplo desse tipo de máquina é a turbina hidráulica do tipo Pelton. Já nas turbomáquinas de reação, os canais entre as pás do rotor agem como injetores e difusores, no caso das turbinas onde há a redução da pressão do fluido e bombas onde há o aumento da pressão, respectivamente. A turbina Francis é um exemplo desse tipo de turbomáquina. (Henn, 2006).

#### 2.3.1.2.3 Segundo a trajetória do fluido no rotor

Quanto trajetória do fluido no rotor, as turbomáquinas se classificam em radiais, axiais e diagonais. Nas turbomáquinas de fluxo radial o escoamento do fluido percorre uma trajetória perpendicular ao eixo do rotor. Nas máquinas com fluxo axial, o escoamento se dá em uma direção perpendicular ao eixo do rotor. E por fim, quando o escoamento não é radial e nem axial, se denomina como diagonal, onde o fluido percorre o rotor com uma trajetória sobre uma superfície aproximadamente cônica (Henn, 2006).

### 2.3.2 *Principais tipos de turbomáquinas*

Nas próximas seções serão apresentadas algumas das principais turbinas hidráulicas:

#### 2.3.2.1 Turbina Francis

Foi concebida por volta de 1820, e aperfeiçoada pelo engenheiro norte-americano James Francis em 1849. São turbinas rigorosamente centrípetas, adotadas em instalações onde se tem quedas e vazões de água medianas

Essencialmente, são compostas por: uma caixa em forma de caracol no tipo fechado ou uma câmara de adução no tipo aberto; um distribuidor dotado de pás orientáveis que regulam a descarga para a potência demandada; um rotor ou receptor, composto por pás de formato especial; e um tubo de sucção também chamado de difusor, que conduz água que sai do receptor até o canal de fuga.

As Turbinas Francis são classificadas como do tipo de reação e são de ação total, pois a água atua simultaneamente em todas as pás do rotor (Macintyre, 1983). O fluxo entra diagonalmente ao seu eixo de rotação, e preenche completamente toda a voluta que cerca a turbina. Por isso é considerada uma turbina de fluxo misto.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é a maior geradora de energia elétrica do Brasil e utiliza Turbinas Francis devido à queda de 118,4 metros e uma vazão de 690 mil litros de água por segundo. Segundo dados disponibilizados pela própria Itaipu, cada uma das 20 unidades tem capacidade de gerar 700 MW.

#### 2.3.2.2 Turbina Kaplan

Criada em 1912 pelo engenheiro Victor Kaplan, esse tipo de turbina comporta a possibilidade de variar o passo das pás, ou seja, uma hélice de pás orientáveis (Macintyre, 1983).

Estruturalmente semelhante às turbinas Francis, são classificadas como turbinas axiais e de reação. A principal diferença das turbinas Kaplan, é o fato de seu rotor e distribuidor serem equipados com pás e ajustáveis. A inclinação das pás é variada automaticamente conforme a variação da carga de água.

Devido a essa peculiaridade, as Kaplan possuem uma eficiência alta, entre 90 e 95%, e pode ser instalada e tanto em pequenas, médias e grandes quedas. A terceira maior turbina Kaplan do mundo está sendo instalada na UHE Sinop, no Mato

Grosso. Segundo a construtora Triunfo SA, responsável pela obra, cada uma das duas turbinas Kaplan gerará 200 MW a partir de uma queda d'água de 50 metros.

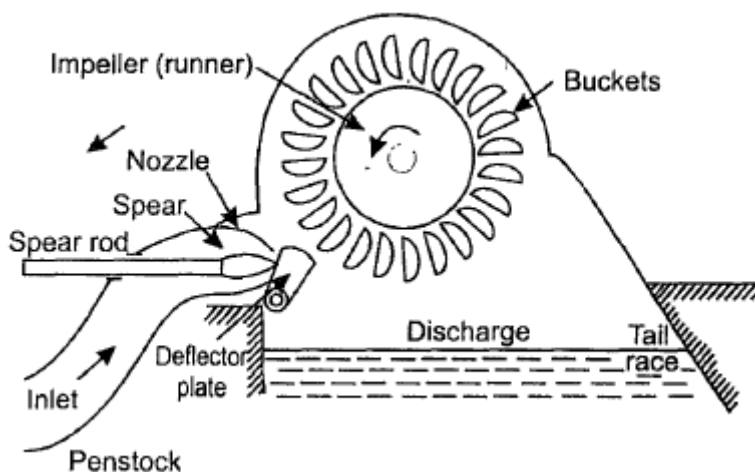
### 2.3.2.3 Turbina Pelton

A turbina Pelton foi criada pelo americano Allan Lester Pelton em 1978 após a realização de experimentos com rodas d'água, baseadas no conceito chamado "splitter".

A Pelton é classificada como uma turbina de ação, onde não ocorre diminuição da pressão nas pás. Quanto a posição do jato, é chamada de turbina tangencial ou de ação parcial, pois a água é lançada sob a forma de um jato sobre um número limitado de pás do receptor.

Como todas as turbinas, a Pelton também é composta essencialmente por um distribuidor e um rotor. O distribuidor é na forma de um bico injetor, que direciona a água na forma de um jato cilíndrico até as pás do rotor. O rotor é composto por uma determinada quantidade de pás bifurcadas, distribuídas na periferia de um disco que movimenta o eixo acoplado ao gerador.

Figura 3 -Diagrama de arranjo de uma turbina Pelton convencional.



Fonte: Hussian et al., 2009.

Quando se tem necessidade de obter elevadas potências, podem ser instalados mais bicos injetores. Assim as turbinas Pelton Podem ser de um, dois, quatro, e seis jatos. Casos excepcionais de três e cinco jatos podem existir, mas não são comuns.

O jato de água que sai do bico injetor a pressão atmosférica, pode ter sua velocidade controlada através de uma agulha de dispersão. Após atingir o centro das pás do rotor, que tem o formato de conchas simétricas (Figura 4), concedendo velocidade angular para a roda Pelton, a água é despejada em um reservatório. No presente trabalho, o reservatório é a caixa d'água.

Figura 4 - Modelo 3D de uma roda Pelton.



Fonte: Hidrotech Turbine.

Por serem de fabricação, instalação e regulagem simples, além de empregadas em usinas de grande potência, as turbinas Pelton são largamente empregadas em micro usinas, em fazendas, sítios etc., aproveitando quedas e vazões bem pequenas, para geração de algumas dezenas de cavalos vapor (cv) (Macintyre, 1983).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Coleta de dados

Dados fundamentais para o dimensionamento da turbina e outros componentes da turbina, como pressão e vazão, não são facilmente disponibilizados e não foram encontrados em nenhuma literatura. Com o objetivo de estudar a viabilidade deste projeto, optou-se por buscar dados mais precisos, para aproximar os valores calculados de um projeto real.

Como o presente projeto está diretamente ligado ao abastecimento público de água, consultou-se a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), responsável pela distribuição de água na cidade de Cornélio Procópio. Mediante uma autorização concedida pelo Gerente da Unidade Regional, o engenheiro Braulio Lozano Leonel, a companhia forneceu dados importantes para a continuidade do trabalho.

