WILLIAM TORRES

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA MICROTURBINA INSTALADA EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA EM SISTEMAS AGROINDUSTRIAIS

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2020

WILLIAM TORRES

AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA MICROTURBINA INSTALADA EM TUBULAÇÕES DE ÁGUA EM SISTEMAS AGROINDUSTRIAIS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.
ORIENTADOR: Dr. Elisandro Pires Frigo.
COORIENTADOR: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

CASCAVEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO -- 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Torres, William
Avaliação da Geração de Energia Elétrica de uma Microturbina Instalada em Tubulações de Água em Sistemas Agroindustriais / William Torres; orientador(a), Dr Elisandro Pires Frigo; coorientador(a), Dr Jair Antonio Cruz Siqueira, 2020.
55 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2020.

1. Energia renovável . 2. Energia hidráulica . 3. Microturbina . I. Pires Frigo, Dr Elisandro . II. Antonio Cruz Siqueira, Dr Jair. III. Título.

WILLIAM TORRES

Avaliação da Geração de Energia Elétrica de uma Microturbina Instalada em Tubulações de Água em Sistemas Agroindustriais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Elisandro Pires Frigo
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

José Airton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus de Medianeira (UTFPR)

Cascavel, 27 de fevereiro de 2020

“Dedico este trabalho a todos que acreditam que a educação é o melhor meio de melhorar as condições de desigualdade e justiça em nosso país.”

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Dr. Elisandro Pires Frigo, meu coorientador Professor Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira, por todas as contribuições propostas e correções necessárias.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA) pelo conhecimento compartilhado e prestatividade nas mais diversas horas.

Aos meus colegas de aula do PPGEA, pela amizade e parceria em todas atividades que requereram esforços coletivos. Em especial aos meus colegas Gabriel Franzon e Ernesto Bradacz, pela companhia durante as viagens e ajuda nos momentos difíceis.

À assistente do Programa, Vanderléia L. S. Schimidt, por toda ajuda e gentileza a efetivar minhas solicitações.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, pela formação e incentivo a pesquisa cientifica.

À Centro Universitário UDC, campus de Foz do Iguaçu, pela disponibilidade de infraestrutura, equipamentos e laboratórios utilizados neste trabalho científico.

Ao coordenador adjunto do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário UDC, Adriano Risson, pela colaboração e compreensão em todos os momentos que me ausentei das atividades dentro do curso.

Aos meus familiares, pela minha ausência em encontros ou bate-papos.

À minha namorada, Ana Cláudia Rison, pelo carinho e compreensão.

Em especial à minha mãe, que me ensinou a ter fé e perseverança em todas as lutas desta vida.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Unidade de corrente (Ampére)
BEN	Balanço Energético Nacional
CERPCH	Centro de Referência de Pequenas Centrais Hidrelétricas
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração distribuída
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
l/s	Litros por segundo
LT	Linha de Transmissão
MCH	Microcentral Hidrelétrica
MME	Ministério de Minas e Energia
P	Potência
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
Q	Vazão
V	Unidade de tensão (Volts)
W	Watt

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das fontes de energia 5
Quadro 2 - Legenda dos tipos de empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil. 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das hidrelétricas quanto à geração de energia. 14
Tabela 2 - Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto. 14
Tabela 3 - Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação no Brasil. 15
Tabela 4 - Especificações técnicas: microturbina + gerador. 18
Tabela 5 - Especificações técnicas: manômetro digital. 20
Tabela 6 - Especificações técnicas: manômetro analógico. 21
Tabela 7 - Especificações técnicas: válvula redutora de pressão. 21
Tabela 8 - Especificações técnicas: Fluxômetro. 22
Tabela 9 - Especificações técnicas: Arduino UNO. 23
Tabela 10 - Especificações técnicas: sensor INA 219. 24
Tabela 11 - Especificações técnicas: Módulo cartão SD. 25
Tabela 12 - Estatística descritiva dos dados de geração de energia em cada faixa de pressão. 31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de oferta interna de energia de acordo com a fonte. 6
Figura 2 - Esquema de uma usina hidrelétrica. 9
Figura 3 - Turbina Pelton. 10
Figura 4 - Turbina Kaplan. 11
Figura 5 - Turbina Michel Banki. 12
Figura 6 - Microturbina Michell Banki F50. 17
Figura 7 - Componentes da microturbina. 18
Figura 8 - Microturbina hidrelétrica com seção interna de 2mm. 19
Figura 9 - Manômetro digital. 19
Figura 10 - Manômetro analógico e válvula redutora pressão. 20
Figura 11 - Fluxômetro. 21
Figura 12 - Bancada de condutos forçados. 22
Figura 13 - Plataforma Arduino. 23
Figura 14 - Sensor INA 219. 24
Figura 15 - Modulo cartão SD. 25
Figura 16 - Fluxograma do sistema. 27
Figura 17 - Sistema Arduino conectado. 27
Figura 18 – Faixa de pressão e suas respectivas perdas de pressão aferidas. 32
Figura 19 - Relação entre a energia e a pressão. 34
Figura 20 - Relação entre a energia produzida e as faixas de vazão. 35
Figura 21 - Relação entre eficiência e a pressão. 37

TORRES, William. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro, 2020. **Avaliação da Geração de Energia Elétrica de uma Microturbina Instalada em Tubulações de Água em Sistemas Agroindustriais.** Orientador Dr Elisandro Pires Frigo.

RESUMO

O conceito de sustentabilidade atual vem se difundindo em nossa sociedade. Dentro desse contexto, e analisando a baixa diversificação da matriz energética brasileira, a possibilidade de se analisar a microgeração de energia é bastante estimulante, tendo em vista as necessidades constantes de consumo de energia em regiões rurais ou de pouco acesso às redes públicas de fornecimento. O objetivo deste trabalhado foi avaliar o desempenho e eficiência da geração de energia elétrica com a utilização da microturbina em tubulações de sistemas agroindustriais que possuam fluxo de água canalizados. O sistema instalado apresentou em sua composição uma microturbina, do tipo *Michell-Banki*. Em suas especificações técnicas, tem-se 12V como máxima tensão produzida, sendo esse valor variável e diretamente proporcional à vazão e pressão a qual está submetida. Para coleta e tratamento dos dados obtidos, elétricos e hidráulicos, foi utilizado fluxômetro para aferição de vazão, manômetros de precisão para controle e aferição das variações de pressões utilizadas nos ensaios, sensores de tensão e corrente. Foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO para o monitoramento e coleta dos dados de produção de energia da microturbina hidrelétrica. Na realização dos ensaios, obteve-se percentuais de redução de pressão de 62% a 89% no trecho de instalação da microturbina. Os resultados de geração de energia elétrica obtiveram 1,6W de potência como maior ganho dentro das faixas de pressão e a eficiência da microturbina foi de 12,66% fixada na faixa de pressão 3,5mca e com vazão de 0,833E-04 m^3/s.

PALAVRAS-CHAVE: energia renovável; energia hidráulica; turbina.

TORRES, William. State University of Western Paraná, February, 2020. **Evaluation of Microturbine Power Generation in Agroindustrial Water Pipes.** Professor Advisor: Dr Elisandro Pires Frigo.

ABSTRACT

Currently sustainability concept has been spreading in our society. In view of this, and the low Brazilian energy matrix diversification, energy microgeneration is encouraging since rural areas need constant power supply and have little access to public grid feeding points. This study aimed to evaluate the performance and efficiency of electric power generation using a microturbine in agro-industrial system pipes with channeled water flow. The system was composed of a *Michell-Banki* microturbine. According to its technical specifications, the maximum voltage produced is 12 V, which varies and is directly proportional to the flow and pressure to which it is subjected. Electric and hydraulic data were collected using a flow meter to measure flow, a precision pressure gauge to control and measure the tested pressure changes, and voltage-current sensors. An Arduino UNO microcontroller was used for monitoring and collection of microturbine power production data. In the tests, pressure reduction was between 62 and 89%, within the section of the microturbine installation. The generated electricity had a power of 1.6 W, as the largest gain for the tested pressure ranges. Moreover, microturbine efficiency was 12.66% when fixed at a pressure of 3.5 mca and a flow rate of 0.833E-04 m^3/s.

KEYWORDS: renewable energy; hydraulic power; turbine.