Para o dimensionamento de uma turbina Pelton é fundamental o conhecimento da altura da queda de água no ponto desejado. Para obter esse dado, recorreu-se a SANEPAR, que se disponibilizou a instalar um medidor de pressão para medir a carga total que chega até o ponto de consumo. Optou-se por instalar o aparelho no hidrômetro da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Figura 5), devido a facilidade de instalação por parte dos funcionários da SANEPAR, e também a boa localização da mesma com relação ao ponto de distribuição de água, localizado no ponto mais alto da cidade.

Os dados foram adquiridos por um equipamento denominado Logger 450428, que durante seis dias registrou a pressão instantânea de minuto em minuto.

Figura 5 - Logger 450428 instalado no hidrômetro da UTFPR.

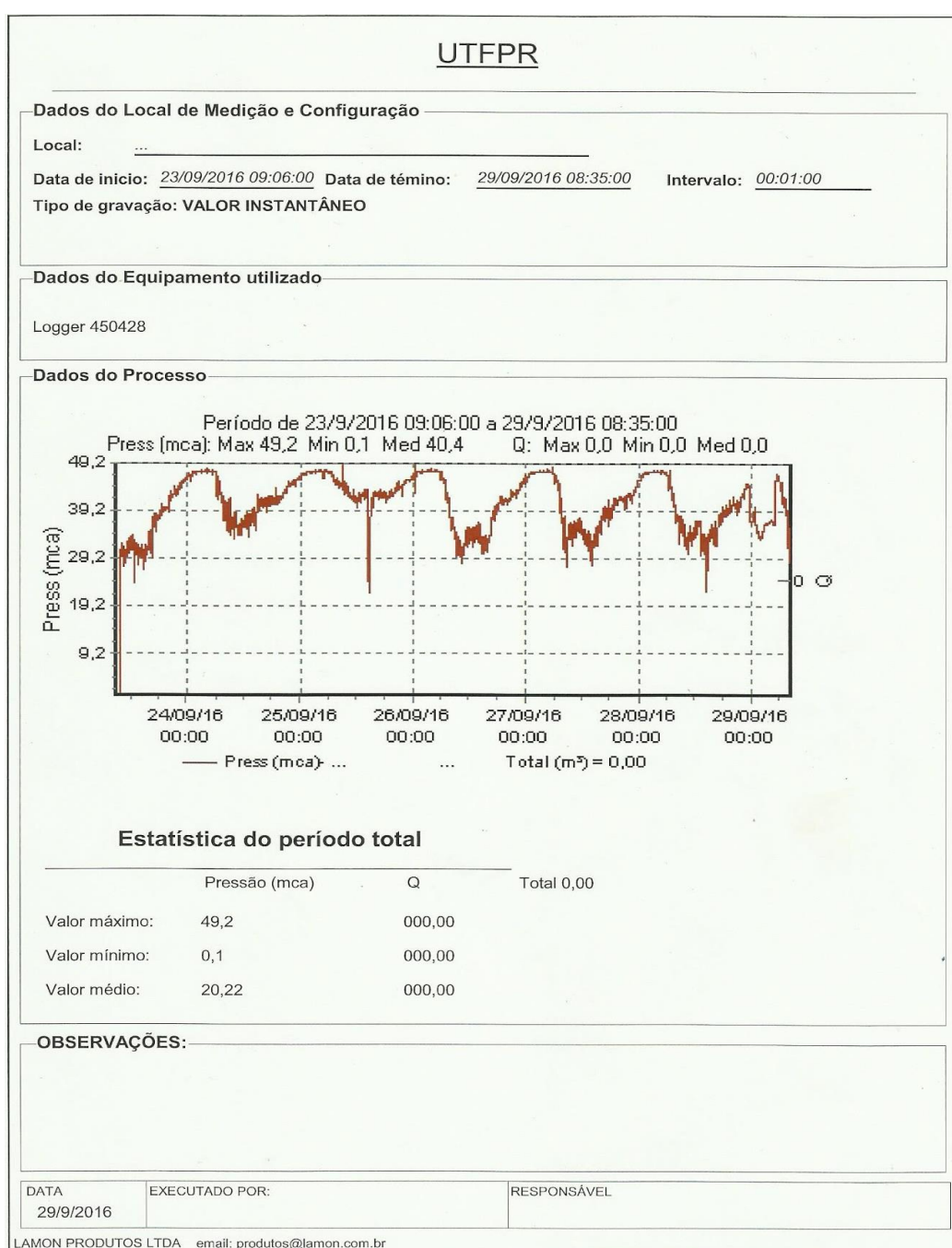


Fonte: A autoria própria.

Os dados absorvidos pelo aparelho foram nos apresentados na forma de um relatório, e também em planilha de dados. O gráfico presente no relatório (Figura 6) que será mostrado abaixo, mostra alguns vales muito baixos com pressão perto de 0 mca, que segundo instruções dos funcionários poderiam ser desconsiderados pois representam erros de leitura do equipamento.

Observou-se que durante o período analisado a pressão se manteve, na maior parte do tempo, entre 30 e 50 mca, e o valor médio calculado foi de 40,74 mca.

Figura 6 - Relatório de medição





Outro dado fundamental para os cálculos e dimensionamentos, é a vazão de água. Utilizou-se então, um diagrama disponibilizado pela SANEPAR para o pré-dimensionamento de hidrômetro (Figura 7), onde se observou que para residências comuns, os hidrômetros utilizados possuem uma vazão máxima de trabalho ( $Q_{máx}$ ) de 1500 litros por hora.

Figura 7 - Tabela para pré-dimensionamento de hidrômetros e manutenção preventiva de 2014.

TABELA PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE HIDROMÊTROS E MANUTENÇÃO PREVENTIVA DE 2014								
FAIXA DE CONSUMO (m <sup>3</sup> /mês)	CARACTERÍSTICAS DO MEDIDOR						Idade p/ troca preventiva (anos)	FAIXA DE VOLUME REGISTRADO P/ TROCA (m <sup>3</sup> )
	Q nom	Q máx	Diâmetro		CLASSE	TIPO		
	m <sup>3</sup> /h		mm	pol	METROLÓGICA			
0 a 10	0,75	1,5	20	3/4"	B	unijato	8	1000 a 1800
11 a 30	0,75	1,5	20	3/4"	B	unijato		1000 a 2900
31 a 80	1,5	3,0	20	3/4"	C	multijato / volumét.		2900 a 10000
81 a 200	1,5	3,0	20	3/4"	C	multijato / volumét.		7000 a 10000
201 a 400	2,5	5,0	20	3/4"	C	multijato / volumét.		10000 a 15000
401 a 800	3,5	7,0	25	1"	C	multijato / volumét.		25000 a 45000
801 a 1000	10	20	40	1.1/2"	C	multijato / volumét.		45000 a 65000
1001 a 3000	15	30	50	2"	C	multi/ unijato		65000 a 100000
3000 - 6570	15 a 20	30 a 40	50	2"	B	woltmann		150000
6570 - 21900	55	110	80	3"	B	woltmann		500000
21900 - 32850	90	180	100	4"	B	woltmann		750000
32850 - 65700	150	300	150	6"	B	woltmann		1500000

FONTE: SANEPAR.

### 3.2 Seleção do local de instalação da turbina

A escolha do local de instalação da turbina é um dos pontos principais do projeto. Escolheu-se a caixa d'água para receber a turbina devido às perdas de carga.

O projeto visa gerar energia elétrica através de outros tipos de energia que antes não eram aproveitados, como a energia cinética da água que chega até a residência, porém é primordial que essa conversão de energia não interfira de forma negativa no suprimento de água da residência. Posicionando a turbina na caixa d'água, mantemos função principal do abastecimento público, e aproveitamos a velocidade do fluxo de água que chegou até a caixa.

O local de instalação na residência influenciou diretamente também na seleção de qual modelo de turbina seria adotado no projeto. Como visto anteriormente, nas turbinas Pelton não há variação de pressão nas pás da turbina. Neste ponto, o fluido

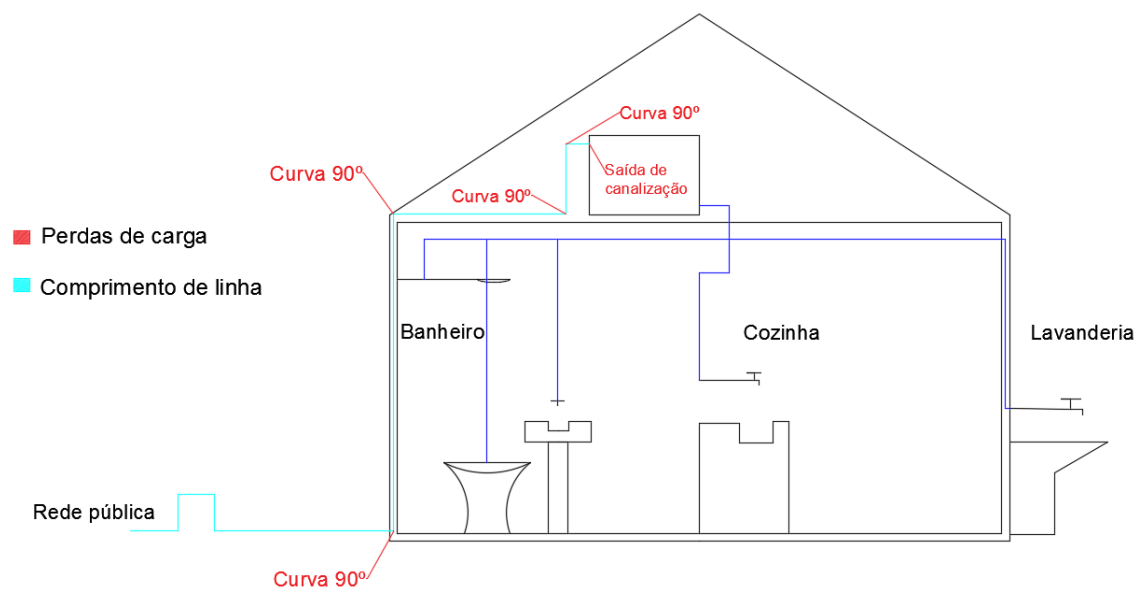
se encontra a pressão ambiente, e após transferir energia para as pás da turbina, ela é despejada na caixa d'água.

### 3.2.1 Perdas de carga

Para o cálculo das perdas de carga, foram considerados os acessórios utilizados e o comprimento da linha. A partir do diagrama da instalação hidráulica da residência (Figura 8), pode-se considerar a utilização de:

- 4 curvas de 90°;
- 1 saída de canalização;
- 10 metros de comprimento de linha.

Figura 8 - Representação dos acessórios e linha de distribuição.



















Fonte: Autoria própria.

Optou-se pela utilização das curvas de 90° no lugar dos tradicionais cotovelos, devido a sua menor perda de carga, o que pode gerar uma maior eficiência para o projeto.

Através da tabela de perdas de carga foi possível encontrar a queda de pressão ( $h_{perda}$ ), ou perdas ao longo da tubulação. O material utilizado foi o PVC e o diâmetro da tubulação  $\frac{3}{4}$ ". A Figura 9 traz a equivalência dos acessórios em metros de tubulação e suas respectivas perdas de acordo com o material e diâmetro.

Figura 9 - Tabela de perdas de cargas localizadas em conexões, considerando-se os comprimentos equivalentes em metros de canalização.

CONEXÃO		Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização									
		MATERIAL	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"
Curva 90°		PVC	0,5	0,6	0,7	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,9
		Metal	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,0	1,3	1,6	2,1
Curva 45°		PVC	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
		Metal	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Joelho 90°		PVC	1,2	1,5	2,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,3	4,9
		Metal	0,7	0,8	1,1	1,3	1,7	2,0	2,5	3,4	4,2
Joelho 45°		PVC	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	2,5
		Metal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,9
Tê de passagem direta		PVC	0,8	0,9	1,5	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	3,3
		Metal	0,4	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,6	2,1	2,7
Tê de saída lateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
Tê de saída bilateral		PVC	2,4	3,1	4,6	7,3	7,6	7,8	8,0	8,3	10,0
		Metal	1,4	1,7	2,3	2,8	3,5	4,3	5,2	6,7	8,4
União		PVC	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,25
		Metal	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Saída de canalização		PVC	0,9	1,3	1,4	3,2	3,3	3,5	3,7	3,9	4,9
		Metal	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	1,9	2,2	3,2	4,0
Luva de redução (*)		PVC	0,3	0,2	0,15	0,4	0,7	0,8	0,85	0,95	1,2
		Aço	0,29	0,16	0,12	0,38	0,64	0,71	0,78	0,9	1,07
Registro de gaveta ou esfera aberto		PVC	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1
		Metal	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Registro de globo aberto		Metal	6,7	8,2	11,3	13,4	17,4	21,0	26,0	34,0	43,0
Registro de ângulo aberto		Metal	3,6	4,6	5,6	6,7	8,5	10,0	13,0	17,0	21,0
Válvula de pé com crivo		PVC	9,5	13,3	15,3	18,3	23,7	25,0	26,8	28,8	37,4
		Metal	5,6	7,3	10,0	11,6	14,0	17,0	22,0	23,0	30,0
Válvula de Retenção	Horizontal 	Metal	1,6	2,1	2,7	3,2	4,2	5,2	6,3	6,4	10,4
	Vertical 	Metal	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,1	9,7	12,9	16,1

Fonte: SCHNEIDER Motobombas, 2011.

Encontrou-se a perda de 0,5 metros por curva de 90° e 0,9 metros por saída de canalização.

Através do da vazão é possível encontrar o valor da perda de carga por metro de tubulação. A Figura 10 mostra o valor da perda em metros por cada 100 metros de tubos plásticos.

Figura 10 - Perdas de carga em tubulações plásticas, em metros por cada 100 metros (%), de tubos novos.