ÍNDICE

1.1 OBJETIVOS 2
1.1.1 Objetivo geral 2
1.1.2 Objetivos específicos 2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE NO BRASIL 3
2.1.1 Atual matriz energética brasileira 4
2.1.2 Eficiência energética na geração de energia elétrica 7
2.2 ENERGIA HIDRELÉTRICA 8
2.2.1 Componentes de uma central hidrelétrica 8
2.2.1.1 Turbinas hidráulicas 9
2.2.1.1.1 Turbina Pelton 9
2.2.1.1.2 Turbina Kaplan 10
2.2.1.1.3 Michell-Banki 11
2.2.1.2 Gerador elétrico 12
2.2.2 Classificação das centrais hidrelétricas quanto a geração de energia 14
2.2.3 Capacidade de geração de eletricidade no Brasil 15
2.3 MICROCENTRAL HIDRELÉTRICAS – MCH 15
3. MATERIAL E MÉTODOS 17
3.1 MATERIAL 17
3.1.1 Caracterização do local do experimento 17
3.1.2 Microturbina Michell-Banki F50 17
3.1.2. Manômetro Digital 19
3.1.3. Manômetro analógico e válvula Redutora de pressão 20
3.1.4. Fluxômetro 21
3.1.5 Bancada de condutos forçados 22
3.1.6 Gerenciamento de corrente e tensão 23
3.1.6.1 Arduino UNO 23
3.1.6.2 Sensor INA 219 24
3.1.6.3 Módulo cartão SD 25
3.2 MÉTODO 26
3.2.1 Escolha do trecho e instalação a MCH 26

3.2.2 Montagem e programação do microcontrolador arduino 26
3.2.3 Análise do efeito de perda de pressão em função da microturbina na rede hidráulica 27
3.2.5 Determinação de eficiência do sistema de geração da MCH 30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA 31
4.2 AVALIAÇÃO DA PERDA DE PRESSÃO NA TUBULAÇÃO EM FUNÇÃO DA MICROTURBINA 32
4.3 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO 34
4.4 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE VAZÃO 35
4.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MICROTURBINA 36
5. CONCLUSÃO 38
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 39

1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos processos de transformação tecnológica, transcorreu a necessidade de ampliar a produção, a quantidade e os métodos do fornecimento de energia. Para abranger os princípios da produção energética, a sustentabilidade direcionou a exploração de diferentes áreas para a geração de energia à partir de fontes renováveis (SÁ, 2010).

A energia elétrica é de tamanha importância no contexto da sustentabilidade que afeta até o desenvolvimento da cidadania de um ser limitado ao seu contato (SÁ, 2010). Um cidadão desprovido de ideais sustentáveis se torna um agente de desaceleração das inovações tecnológicas em tempos de crise energética de nível mundial (REIS, 2006; ALVES, 2007).

Com tais parâmetros, o usufruto da água permite através de seu percurso, desenvolver energia cinética com a força de tal movimento; bem como o estabelecimento de energia potencial, quando armazenada, relacionada à gravidade (KOCK, 2014).

Em uma estação hidroelétrica, a água represada na barragem é assimilada à energia potencial, devido à elevação a qual está submetida; a delimitação do caminho é feita a partir de dutos que direcionam a correnteza a passar pelas turbinas que possuem geradores acoplados (STEPANOFF, 1967).

Em áreas agrícolas, as dificuldades se iniciam pela distância entre o ponto de consumo e o ponto de geração de energia. Para atender a estas frágeis solicitações, uma alternativa é promover a produção, em pequena escala, anexada ao ponto de consumo. Tendo em vista que a demanda por produção de energia cresce acima do PIB, e a geração através de recursos hídricos em grande escala é finita, a microgeração de energia demonstra uma possibilidade de cumprir tais parâmetros atuais e promover benefícios econômicos (IORRA, 2013).

Estudos e propostas nacionais trouxeram métodos de produção de energia também em menor escala. Com aplicações mais simples, chegando à produção de energia para consumo próprio, a partir da entrada de água do reservatório de uma residência é possível implementar miniestações de geração de energia através de turbinas, utilizando da pressão e vazão já existente na rede. Porém, com muitas

instalações desse tipo, o sistema público ou local de abastecimento sofreria uma sobrecarga (GUITARRARA, 2012).

A instalação de turbinas antes do reservatório de cada edificação pode ser prejudicial, por consistir uma espécie de barreira no caminho do fluxo através da tubulação, e, contudo, resultar em uma perda de carga (LIMA, 2013). Ainda cita o autor que a solução posteriormente é prosseguir com a não interferência no bom funcionamento dos recursos já existentes.

Visando o aproveitamento do fluxo já decorrente no processo de distribuição de água, a cidade de Portland (Oregon, EUA) utilizou a tecnologia de turbinas associadas à grande vazão para gerar energia através da passagem de água pelas tubulações, distribuídas em locais estratégicos em trechos adutores de abastecimento público (NEWTON, 2012). A atribuição de turbinas revela um importante potencial quanto à produção de energia, quando aplicada a trechos pré-existentes (ELETROBRÁS, 1985).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o funcionamento e eficiência da geração de energia elétrica com a utilização da microturbina em tubulações de sistemas agroindustriais que possuam fluxo de água canalizados.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência em relação à perda de pressão gerada pela utilização da microturbina para o trecho de tubulação instalada;
- Avaliar a geração de energia elétrica da microturbina instalada em uma tubulação de água;
- Determinar a eficiência do sistema de geração da microturbina em função da energia hidráulica proporcionada pela rede e energia elétrica gerada pela microturbina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE NO BRASIL

Depois da primeira metade do século XX, os setores de produção de bens de consumo obtiveram grande expansão, e a economia mundial reaquecia seu mercado no período pós-guerra. Os meios de transporte, mobilidade e o setores de serviços refletiram as transformações e se adaptaram aos tempos modernos (DA SILVA, 2012).

Segundo Sá (2010), por meio do desenvolvimento sustentável, é possível manter a comodidade adquirida e amenizar os danos aos recursos naturais, valendo-se de ações de eficiência energética e potencializando o processo. Para abranger os princípios da produção energética, a sustentabilidade direcionou a exploração de diferentes áreas para a geração de energia a partir de fontes renováveis.

Baseando em aspectos primordiais como a economia, a sociedade e o meio ambiente, a sustentabilidade firmou-se em uma realidade buscada por muitos, inclusive no âmbito político. Debates envolvendo esse contexto tem reunido países de todos os continentes para discutir sobre os impasses das demandas energéticas de produção e consumo e degradação ambiental (MONTALVÃO e FARIA, 2012).

A disponibilidade hídrica permite inúmeras alternativas para gerar eletricidade a partir de mecanismos que se movimentam com o fluxo da água em seu contato. No Brasil, cerca de 70% da energia gerada provém de 1.050 empreendimentos hidrelétricos atendendo a consumidores no território nacional e de países vizinhos (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2008).

A caracterização da energia hidrelétrica constitui na forma sustentável de produção de energia unicamente pela transformação da energia armazenada na água. Este formato gerador ganhou o prestígio devido a baixas emissões de gases de efeito estufa, longa vida, baixo custo de operação e manutenção e muitos outros benefícios. É válido considerar que a condição da sustentabilidade pode diferir de acordo com o país, suas pessoas e outros vários fatores que prevalecem nessa área específica e tempo (ADHIKARI, 2011).

Ainda, segundo o autor, os regulamentos das regras, a intenção dos proponentes, as responsabilidades sócio corporativas e o aspecto econômico definem

e ajustam o valor da sustentabilidade. A localização, bem como as aplicações de propostas sustentáveis, precisam ser avaliadas quanto ao foco do método de geração de energia a ser desenvolvido, não restringindo os serviços a determinada classe social, sendo que as metodologias sustentáveis devem atender a todos (IAC, 2007).

A energia elétrica é de tamanha importância no contexto da sustentabilidade que afeta até o desenvolvimento da cidadania de um ser limitado ao seu contato (SÁ, C. M., 2010).

Para Tolmasquim (2016), o sucesso da inserção de outras vertentes geradoras de energia tem servido de paradigma para as opções triviais, contribuindo para a continuidade das fontes renováveis como alternativas predominantes na matriz elétrica brasileira pelos anos posteriores.

O aumento da penetração de fontes de energia renováveis intermitentes no sistema elétrico em massa causou novos desafios operacionais. A literatura contemporânea e os recentes estudos de energia renovável indicam que é necessário incorporar mais realismo a estas propostas, com aplicações mais próximas das realidades estudadas (DOZIER, 2012).

O desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis implica na necessidade de procura por novos meios de obtenção e produção de energia (REIS e CUNHA, 2006).

2.1.1 Atual matriz energética brasileira

Há duas classificações quanto à forma empregada para a geração de energia elétrica: fontes renováveis e fontes não renováveis. Estas duas distintas vertentes correspondem ao nível de impacto ao meio ambiente, que é resultado do uso de matérias primas para a geração de energia. Como fontes renováveis, a matéria prima é considerada “inesgotável”, ou que, a partir desta, danos não seriam causados à flora, fauna e seres humanos; como a geração de energia através do vento (eólica) ou sol (solar). As fontes não renováveis são as que determinam, em seu modo de gerar energia, algum dano aos seres vivos, ou se faz parte de uma fonte passível de extinção, como o petróleo; ou se oferecem danos ao meio e seres vivos, como a

energia nuclear (SCHNEIDER, 2013).

Fontes Não Renováveis	Fontes Renováveis
Nuclear	Solar
Biomassa: petróleo, gás natural, carvão mineral, xisto, turfa.	Geotérmica
	Oceânica
	Eólica
	Hidráulica
	Biomassa: resíduos rurais (restos de vegetais, dejetos) e urbanos (lixo, esgoto), cana de açúcar, madeira, biogás, carvão vegetal.

Quadro 1 - Classificação das fontes de energia

A matriz energética do Brasil é predominantemente renovável, correspondendo às seguintes fontes de geração de energia elétrica: hidráulica, eólica e solar. A composição de uma matriz energética hidrotérmica se justifica através da potencialidade hidráulica natural, e características geográficas do território brasileiro.

Sales (2007) comenta que as outras fontes de energia, são compostas por geração termelétrica. E tem como função a complementação do sistema hidrotérmico através de outros dois sistemas: o “interligado”, que dá atendimento durantes os períodos hidrológicamente desfavoráveis; e o sistema “isolado”, para atendimento de regiões onde ainda não há energia elétrica ou quando ocorrem restrições de transmissão.

Conforme os dados do últimos Balanço Energético Nacional de 2017 (BEN), é possível notar que aproximadamente 70% da energia produzida no Brasil é de origem hidráulica, mostrado na Figura 1.

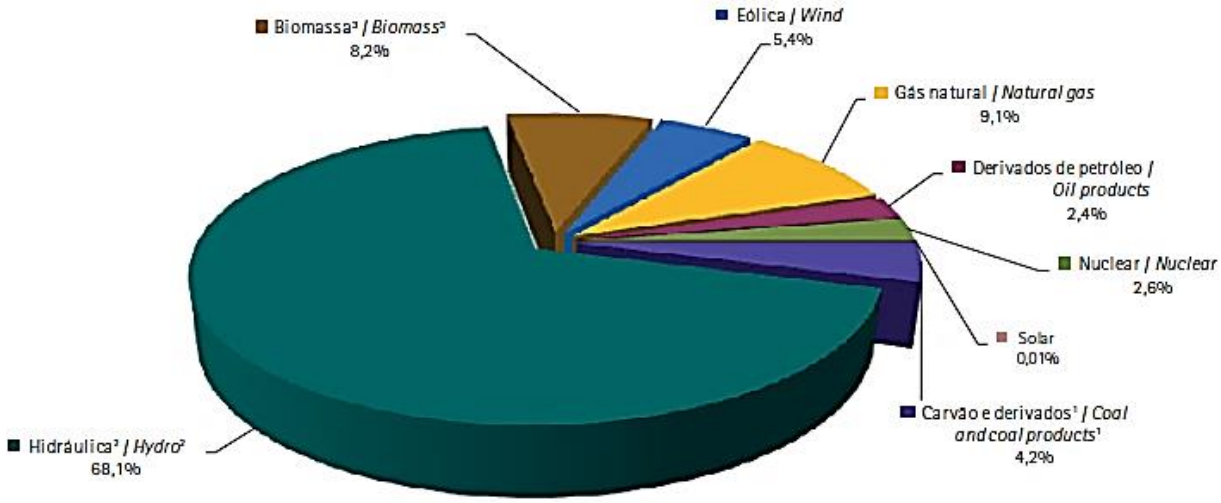

Figura 1 - Gráfico de oferta interna de energia de acordo com a fonte.

A geração de energia hidrelétrica se tornou predominante no fim do século XIX e persiste até hoje como a maior fonte de energia elétrica. Essa predominância hidroelétrica faz com que o sistema brasileiro possua algumas peculiaridades, como por exemplo, as distâncias entre os centros consumidores e as unidades geradoras de energia, comumente grandes, traduzindo-se em sistemas de transmissão abrangentes. Outra característica do sistema é a necessidade de controle da operação energética das usinas, ou operação de médio/longo prazo, pois o volume de água disponível em uma central hidrelétrica depende de como as outras usinas são operadas. Esta interdependência não existe nos outros sistemas, como por exemplo, nos termoelétricos (SILVA FILHO, 2003).

Para Goldemberg (2015), esse número vem diminuindo desde 2011, e o principal motivo para o declínio é o esgotamento dos reservatórios utilizados pelas hidrelétricas de grande porte, concentrados em maior parte no sudeste do país, devido ao relevo acidentado da região.

Devido à necessidade de reestruturação do setor elétrico brasileiro, tem-se estimulado a geração descentralizada de energia elétrica, tendendo para que as fontes não-convencionais, principalmente as renováveis, ocupem um maior espaço na matriz energética nacional. Nesse contexto, as pequenas e micros centrais hidrelétricas terão papel extremamente importante (ANEEL, 2008).

Cita, ainda, a ANEEL que é evidente que haja uma reestruturação do setor de geração de energia elétrica nacional. Com isso, novos modos de geração não-

centralizada são de notável relevância. Observa-se que fontes não-convencionais, sobretudo, renováveis, ganhem um espaço em destaque na matriz energética brasileira; incluindo a inserção das pequenas e micros centrais hidrelétricas.

2.1.2 Eficiência energética na geração de energia elétrica

Segundo Castro (2015), o crescimento das necessidades energéticas, aumenta exponencialmente a preocupação do uso responsável e sustentável da energia elétrica, fomentando diversos debates e acordos a níveis nacionais e internacionais. O início das discussões mundiais acerca da eficiência energética ocorreu a partir da década de 1970, durante a crise petroleira, contexto no qual fora percebido que um recurso como o petróleo, além de esgotável, arrecadaria crescentes custos econômicos e ambientais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

O conceito da expressão “eficiência energética” se traduz na relação entre a quantidade de energia final utilizada pela energia de um bem produzido ou serviço realizado. Não considerando uma quantidade mínima apenas para realizar um serviço, o conceito abrange que seja considerada a energia real empregada naquele feito (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010).

Desde então, reconheceu-se que era possível obter o mesmo serviço e realizar as mesmas atividades com um gasto muito menor de energia e, consequentemente, com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais. Tanto o equipamento quanto hábitos de consumo começaram a ser analisados, levando em consideração a conservação de energia. Demostrando que muitas iniciativas que resultam em maior eficiência energética são economicamente viáveis, em outras palavras, o custo de implantar medidas de conservação de energia é menor do que o custo de produzir ou adquirir a energia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Através de diversas pesquisas e debates sobre conservação energética, sabe-se que um gerenciamento energético de qualquer instalação ou equipamento requer a adoção de estratégias adequadas, as quais devem levar em consideração a estrutura dos sistemas energéticos já existentes, os hábitos de uso da edificação e

dos sistemas e a opinião dos usuários e técnicos da edificação sobre a qualidade dos sistemas instalados (OLIVEIRA; ALBERTIN, 2007).

2.2 ENERGIA HIDRELÉTRICA

A energia hidráulica, ou hidrelétrica, é gerada aproveitando um desnível existente, ou adaptado, em um trecho por onde há movimentação da água, sendo possível utilizar um trecho de curso natural da água, ou com a construção de barragens, alterando o resultante do potencial de geração daquela instalação. Através da barragem é possível captar a água e conduzi-la até as turbinas; entrando em contato com as pás das turbinas, produzirá, com o movimento, a energia mecânica. Com o eixo da turbina acoplado a um gerador elétrico, a energia será convertida: de energia mecânica à energia elétrica. A capacidade deste modo de geração é dependente das características do terreno de implantação, topográficas e fluviais, interferindo na quantidade de produção final (SCHNEIDER, 2013).