VAZÃO			DIÂMETRO NOMINAL – Pol e mm									
m <sup>3</sup> / Hora	Litros/ Hora	Litros/ Seg.	3/4" 25	1" 32	1 1/4" 40	1 1/2" 50	2" 60	2 1/2" 75	3" 85	4" 110	5" 140	6" 160
0,5	500	0,138	1,72	0,60	0,18							
1,0	1000	0,277	5,79	2,00	0,62	0,20	0,07					
1,5	1500	0,416	11,80	4,00	1,25	0,45	0,15					
2,0	2000	0,555	19,50	6,80	2,10	0,70	0,25	0,06				
2,5	2500	0,694	28,80	10,00	3,10	1,10	0,37	0,09				
3,0	3000	0,833	39,60	13,70	4,20	1,50	0,50	0,13	0,04			
3,5	3500	0,972	52,00	18,00	5,50	1,95	0,68	0,17	0,07			
4,0	4000	1,111	65,50	22,70	7,00	2,50	0,85	0,21	0,09			
4,5	4500	1,250	80,50	27,90	8,60	3,00	1,00	0,26	0,11			
5,0	5000	1,388	97,00	33,50	10,40	3,60	1,25	0,31	0,13			
5,5	5500	1,527		39,60	12,30	4,30	1,50	0,37	0,15			
6,0	6000	1,666		46,20	14,30	5,00	1,70	0,43	0,18	0,05		
6,5	6500	1,805		53,10	16,50	5,70	2,00	0,49	0,21	0,06		
7,0	7000	1,944		60,50	18,70	6,50	2,30	0,56	0,24	0,07		
7,5	7500	2,083		68,30	21,20	7,30	2,60	0,63	0,27	0,08		
8,0	8000	2,222		76,40	23,60	8,20	2,90	0,70	0,31	0,09		
8,5	8500	2,361		85,00	26,30	9,10	3,20	0,78	0,34	0,10		
9,0	9000	2,500		94,00	29,00	10,00	3,50	0,87	0,38	0,11	0,02	
9,5	9500	2,638			32,00	11,00	3,90	0,96	0,41	0,12	0,03	0,02
10,0	10000	2,777			35,00	12,10	4,20	1,05	0,45	0,13	0,04	0,03
12,0	12000	3,333			48,00	16,80	5,80	1,45	0,62	0,17	0,06	0,04
14,0	14000	3,888			63,00	22,00	7,60	1,90	0,80	0,23	0,08	0,06
16,0	16000	4,444			80,00	28,00	9,50	2,40	1,00	0,28	0,10	0,07
18,0	18000	5,000			98,00	34,00	12,00	3,00	1,25	0,35	0,12	0,08
20,0	20000	5,555				41,00	14,20	3,60	1,50	0,42	0,15	0,10
25,0	25000	6,944				60,00	21,00	5,20	2,20	0,62	0,23	0,17
30,0	30000	8,333				83,00	29,00	7,20	3,00	0,85	0,30	0,20
35,0	35000	9,722				100,00	38,00	9,40	4,00	1,20	0,40	0,28
40,0	40000	11,111					48,00	12,00	5,10	1,45	0,50	0,34
45,0	45000	12,500						14,50	6,30	1,80	0,60	0,40
50,0	50000	13,888						18,00	7,50	2,10	0,70	0,46
55,0	55000	15,277						21,00	9,00	2,50	0,90	0,55
60,0	60000	16,666						24,00	10,50	2,90	1,00	0,65
70,0	70000	19,444						32,00	13,60	3,80	1,35	1,00
80,0	80000	22,222						40,00	17,20	4,80	1,70	1,20
90,0	90000	25,000						49,00	21,00	5,90	2,10	1,50
100,0	100000	27,777						69,00	25,50	7,00	2,50	1,80
120,0	120000	33,333						81,00	35,00	10,00	3,50	2,40
140,0	140000	38,888								19,35	6,00	3,10
160,0	160000	44,444									7,25	3,85
180,0	180000	50,000									9,00	4,70
200,0	200000	55,555									10,00	5,50

Fonte: Ferraz, 2011

Considerando que foram utilizados 10 metros de tubulação na instalação hidráulica, temos uma perda de carga de 1,18 metros.

Somando todas as perdas, é possível encontrar o  $h_{perda}$ :

$$h_{perda} = 4 * 0,5 + 0,9 + 1,18 \quad (1)$$

$$h_{perda} = 4,08 \text{ metros} \quad (2)$$

Se faz necessário também considerar a altura da caixa d'água instalada, temos de acrescentar mais 4 metros de altura nas perdas. Assim obtêm-se o valor final do  $h_{perda}$ :

$$h_{perda} = 8,08 \text{ metros} \quad (3)$$

### 3.3 Dimensionamento

Considerou-se como referência o memorial de roteiro descrito por Hussian et al. (2009, p. 104).

#### 3.3.1 Dimensionamento do rotor

Na Seção 3.2.1 foram calculadas as perdas de carga. Ao subtrair o valor da perda de carga, do valor médio que é entregue pela concessionária de abastecimento, obtemos o valor da carga disponível ( $H$ ):

$$H = H_{ideal} - h_{perda} \quad (4)$$

$$H = 40,745 - 8,08 \quad (5)$$

$$H = 32,665 \text{ metros} \quad (6)$$

A velocidade do jato é dada por:

$$V_1 = \sqrt{2gH} \quad (7)$$

Onde:

$V_1$  é a velocidade do jato (em m/s);

$g$  é a aceleração da gravidade (em m/s<sup>2</sup>);

$H$  é a carga disponível (em m).

Dessa forma, considerando a gravidade como  $9,81 \text{ m/s}^2$  encontrou-se uma velocidade de:

$$V_1 = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 32,665} \quad (8)$$

$$V_1 = 25,3158 \text{ m/s} \quad (9)$$

A velocidade  $V_1$  calculada corresponde à velocidade teórica do jato. Para se determinar a velocidade real é necessário multiplicar esse valor pelo coeficiente de velocidade ( $C_v$ ), que varia de 0,98 a 0,99. Optou-se por utilizar o valor de 0,99 porque se for observado que mesmo com uma eficiência alta o projeto não for viável, também não será com eficiências menores.

$$V_a = C_v \sqrt{2gH} \quad (10)$$

$$V_a = 0,99 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 32,665} \quad (11)$$

$$V_a = 25,0626 \text{ m/s} \quad (12)$$

A potência total para a turbina, a partir da queda de água disponível, é encontrada da seguinte forma:

$$P = \gamma QH \quad (13)$$

Onde:

$\gamma$  é o peso específico (em  $\text{N/m}^3$ );

$Q$  é a vazão (em  $\text{m}^3/\text{s}$ );

$H$  é a carga disponível (em m).

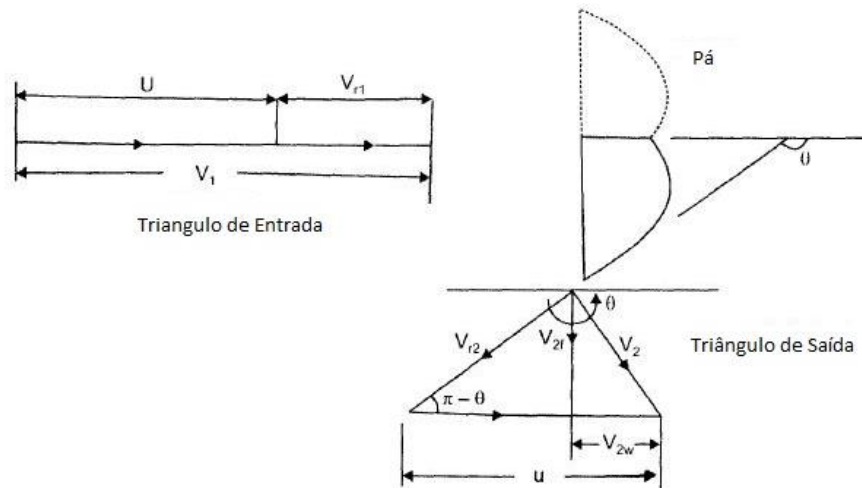
Sabendo que o peso específico  $\gamma$  vale  $9790,38 \text{ N/m}^3$ , que a vazão  $Q$  vale  $4,1667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  e que a carga  $H$  vale  $32,665 \text{ m}$ , temos:

$$P = 9790,38 \cdot 4,1667 \times 10^{-4} \cdot 32,665 \quad (14)$$

$$P = 133,2513 \text{ Watts} \quad (15)$$

Na Figura 11 tem-se a representação das velocidades do jato de água, antes e após este atingir a pá.