De acordo com Morais (2015), de modo geral, a energia hidrelétrica é toda aquela originada a partir de um fluxo de água corrente, que é destinado a uma turbina através de um conduto forçado; ao movimentar as turbinas, geradores elétricos instantaneamente transformam a energia deste movimento (cinética) em elétrica.

2.2.1 Componentes de uma central hidrelétrica

Os principais componentes de uma central hidrelétrica são: a barragem, o canal, o duto, a turbina, o gerador, a casa de força e as linhas de transmissão, como demonstra a Figura 2; com a possível variação na quantidade de estruturas (GALLINARO, B., 2011).

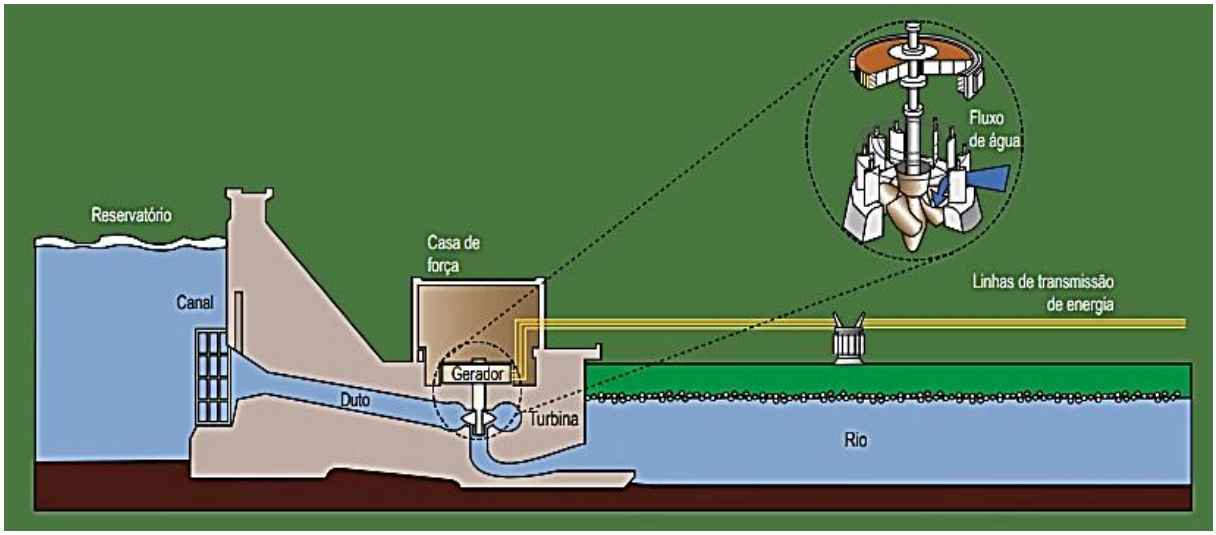

Figura 2 - Esquema de uma usina hidrelétrica.

2.2.1.1 Turbinas hidráulicas

De acordo com Sosnoski (2015), as turbinas hidráulicas são as peças principais do sistema de geração de energia hidrelétrica, são máquinas motrizes com função de transformar a energia hidráulica em energia mecânica; em outras palavras, é o torque com o qual o eixo da máquina gira. As turbinas podem ser classificadas em duas categorias: turbinas hidráulicas de ação, quando o escoamento através do rotor ocorre sob pressão atmosférica; turbinas hidráulicas de reação, quando o escoamento através do rotor ocorre com variação de pressão.

Cada tipo de turbina é apropriado para uma determinada altura de queda e vazão volumétrica. Dos diversos tipos de turbinas hidráulicas existentes, algumas já são ultrapassadas como: *Jonval, Fontaine, Schwamkrug* e *Zuppinger*. E há outras que estão em operação como: *Hélice, Bulbo, Michell–Banki, Kaplan, Francis* e *Pelton*. (SOARES JUNIOR, 2013).

2.2.1.1.1 Turbina Pelton

Segundo Santos (2013), a turbina *Pelton* foi criada em 1878 pelo americano *Allan Lester Pelton*. Como todas as turbinas, a *Pelton* é constituída por um distribuidor

e um rotor. O distribuidor possui um formato de bocal injetor que guia o fluxo de água proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá do rotor. O rotor é formado por um número de pás as quais possuem um formato de concha e são presas na periferia de um disco que gira em torno de um eixo, como pode ser visto na Figura 3.

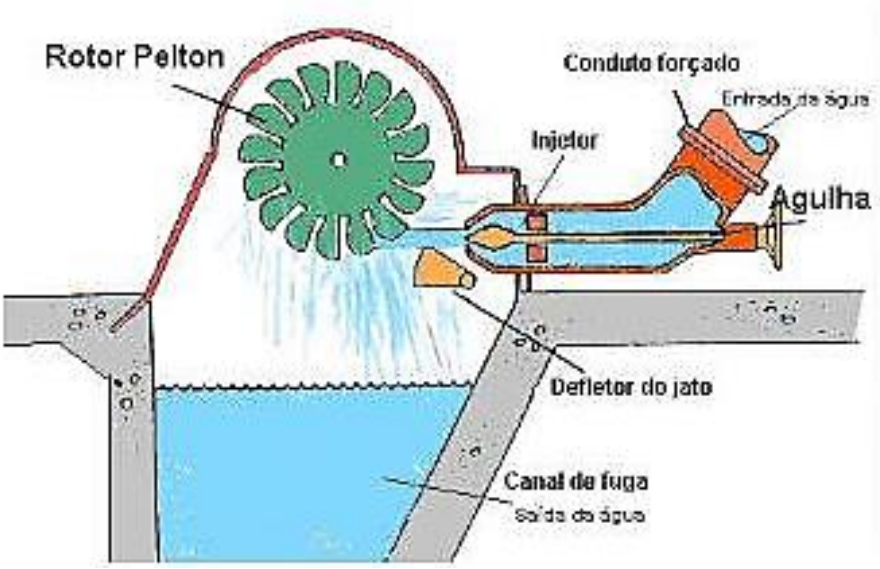

Figura 3 - Turbina Pelton.

Sua principal característica é a velocidade do jato na saída do bocal, que pode chegar, dependendo da queda, entre 150 a 180 m/s (SCHNEIDER, 2013). Este tipo de turbina apresenta uma fácil fabricação e são empregadas tanto em usinas de grande potência quanto para quedas e vazões bem pequenas, gerando apenas algumas dezenas de CV. Tem uma instalação e regulagem relativamente simples, e podem ser de eixo vertical ou horizontal e podem ter até 6 jatos d'água (SOARES JUNIOR, 2013).

2.2.1.1.2 Turbina Kaplan

Victor Kaplan, reconhecido engenheiro austríaco, fez diversas investigações no campo da hidráulica, e tinha como objetivo de desenvolver um modelo de turbina que funcionasse a grandes velocidades especificas, em pequenas quedas de água e com grandes caudais, pois as existentes falhavam nesses aspectos. Em 1912, é

desenvolvido um modelo conhecido hoje por turbinas de Hélice e *Kaplan* (SANTOS, 2013).

Esse modelo é formado por um mecanismo que permite regular o ângulo de inclinação da pá conforme a descarga, sem que ocorra uma variação considerável do rendimento; ele fica alojado numa peça com o formato de uma ogiva e é comandado por um regulador automático de velocidade. Na Figura 4, é possível observar que os principais componentes de uma turbina *Kaplan* são: o distribuidor, suas pás (chamadas de diretrizes), rotor, eixo e caixa espiral (SOARES JUNIOR, 2013).

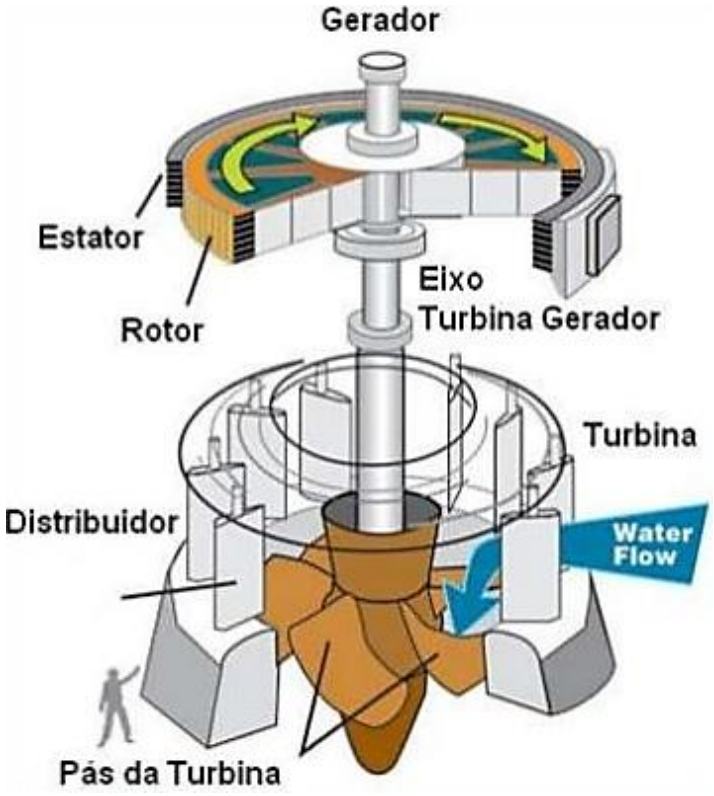

Figura 4 - Turbina Kaplan.

2.2.1.1.3 Michell-Banki

A turbina de *Michell-Banki*, também conhecida como de fluxo cruzado, pode operar como turbina de ação ou de reação. Muito difundidas em outros países, porém, não é adotada para uso no Brasil. Esta turbina é dotada de uma pá diretriz e um rotor em forma de cilindro formado por pás curvas fixadas em dois discos laterais acoplados

a um eixo passante, apoiado em mancais instalados na carcaça, como demonstra a Figura 05. Essa turbina é utilizada para micro aproveitamentos hídricos em quedas de 1,5 a 80m e potências de até 2000kW.

Uma das características principais desse modelo é a simplicidade de projeto e o pequeno número de componentes, gerando um custo de manutenção reduzido. Outra facilidade do sistema é o tamanho e peso de cada componente que, individualmente, facilitam o transporte e manuseio assim como a montagem na obra, evitando o uso de equipamentos de elevação de grande porte, principalmente em lugares de difícil acesso (MELLO JUNIOR, 2000).

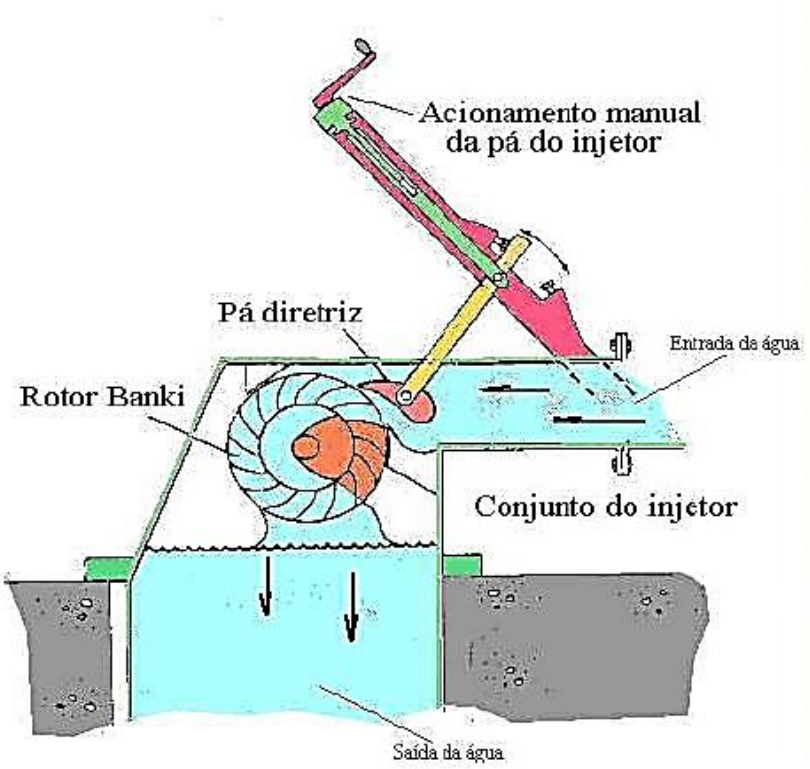

Figura 5 - Turbina Michel Banki.

2.2.1.2 Gerador elétrico

O gerador é a parte do sistema responsável por transformar a energia mecânica, proveniente das turbinas, em elétrica, que é a energia comercializada. Outro componente do grupo gerador, é o sistema de acoplamento que transmite o torque entre o rotor da turbina e o rotor do gerador elétrico e, em alguns casos, ajusta

a velocidade de rotação dos dois equipamentos, através de engrenagens, correias ou polias. O volante de inércia proporciona o aumento da energia cinética do sistema, aumentando a estabilidade durante os transitórios. Já o sistema de controle tem como função evitar a variação da velocidade de rotação do sistema (SCHNEIDER, 2013).

Os autores BASTOS *et al*. (2014) explicam que o gerador é basicamente formado por um eixo, um excitador, um rotor e um estator. O gerador está mecanicamente acoplado à turbina a qual transforma a energia cinética da água em energia mecânica e o excitador envia a corrente elétrica para o rotor, que é uma série de grandes eletroímãs, os quais rodam dentro de uma espiral de fios de cobre, chamado estator. O campo magnético entre a espiral e os ímãs criam uma corrente elétrica.

A casa de máquina é, simplesmente, uma construção que abriga os grupos geradores (turbina e gerador elétrico) e os equipamentos de controle. Ainda, se necessário, pode abrigar também os equipamentos elétricos de transmissão de energia (VERGÍLIO, 2012).

Alves (2007) alerta que deve ser feito um estudo a respeito da posição da casa de máquinas, levando em consideração que a mesma deve ser locada na parte do terreno onde será possível otimizar a queda útil da usina.

Linha de transmissão LT’s é o elemento do circuito responsável por conduzir energia elétrica de um ponto ao outro. Através das LT’s se torna possível transportar a energia elétrica dos centros produtores aos centros consumidores, proporcionando à sociedade um benefício reconhecido por todos.

Os tipos de linhas de transmissão mais comuns são:

- Linha aérea em corrente alternada ou em corrente contínua com condutores separados por um dielétrico;
- Linha subterrânea com cabo coaxial com um fio central condutor, isolado de um condutor externo coaxial de retorno;
- Trilha metálica, em uma placa de circuito impresso, separada por uma camada de dielétrico de uma folha metálica de aterramento (MENEZES, 2015).

2.2.2 Classificação das centrais hidrelétricas quanto à geração de energia

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) adota três classificações para as hidrelétricas quanto à geração de energia: Centrais Geradoras Hidrelétricas (com até 1MW de potência instalada), Pequenas Centrais Hidrelétricas (entre 1,1MW e 30MW de potência instalada) e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE, com mais de 30MW).

Outra classificação é dada pelo Centro de Referência de Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) (2018), conforme mostrado na Tabela 1.

Hidrelétricas	**Potência**
1. Grandes Centrais (CGH)	Acima de 50MW
2. Medias Centrais (UHE)	De 30 a 50MW
3. Pequenas Centrais (PCH)	De 01 a 30MW
4. Microcentral (MCH)	De 100W até 100KW

Tabela 1 - Classificação das hidrelétricas quanto à geração de energia.

Por fim, a ELETROBRÁS (2000) faz uma classificação entre as Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH em seu livro “Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas”, conforme mostrado na Tabela 2**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

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

Tabela 2 - Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto.

2.2.3 Capacidade de geração de eletricidade no Brasil

A ANEEL (2008) criou um banco de dados, conhecido como Banco de Informação de Geração – BIG, com a função de divulgar uma série de dados que a Agência reúne sobre o parque gerador brasileiro.

Na Tabela 3 e Quadro 2, estão relacionados o tipo do empreendimento em operação, quantidade de cada empreendimento e a potência gerada por eles.

Quadro 2 - Legenda dos tipos de empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil.

Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termoelétrica
UTN	Usina Termonuclear

Empreendimentos em operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	**%**
CGH	684	669.103	671.339	0,42
CGU	1	50	50	0
EOL	529	12.956.339	12.916.743	8,09
PCH	428	5.106.839	5.070.073	3,17
UFV	2.228	1.306.502	1.306.502	0,82
UHE	220	101.897.047	96.405.579	60,36
UTE	3.007	43.159.179	41.366.351	25,9
UTN	2	1.990.000	1.990.000	1,25
Total	**7.099**	**167.085.059**	**159.726.637**	100

Tabela 3 - Empreendimentos de geração de energia elétrica em operação no Brasil.

2.3 MICROCENTRAL HIDRELÉTRICAS – MCH

As grandes usinas hidrelétricas são complexas e seu impacto ambiental não é medível; mas, se houver uma abordagem desequilibrada e com tecnologia

inapropriada, esses impactos podem ser irreversíveis. Contudo, uma solução para estes problemas é diminuir os impactos ambientais gerados, pois quanto menor for a usina hidrelétrica, menor será a degradação. E esse é um dos motivos pelos quais as micro usinas hidrelétricas desempenham um papel importante, pois raramente causam algum dano ambiental (CAMPOS e MARCONDES, 2017).

Sosnoski (2015) cita que as usinas hidrelétricas de pequena escala funcionam da mesma maneira que as de médio e grande porte. São sistemas hidrelétricos que transformam a energia cinética de fluxos de água em energia elétrica utilizável. A quantia de eletricidade gerada nas MCH's depende principalmente da disponibilidade e compatibilidade dos fluxos d'água com a instalação de unidades geradoras, conhecidas como turbinas, podendo ser tanto de ação, quanto de reação.

As microturbinas, que antes eram aplicadas somente em indústrias aeroespacial e automotiva, evoluíram para aplicações em sistemas elétricos de potência, apresentando diversas inovações tecnológicas. Dentre as variadas tecnologias existentes de geração distribuída (GD), definida como toda produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, uma das que alcançou maiores avanços e maior utilização foi a micro turbina (RONDINA, 2007).

De acordo com Gomes (2015), estas não necessitam de reservatórios, pois operaram a partir de uma pequena quantidade de água. Sua utilização tem objetivo de alimentar pequenas cargas não conectadas à rede de distribuição, embora esta conexão possa ser feita.

Os sistemas de alimentação de água proporcionam a distribuição de um dos componentes essenciais para a conservação da vida, manutenção do bem-estar e saúde dos usuários. Como este sistema é parte básica para o atendimento destas necessidades, é razoável prever que este esteja presente em toda e qualquer comunidade em algum momento de seu desenvolvimento (SOSNOSKI, 2015).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Caracterização do local do experimento

O trabalho foi desenvolvido no laboratório experimental de hidráulica e instalações prediais já existente no Centro Universitário Dinâmica das Cataratas UDC, localizado na cidade de Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, nas coordenadas geográficas 25.516° latitude sul e 54,585° longitude oeste, numa altitude de 164m. O local possui instalações prediais de água fria para alimentação de uma edificação residencial, sendo possível a implementação dos equipamentos e realização de todos os ensaios pertinentes em laboratório.

3.1.2 Microturbina Michell-Banki F50

A microturbina utilizada no experimento foi a F50 do fabricante *Intop Electron*. Ela possui duto translucido, como pode ser visualizada na Figura 06, seus componentes são demonstrados na Figura 7 e suas especificações técnicas são expressas na Tabela 4.

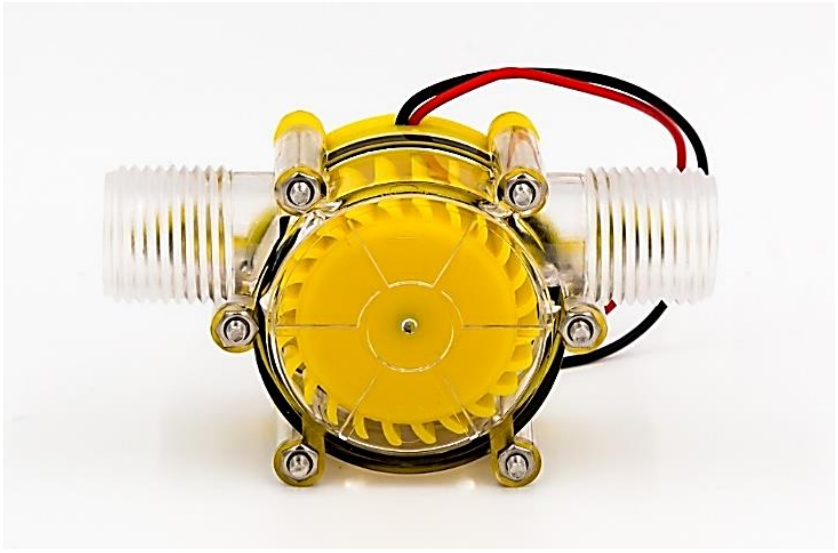

Figura 6 - Microturbina Michell Banki F50.

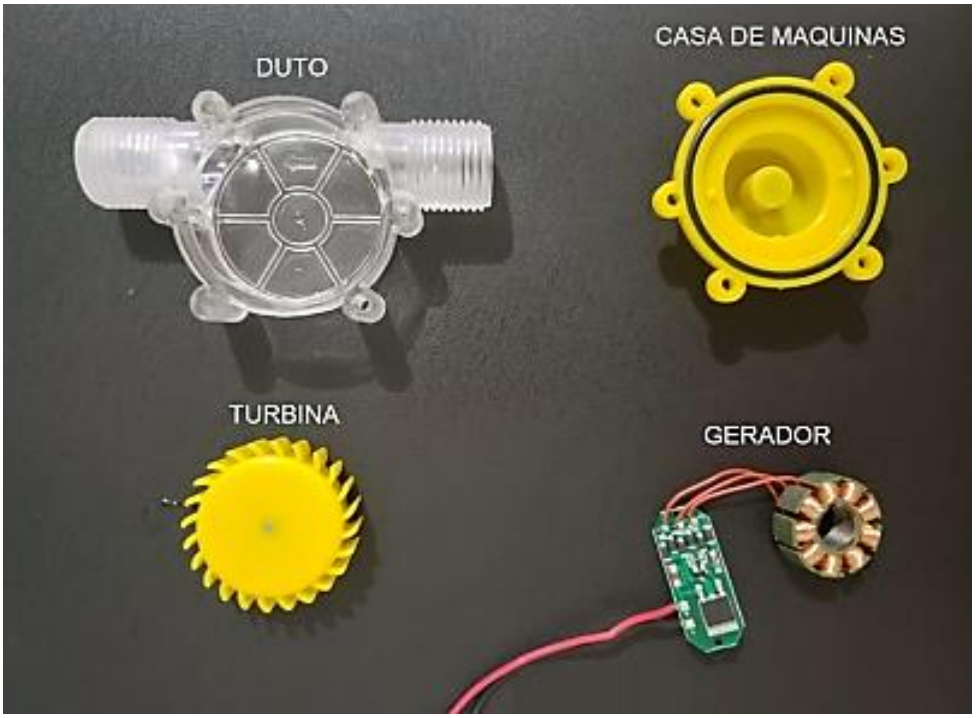

Figura 7 - Componentes da microturbina.

Tabela 4 - Especificações técnicas: microturbina + gerador.

Fabricante / modelo	Intop / F50 12v
Potência de saída	12v
Corrente máxima de saída	200mA
Pressão mínima de funcionamento	0,5mca
Pressão máxima de funcionamento	60mca
Faixa de vazão	5 a 25l/min
Dimensões (C x A x L)	88mm x 49mm x 32mm
Temperatura de operação	0°C a 80°C
Nível de Ruído máximo	55dB
Vida útil Gerador	3000 horas
Peso	90g

O modelo da turbina escolhido foi do tipo *Michell-Banki*, o qual possui diâmetro de acoplamento de entrada e saída de ½'' e diâmetro do orifício do jato de 2mm, como demonstra a Figura 8.

Figura 8 - Microturbina hidrelétrica com seção interna de 2mm.

3.1.2. Manômetro Digital

O instrumento utilizado para a aferição de pressão foi o manômetro digital modelo 12VDCG¼, do fabricante *Benxu*, como demostra a Figura 9, e suas especificações técnica expressas na Tabela 5.

Figura 9 - Manômetro digital.

Tabela 5 - Especificações técnicas: manômetro digital.