Figura 11 -Triângulos de velocidade nas pás.



Fonte: Hussian et al., 2009.

O ângulo  $\varphi$  é o ângulo de saída da água, após ser dividido pelo *splitter*. Segundo a literatura, varia entre  $10^\circ$  e  $20^\circ$ . Optamos pelo valor de  $15^\circ$ . A relação de  $\varphi$  e  $\theta$  é a seguinte:

$$\theta = 180^\circ - \varphi \quad (16)$$

Dessa forma, substituindo o valor de  $\varphi$ :

$$\theta = 180^\circ - 15^\circ \quad (17)$$

$$\theta = 165^\circ \quad (18)$$

O diâmetro máximo do jato ( $d$ ) pode ser determinado se a vazão é conhecida, já que a equação nos diz que:

$$Q = \text{área do jato} \cdot \text{velocidade do jato} \cdot n^\circ \text{ de jatos} \quad (19)$$

Como é utilizado apenas um jato:

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V_j \quad (20)$$

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot V_a \quad (21)$$

Evidenciando  $d$ :

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot V_a}} \quad (22)$$

$$d = 4,6 \text{ mm} \quad (23)$$

A relação de velocidade é a razão entre a velocidade da roda ( $u$ ) e a velocidade teórica do jato ( $V_1$ ). Na prática, o valor dessa razão deve estar entre 0,44 e 0,46. Optou-se por 0,46 de modo a alcançar uma velocidade maior.

$$\frac{u}{V_1} = 0,46 \quad (24)$$

Portanto a velocidade periférica da roda é:

$$u = 0,46 \cdot V_1 \quad (25)$$

$$u = 11.6453 \text{ m/s} \quad (26)$$



A relação de jato ( $m$ ), é descrita pela razão entre o diâmetro médio da roda Pelton, e o diâmetro máximo do jato. O valor dessa relação deve variar entre 10 e 14, onde foi adotado 14.

$$m = \frac{D}{d} \quad (27)$$

$$D = m \cdot d \quad (28)$$

Portanto o diâmetro médio da roda, que representa o diâmetro entre os centros das pás da turbina, vale:

$$D = 64,4 \text{ mm} \quad (29)$$

As formas de análise e dimensionamento de turbinas Pelton disponíveis na literatura, são baseadas em valores obtidos empiricamente ao longo dos anos. Em sua maioria, relacionam através de diagramas e gráficos valores como coluna d'água, vazão, pressão, rotação do eixo da turbina, entre outros. Entretanto, as grandezas relacionadas nestes gráficos e diagramas são de ordem muito superior aos pequenos valores de coluna de água e vazão disponíveis para a instalação de microgerações de energia. Um exemplo, é o pequeno diâmetro médio ( $D$ ) determinado, que inviabilizaria a construção de pás de geometria complexa com dimensões tão reduzidas.

Para corrigir e viabilizar a construção do projeto, foi utilizado um coeficiente de correção de valor 3 para todas as medidas relacionadas à roda Pelton. Mantendo o diâmetro máximo do jato, que deve ser entre 4 e 5 vezes menor que o diâmetro da tubulação de sucção. Desta forma, o valor corrigido do diâmetro médio é de 190,5 mm.

A rotação do rotor é calculada pela fórmula:

$$N = \frac{60 \cdot u}{\pi \cdot D} \quad (30)$$

$$N = 383,6573 \text{ rpm} \quad (31)$$

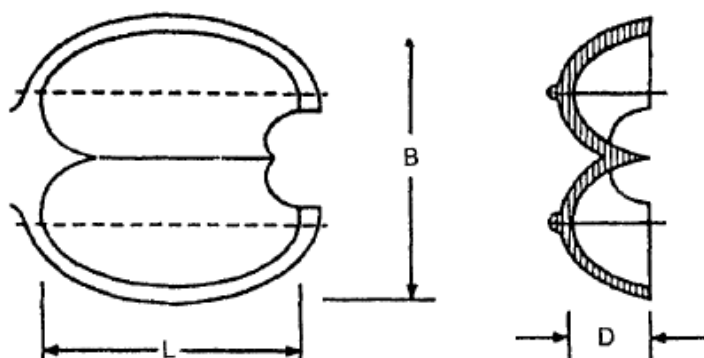
### 3.3.2 Dimensionamento das pás

As pás das turbinas Pelton são o que as diferenciam de rodas de águas comuns. Segundo Macintyre:

A peça da roda Pelton que mais exige cuidado no projeto e na execução são as pás, de cuja forma irá depender o bom funcionamento da máquina. Ela tem duas partes côncavas onde a água age para transformar energia cinética em trabalho mecânico. No centro existe um gume, para receber a água sem choque, dividindo o jato em duas partes iguais. Macintyre, et al. (1983, p. 207).

As dimensões da pá, foram definidas empiricamente por Hussian et al. (2009, p. 111), são escritas em função do diâmetro do jato e são mostradas na Tabela 1.

Figura 12 - Pá da turbina Pelton



Fonte: Hussian et al., 2009, p. 111.

Tabela 1 - Dimensões da pá.

DIMENSÕES	VALOR EMPIRICO
Comprimento	$L = 2 a 3 \cdot d$
Largura	$B = 3 a 5 \cdot d$
Profundidade	$p = 0,8 a 1,2 \cdot d$
Excesso	$e = 0,5 a 0,7 \cdot d$
Largura do rasgo	$B = 1,2 a 1,25 \cdot d$
Ângulo do gume central	$\beta_1 = 10^\circ$

Fonte: Hussian et al., 2009, p. 111.

Na Tabela 1 o excesso é a distância entre a circunferência preenchida pelo jato e o início do rasgo. O rasgo obtido dessa forma, impede que qualquer partícula tenha sua trajetória relativa fora da superfície côncava da pá.

Optou-se por utilizar a maior relação possível, devido à dificuldade de fabricar pás muito pequenas. Assim, as medidas foram calculadas como:

$$L = 41,4 \text{ mm} \quad (32)$$

$$B = 69,0 \text{ mm} \quad (33)$$

$$p = 16,6 \text{ mm} \quad (34)$$

$$e = 9,7 \text{ mm} \quad (35)$$

$$b = 17,3 \text{ mm} \quad (36)$$

O número de pás da turbina, é calculado pela equação (Hussian et al., 2009):

$$Z = \frac{D}{2 \cdot d} + 15 \quad (37)$$

$$Z = 22 \quad (38)$$

Ou seja, o rotor deve possuir 22 pás, para que o jato não perca o contato com as pás da roda Pelton, desperdiçando energia cinética.

### 3.4 Instalação na caixa d'água

Para a instalação da turbina Pelton, são necessárias algumas adaptações na estrutura original da caixa d'água.