Fabricante / modelo	Benxu / 12VDCG¼
Faixa de pressão	0 a 16 bar
Fonte de alimentação	12v
Precisão	0,5%
Pressão de sobrecarga	150%
Frequência	5HZ
Temperatura Fluido	-20 +85°C
Conexão acoplamento	NPT ¼''
Dimensões (D x L)	80mm x 48mm
Peso	240g

3.1.3. Manômetro analógico e válvula redutora de pressão

O sistema de controle de pressão foi composto por um manômetro analógico modelo 3824 Ø 100, da marca *Genebre,* e uma Válvula redutora de pressão modelo 3340 05 ¾'', da marca *Genebre*, conforme Figura 10, e suas especificações técnicas expressas nas Tabelas 6 e 7.

Figura 10 - Manômetro analógico e válvula redutora de pressão.

Tabela 6 - Especificações técnicas: manômetro analógico.

Fabricante / modelo	Genebre / 3824 Ø100
Faixa de regulagem pressão trabalho	0,8 a 5,5 bar
Corpo em latão	CW 617N
Precisão	1,6%
Temperatura do Fluido	-15 +55°C
Conexão acoplamento	BSP ½''
Dimensões (D x L)	100mm x 36mm
Peso	545g

Tabela 7 - Especificações técnicas: válvula redutora de pressão.

Fabricante / modelo	Genebre / 3340 05 ¾''
Faixa de pressão	0 a 10 bar
Caixa em Aço AISI 304	Para Água ou Ar
Temperatura Máx.	80°C
Conexão acoplamento	BSP ¾''
Dimensões (A x L)	155mm x 95mm
Peso	1.400g

3.1.4. Fluxômetro

Os dados de vazão foram coletados atrás do fluxômetro modelo K24, do fabricante *Shengze*. Este equipamento é digital, e, além de aferir a vazão expressa em litros/minuto, ele também calcula o volume total acumulado, conforme demonstra a Figura 11. Suas especificações técnicas são expressas na Tabela 8.

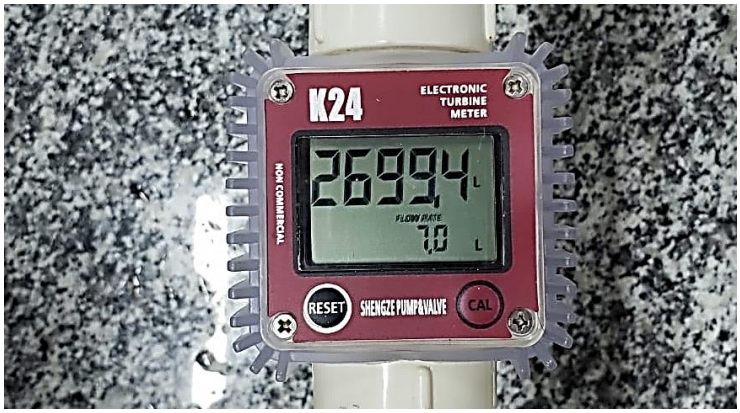

Figura 11 - Fluxômetro.

Tabela 8 - Especificações técnicas: Fluxômetro.

Fabricante / modelo	SHENGZE / K24
Faixa de vazão	10 a 120 l/min
Precisão de medição	1%
Repetibilidade	0,5%
Diâmetro conexão de entrada e saída fluxo	BSP 1’’
Temperatura operação	-10 a 35°C
Pressão máxima	20 bar
Dimensões (C x L x A)	100mm x 70mm x 55mm
Única Contagem	0,00 a 999,9
Contagem total acumulada	0,00 a 999999,9
Unidade de medida	Litros / minuto
Tensão de alimentação	2,5 v
Peso	320g

3.1.5 Bancada de condutos forçados

O local onde foram realizados os ensaios e montado todo experimento foi a bancada de condutos forçados, que está instalada dentro do laboratório de hidráulica e instalações prediais, como demonstra a Figura 12. A bancada possui uma motobomba de 1,5cv que desenvolve a pressão máxima de 18,5mca, com vazão de 4,5m³/hora.

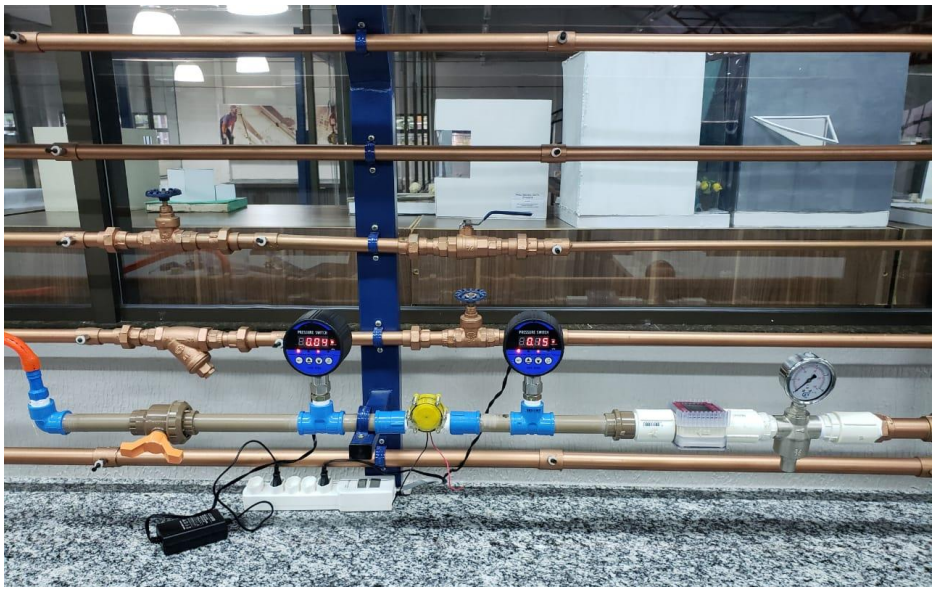

Figura 12 - Bancada de condutos forçados.

3.1.6 Gerenciamento de corrente e tensão

3.1.6.1 Arduino UNO

Para o controle das medições de corrente, foi instalado um sistema de gerenciamento utilizando a plataforma Arduino Uno, conforme demonstrado na Figura 13, e suas especificações técnicas expressadas na Tabela 9.

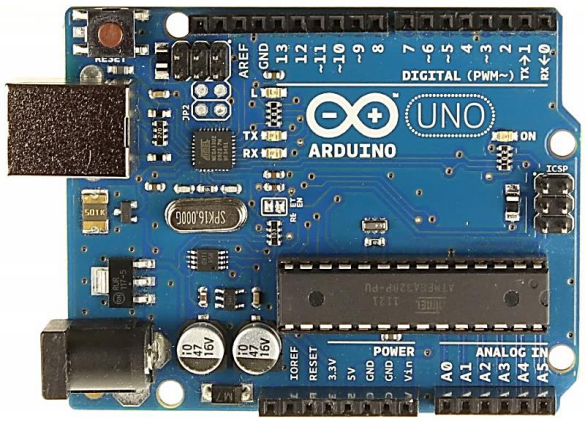

Figura 13 - Plataforma Arduino.

Tabela 9 - Especificações técnicas: Arduino UNO.

Fabricante / modelo	R3 / Arduino UNO
Tensão de operação	5V
Tensão de alimentação (recomendada)	7-12V
Tensão de alimentação (limite)	6-20V
Entradas e saídas digitais	14 das quais 6 podem ser PWM
Entradas analógicas	6
Corrente contínua por pino de I/O	40 mA
Corrente contínua para o pino 3.3V	50 mA
Memória Flash	32KB (ATmega328) dos quais 0.5KB são usados pelo bootloader
Memória SRAM	2KB (ATmega328)
EEPROM	1KB (ATmega328)
Velocidade do Clock	16MHz
Dimensões	68,58mm x 53,34mm
Peso	150g

3.1.6.2 Sensor INA 219

O monitoramento de corrente e tensão em circuitos com tensão DC ficou a cargo do sensor INA219, como demostrado na Figura 14, e suas especificações técnica expressadas na Tabela 10.