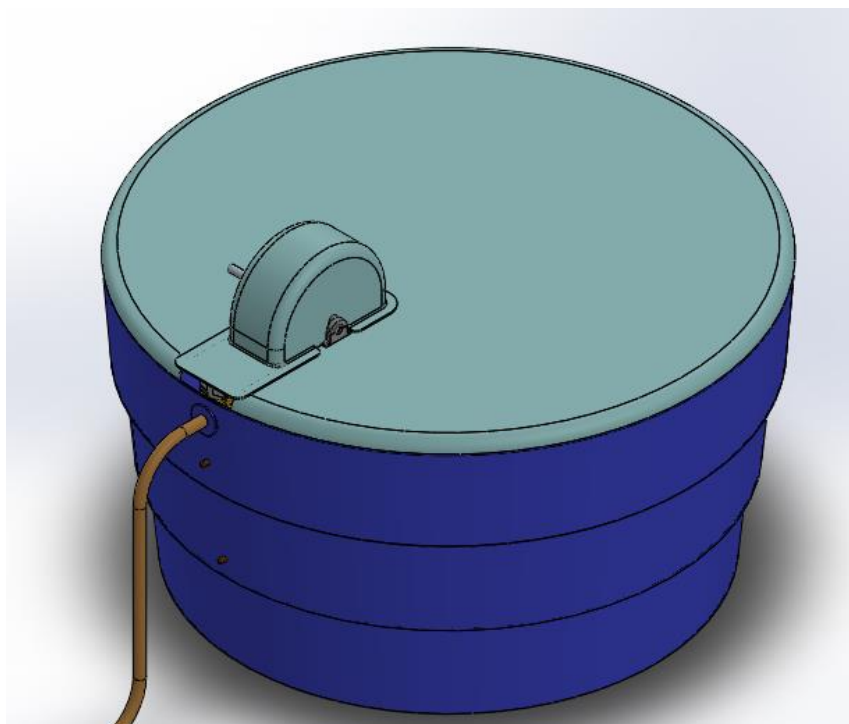
### 3.4.1 Estrutura

A estrutura de fixação da turbina Pelton e dos equipamentos elétricos (inversor e alternador) dependem de vários fatores. Disponibilidade de espaço, altura do telhado, tipo do piso (forro ou laje), geometria e tamanho do reservatório. Deve ser analisado a melhor forma de fixar o corpo do alternador em cada caso, visto que o eixo da turbina estará ligado diretamente ao eixo do equipamento.

A característica comum a todas as instalações, é a tampa da caixa d'água que será feita de fibra de vidro, acompanhando o formato da turbina Pelton. O casco formado pelo invólucro da roda, terá rasgos em suas laterais, por onde passará o eixo.

Os mancais serão fixados na parte superior da tampa da caixa pois o peso da a roda Pelton dimensionada é baixo e pode ser sustentado pela mesma. A partir da modelagem realizada no *software Solid Works* utilizando os valores obtidos na Seção 3.3, mediu-se o peso total da roda Pelton, que é de 816,76 gramas. O baixo peso é devido ao material utilizado na confecção das pás, o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) que é utilizado em impressoras 3d.

Figura 6 – Tampa caixa d'água e casco da turbina



Fonte: A autoria própria

### 3.4.2 Sensores de nível de água

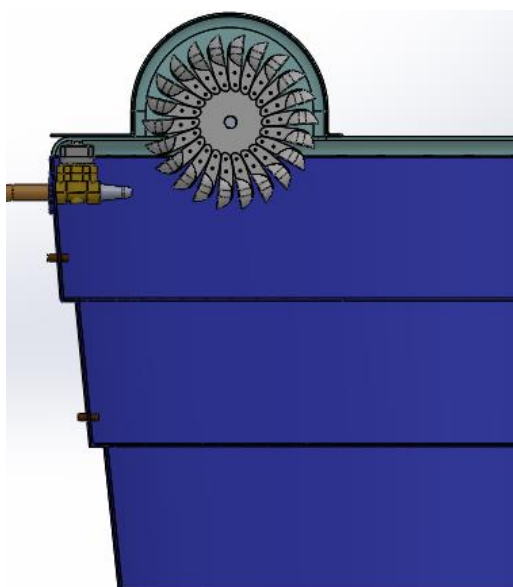
As caixas d'água convencionais instaladas em residências, têm nível de coluna de água controlado por uma boia. Esta boia flutua, e se mantém no nível da superfície da água. A boia é conectada por uma haste até uma válvula, instalada na entrada da caixa, que se abre conforme o nível do reservatório diminui.

Este tipo de mecanismo convencional é prejudicial para o funcionamento adequado da turbina por dois fatores: O fluxo de água começa a ser obstruído assim que a boia começa a subir, causando uma grande perda de carga e consequentemente uma perda de energia cinética durante todo o período de trabalho da turbina; outro fator prejudicial é a abertura gradativa da válvula, que ocasionaria em períodos muito curtos de funcionamento, com uma perda de carga muito alta.

Para evitar essas perdas, optou-se por controlar eletronicamente o nível da caixa d'água. Foi escolhida uma válvula com solenoide ao invés das boias convencionais, pois quando acionada permite a passagem do fluido sem grandes perdas de carga devido à obstrução do curso.

O acionamento do solenoide será causado por dois sensores instalados na caixa d'água, posicionados um no nível máximo determinado (S1), e o outro no nível mínimo (S2) para garantir o abastecimento do reservatório.

Figura 13 - Disposição dos sensores na caixa d'água.



Fonte: Autoria própria.

O sinal enviado para o solenoide, para o funcionamento correto do equipamento, deve obedecer a tabela verdade abaixo (Tabela 2):

Tabela 2 - Tabela verdade do acionamento do solenoide.

S1	S2	SOLENOIDE
0	0	1
0	1	1
1	0	0
1	1	0

Fonte: Autoria própria.

Onde 1 representa acionado ou em contato, e 0 desacionado ou sem contato com água.

Desta forma, o nível do reservatório não excederá o limite estabelecido impedindo o funcionamento correto da roda Pelton. Garantindo também que a caixa d'água não transborde e que não falte água para a residência.

Então o período de trabalho da turbina é equivalente ao tempo decorrido pela água até preencher o volume entre os dois sensores.

### 3.5 Conversão de energia

Para a conversão da energia cinética, gerada no eixo do rotor da turbina, em energia elétrica, utilizou-se de um alternador e um inversor de frequência. A escolha dos equipamentos foi feita pensando no objetivo do projeto de ter o menor custo possível na fabricação e instalação dos elementos.

#### 3.5.1 Alternador

O alternador é o dispositivo que será responsável pela transformação da energia cinética da turbina em energia elétrica. O funcionamento de alternador se dá por indução eletromagnética. O movimento rotativo de um ímã fixado na ponta do eixo,

cria um campo magnético que movimenta elétrons no estator, gerando uma corrente alternada devido aos polos.

O eixo da turbina será conectado ao eixo do alternador através de uma correia, que através de uma relação de polias, transmitirá para o alternador uma rotação próxima a sua rotação nominal.

A escolha do alternador se deu devido potência da turbina e a rotação. Buscou-se algo que se adequasse aos valores obtidos no dimensionamento da turbina, visando um baixo custo de aquisição.

Optou-se por um gerador de ímã permanente (Figura 14) com potência nominal de 100 *watts*, potência máxima de 150 *watts*, uma tensão nominal de 24 volts e eficiência de 90%. Esse gerador é utilizado em turbinas eólicas de baixa rotação, e também atende as necessidades da turbina estudada.

Figura 14 - Gerador de ímã permanente alternador AC modelo NE-100P.



Fonte: Aliexpress.

### 3.5.2 Inversor de frequência

Necessita-se do inversor de frequência para sincronizar o ciclo do gerador com o da rede pública, que opera na frequência de 60Hz. A escolha do inversor de frequência foi baseada na tensão e na potência de saída do gerador, buscando o equipamento de menor preço que atendesse às necessidades do projeto.

Segundo a ANEEL, para que a energia possa ser inserida na rede de distribuição, o inversor utilizado deve ser do tipo *on grid*. Para microgerações de

energia, a COPEL (Companhia Paranaense de Energia) divide-os em duas categorias: Abaixo de 10 kW, e acima de 10kW de potência nominal. Conversores que geram menos de 10 kW somente podem ser dos modelos cadastrados pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia). Um catálogo com todos os modelos que se adequam a rede de distribuição é disponibilizado junto com o *Formulário Microgeração Distribuída com Potência Igual ou Inferior a 10 kW*, fornecido no site da companhia. O inversor de menor potência nominal cadastrado no Inmetro é um microinversor da APsystems, modelo YC500i.

Figura 15 -. Microinversor YC500i



Fonte: APsystems

Segundo o *datasheet* do dispositivo, a tensão de entrada é de 22 a 45 volts, a potência recomendada é de 180 a 310 watts e eficiência de 95,5%. Observou-se que mesmo o menor inversor disponível, torna o conjunto superdimensionado.

### 3.6 Potência útil

Na Seção 3.3, calculou-se a potência máxima que pode ser extraída a partir da queda de água disponível. Como qualquer máquina, é impossível na prática extrair toda essa energia devido às perdas dos equipamentos. Portanto, para conhecer a quantidade de energia útil gerada pela turbina, calculamos a eficiência do sistema. A potência líquida ou motriz, que é a potência cedida à pá, é calculada segundo Macintyre (1983), pela equação:

$$P_L = \rho \cdot Q \cdot u \cdot (V_1 - u)(1 + k \cdot \cos(\varphi)) = 123,74 \text{ W} \quad (39)$$



Na qual  $k$  é o coeficiente de rugosidade da pá. A força que impulsiona a pá, pode ser escrita como a potência líquida sobre a velocidade da pá:

$$F = \frac{P_L}{u} \quad (40)$$

$$F = 10,6265 \text{ N} \quad (41)$$

A velocidade angular ( $\omega$ ) do eixo pode ser obtida por:

$$\omega = \frac{u}{R} \quad (42)$$

Onde  $R$  é o raio médio da roda Pelton. Portanto:

$$\omega = 120,5295 \text{ rad/s} \quad (43)$$

O torque aplicado ao eixo pela força da água sobre a pá, é calculado por:

$$T = \frac{F}{R} \quad (44)$$

$$T = 1,0267 \text{ N.m} \quad (45)$$

A partir do torque e da velocidade angular, podemos calcular a potência no eixo da turbina. Como o eixo da turbina é mancalizado, aplicou-se um coeficiente 0,98 para equiparar a possíveis perdas. A potência no eixo será:

$$P_E = T \cdot \omega \cdot 0,98 \quad (46)$$

Que pode ser calculada como:

$$P_E = 121,2735 \text{ W} \quad (47)$$

Calculamos as eficiências hidráulica e mecânica através da comparação das potências líquida e do eixo respectivamente.

$$\eta_h = \frac{P_L}{P} \quad (48)$$

$$\eta_m = \frac{P_E}{P} \quad (49)$$

Eficiência hidráulica:  $\eta_h = 0,98$

Eficiência mecânica:  $\eta_m = 0,9287$

A eficiência global, é o produto da eficiência mecânica pela eficiência hidráulica.

Eficiência global:  $\eta_t = \eta_h \cdot \eta_m = 0,9101$

A potência gerada pela turbina Pelton é então obtida pela equação:

$$P_t = P \cdot \eta_t \quad (50)$$

$$P_t = 121,2735 \text{ W} \quad (51)$$

Para determinar a potência útil produzida por todo o sistema, precisa-se considerar às perdas causadas pelos equipamentos elétricos utilizados na conversão da energia elétrica em mecânica. Como vimos na Seção 3.5 as eficiências do alternador e do inversor são respectivamente 90% e 95,5%. Portanto a potência útil do sistema é:

$$P_{\text{útil}} = P_t \cdot 0,9 \cdot 0,955 \quad (52)$$

$$P_{\text{útil}} = 104,2345 \text{ W} \quad (53)$$

## 4 VIABILIDADE ECONÔMICA

Para que o projeto seja viável se faz necessário que o mesmo não resulte em prejuízo, que o retorno esperado com o serviço do projeto seja adequado ao investimento no mesmo. A análise será feita abordando os custos e a quantidade de geração de energia do projeto para então estudar os resultados e concluir se o mesmo é viável ou não.

### 4.1 Custos

Os custos do projeto envolvem o valor de aquisição dos equipamentos e a instalação dos mesmos.

O rotor da turbina, as pás e o eixo serão fabricados em impressora 3D, que cobram por hora de impressão. Os mancais, rolamentos, o sensor, a válvula, o alternador e o inversor serão comprados. A Tabela 3 traz a relação de todos os preços dos equipamentos:

Tabela 3 - Tabela de preços.

ITEM	QUANT.	PREÇO (EM REAIS)
Pá da turbina – ABS	22	10,00
Rotor – ABS	1	50,00
Bico injetor - ABS	1	50,00
Mancal ferro fundido	2	20,00
Rolamento de esfera	2	15,00
Eixo aço 1045 retificado 16mm	1	25,00
Válvula 3/4" c/ solenoide	1	38,00
Microinversor YC500i	1	974,00
Alternador NE-100P	1	814,00
Sensores	2	10,00
Circuito elétrico	1	20,00
Fibra de vidro	1	20,00
Rebites al. Ciser 1/8"x1"	1	12,00
Parafusos	20	1,00
<b>TOTAL</b>		<b>2333,00</b>

Fonte: Autoria própria.

Portanto obtém-se um custo de material de R\$2333,00, considerando valores cotados em diversos sites de compras e fornecedores. Buscou-se os produtos mais baratos, visando materiais resistentes a oxidação da água e que não necessitam de manutenção constante. Também o equipamento foi projetado de forma que apenas entrarão em contato com a água materiais que não a contaminem. Alguns valores foram arredondados, por serem considerados pequenos (próximos de 1 real), pois os preços variam muito entre fornecedores e não causarão impacto na viabilidade.

Optou-se por não adicionar à soma, valores referentes a manutenção, instalação e lucro. Desta forma deseja-se calcular em quanto tempo a energia gerada pelo sistema, que é revertida em descontos na conta de energia residencial, retornará o valor investido na fabricação da turbina proposta.

## 4.2 Geração

Partiu-se do princípio de que se nas melhores condições de consumo a instalação da turbina for inviável, em condições piores será ainda menos viável.

Através da potência gerada pela turbina ( $P_{\text{útil}}$ ) e a quantidade de horas de funcionamento, pode-se estimar o valor em reais equivalente a energia gerada. O tempo de funcionamento da turbina foi definido como o tempo necessário para que toda a água consumida pela residência passe pela caixa d'água, e conseqüentemente pela turbina. Os valores máximos de consumo e vazão foram retirados da Figura 7, apresentada na Seção 3.1. Supondo uma situação ideal onde uma residência possua um consumo de 30 m<sup>3</sup> por mês e uma vazão de 1,5m<sup>3</sup>/h, tem-se aproximadamente 20 horas de funcionamento da turbina por mês. Ao multiplicar a potência gerada pela quantidade de horas de funcionamento temos o valor de quilowatt/hora gerado no mês, que neste caso é de 2,0846 kW/h.

Para saber o montante economizado ao injetar essa energia na rede é necessário multiplicar a quantidade de quilowatt/hora gerado ao mês pela tarifa cobrada pela concessionária. A Copel, concessionária da cidade de Cornélio Procópio, tem um valor vigente de tarifa para residenciais convencionais (Figura 16) de R\$/kWh 0,42147. Dessa forma, teoricamente tem-se R\$0,87 de economia ao mês, ou seja, R\$10,54 por ano.

Figura 16 - Tabela de tarifa convencional subgrupo B1

CONVENCIONAL	Resolução ANEEL N° 2.096, de 21 de junho de 2016	
Tarifa em R\$/kWh	Resolução ANEEL	com Impostos: ICMS e PIS/COFINS
<b>B1 - Residencial</b>	<b>0,42147</b>	<b>0,64543</b>
Vigência em 24/06/2016		

Fonte: ANEEL, 2016

### 4.3 Economia

Pode-se observar de forma simples e direta, que o valor economizado por mês devido à instalação da turbina Pelton é de uma grandeza muito menor que o custo de fabricação da turbina. Desconsiderando gastos com instalação e manutenção, taxaço de impostos, margem de lucro, inflação e juros, temos:

$$\frac{R\$2333,00}{R\$10,54/ano} = 221,27 \text{ anos} \quad (54)$$

Portanto, financeiramente, seriam necessários aproximadamente 221 anos para que o investimento inicial recuperado. Vale ressaltar que segundo os fabricantes, os componentes eletrônicos utilizados têm uma vida útil de aproximadamente 15 anos.

Para fazer uma análise refinada, poderia ser calculada a taxa de retorno interno (TIR), porém o custo do equipamento aumentaria em decorrência das variáveis que foram desconsideradas acima e o rendimento anual da turbina se manteria o mesmo. Desta forma, o *payback* ou tempo de retorno de investimento aumentaria exponencialmente.

## 5 CONCLUSÃO

A inclusão de fontes renováveis de energia na matriz energética mundial é cada vez mais discutida e se faz necessária, em decorrência das questões ambientais e a crescente demanda por energia. Com a inserção das energias renováveis também cresceu o conceito de geração de energia distribuída, que promove a geração descentralizada de energia evitando perdas de transmissão e o evita o altíssimo investimento em grandes centrais de geração de energia. A ideia do presente trabalho surgiu como uma sugestão de geração descentralizada de energia renovável, geração esta, feita no próprio local de consumo.

A partir da coleta de dados, obteve-se uma vazão máxima dos hidrômetros convencionais ( $4,1667 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ) e a pressão média (40,74 mca). A turbina Pelton demonstrou ser realmente uma turbina eficiente, já que os cálculos mostraram uma eficiência de 91,01%. A escolha dos equipamentos utilizados na instalação visou principalmente o baixo custo e melhor eficiência, mas de qualquer forma, alguns equipamentos utilizados possuíam necessidade de serem catalogados e seguirem determinadas especificações, o que fez com que se resultasse em um investimento inicial de R\$ 2333,00.

De modo geral o projeto se mostrou inviável em diversos aspectos. No aspecto financeiro, seria necessário um alto investimento devido ao elevado custo dos componentes. No aspecto energético, a geração de energia não foi satisfatória, a quantidade de *quilowatts* gerada foi extremamente baixa, mesmo a turbina Pelton sendo eficiente e ainda que considerado o valor máximo, a vazão dos hidrômetros convencionais é muito baixa, e por ser diretamente proporcional à potência disponível, resultou em uma baixa geração de energia e conseqüentemente um baixo retorno financeiro.

De qualquer forma o estudo da utilização do potencial da rede pública é promissor. Para trabalhos futuros, podemos sugerir a implementação de um projeto piloto, de modo a obter valores reais da geração de energia e também o estudo de viabilidade em locais onde o consumo de água é maior como instituições de ensino, edifícios e indústrias. Esses locais se enquadram em outra categoria devido ao maior consumo de água, possibilitando a instalação de hidrômetros vazões maiores, o que pode resultar em um sistema mais viável.

## REFERÊNCIAS

ADJUTO, Graça. **Em oito anos, mais de 1 milhão de brasileiros devem gerar sua própria energia**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2016-03/em-oito-anos-mais-de-1-milhao-de-brasileiros-devem-gerar-sua>>. Acesso em: 03 set. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª. ed. Brasília, 2008. 236p.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ª. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243p.

\_\_\_\_\_. **Micro e minigeração distribuída**: sistema de compensação de energia elétrica. Brasília: ANEEL, 2014. 28 p.

BORBELY, Ann-Marie; Kreider, Jan F.. ***Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium***. Estados Unidos: CRC Press, 2001.

BRASIL. DECRETO Nº 5.163, DE 30 DE JULHO DE 2004. **Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências**. Diário Oficial, Brasília, DF, 30 jul. 2004. Seção 1, p. 5. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM)>. Acesso em: 02 set. 2016.

\_\_\_\_\_. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015 – Ano base 2014**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

\_\_\_\_\_. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2016 – Ano base 2015**: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

BRASIL, Alex N.. Máquinas Termohidráulicas de Fluxo. Itaúna: UIT, 2013. Disponível em: <<http://alexbrasil.com.br/>>. Acesso em: 05 set. 2016.

EMPRESA de Pesquisa Energética. **Demanda de energia 2050**. Nota técnica DEA. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FARRET, Felix A.; SIMÕES, M. Godoy. ***Integration of alternative sources of energy***. New Jersey: IEEE, 2006.

FERRAZ, Fábio. **Manual de hidráulica básica**. Santo Amaro: IFBA, 2011.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, USP, n.72, Dez./Fev., 2006-2007.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2. ed. Santa Maria: Ufsm, 2006.

HUSSIAN, Zoeb; ABDULLAH, Mohammad; ALIMUDDIN, Zainal. **Basic Fluid Mechanics and Hydraulic Machines**. Hyderabad: Bsp, 2008.

INGRAM, Grant. **Basic Concepts in Turbomachinery**. Ventus Publishing ApS, 2009.

MATAIX, Claudio. **Turbomáquinas hidráulicas**. Madrid: ICAI, 1975.

\_\_\_\_\_. **Turbomáquinas térmicas**. 2. ed. Madrid: Editorial Dossat Sa, 1988.

Ministério de Minas e Energia (Org.). **Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar**. 2015. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030)>. Acesso em: 01 set. 2016.

NOGUEIRA, Fábio J. H.; FILHO, Geraldo L. T.. **Microcentrais hidrelétricas**. CERPECH. Itajubá -MG, 2007.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **TABELA PARA SELEÇÃO DE BOMBAS E MOTOBOMBAS**. Joinvile, SC, 2011.

SILVEIRA, Stevan Ruschel da. **Geração descentralizada de energia através de fonte alternativa**. 2011. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/33088>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

TECNALIA, Labein. **Guía Básica de la Generación Distribuida**. Madrid: Fenecorn, 2007. 64 p.