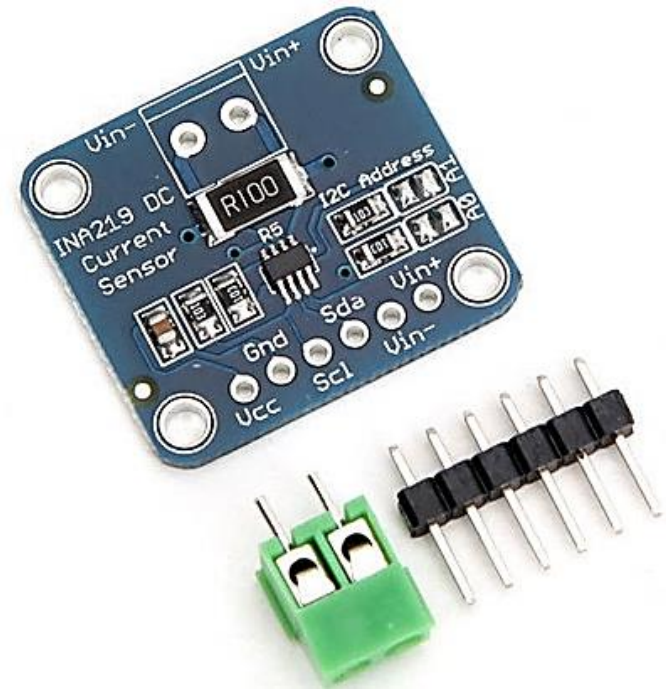

Figura 14 - Sensor INA 219.

Tabela 10 - Especificações técnicas: sensor INA 219.

Fabricante / Modelo	Texas Instruments / INA219
Tensão de alimentação (recomendada)	3 a 5,5VDC
Faixa de tensão no barramento de teste	0 a 26VDC
Corrente máxima de operação	±3.2A com resolução de 0.8mA
Medições	Corrente e Potência
Temperatura de operação	–40°C a 125°C
Dimensões	3,91mm x 4,9mm
Peso	20g

3.1.6.3 Módulo cartão SD

O modulo cartão SD permite a comunicação do sistema Arduino com cartões Micro SD, com o objetivo de salvar informações registradas pelo microcontrolador. O módulo possui uma entrada para cartões Micro SD com 6 pinos de interface disponibilizados para comunicação com o Arduino, como ilustra a Figura 15. Suas informações técnicas são expressas na tabela 11.

Figura 15 - Modulo cartão SD.

Tabela 11 - Especificações técnicas: Módulo cartão SD.

Fabricante / Modelo	Catalex
Tensão de alimentação (recomendada)	3 a 5,5VDC
Faixa de tensão no barramento de teste	0 a 26VDC
Corrente máxima de operação	±3.2A com resolução de 0.8mA
Formatação	FAT16 e FAT32
Temperatura de operação	–40°C a 125°C
Dimensões	51mm x 31mm
Peso	24g

3.2 MÉTODO

3.2.1 Escolha do trecho e instalação a MCH

Para a simulação dos trechos que foram implantadas microturbinas nos sistemas agroindustriais, utilizou-se a bancada de condutos forçados. Como a motobomba da bancada possui potência para alcançar uma altura manométrica de 18,5mca de pressão, foi estabelecido intervalos de pressão de 0,5mca a 15,5mca, variando de 1 em 1mca, com a finalidade de obter-se dados suficientes para gerar curvas de pressão e geração de energia.

A variação de pressão foi controlada através da regulagem da válvula redutora de pressão, instalada no trecho, permitindo que todos os resultados fossem expressos dentro de sua faixa de pressão estabelecida, sem qualquer variação no intervalo de tempo de coleta dos dados da geração de corrente e tensão.

Os valores referentes à vazão foram obtidos por meio da instalação de um fluxômetro no trecho de tubulação que abasteceu a microturbina, com seus resultados expressos em litros por minuto no painel digital do equipamento.

3.2.2 Montagem e programação do microcontrolador arduino

O monitoramento e gerenciamento de corrente e tensão ficou a cargo do sistema Arduino Uno. O sistema também é formado por outros dois componentes eletrônicos, o sensor INA219, com função de coletar as aferições de corrente e tensão, e o micro cartão SD, com objetivo de armazenar todos os dados gerados.

Através da instalação do software IDE 1.8.5, programou-se o Arduino para coletar as medições através da implementação de nova biblioteca de código fonte para esta função.

A microturbina foi conectada ao sensor INA 219, e este ligado ao Arduino, tornando possível a medição, tanto da corrente quanto da tensão. A montagem do sistema pode ser melhor compreendida nas Figuras 16 e 17.

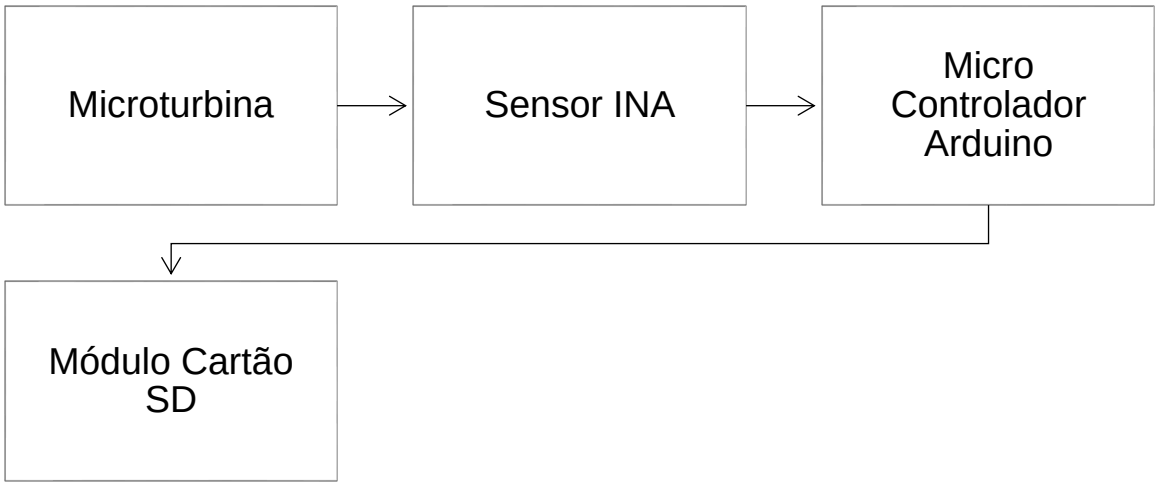

Figura 16 - Fluxograma do sistema.

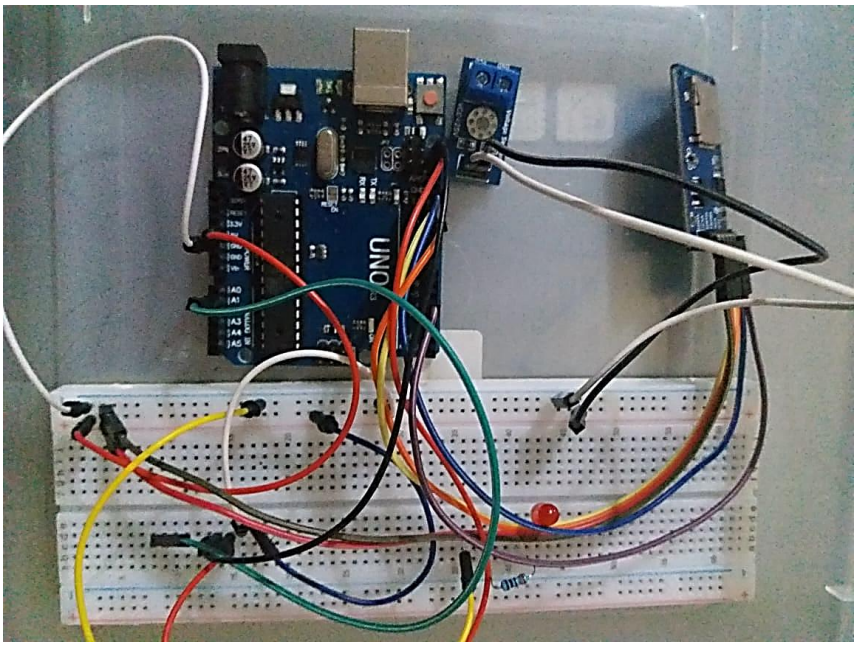

Figura 17 - Sistema Arduino conectado.

3.2.3 Análise do efeito de perda de pressão em função da microturbina na rede hidráulica

Com os dados coletados de pressão na rede pelo manômetro digital instalado antes da microturbina, e com os dados coletados de pressão na rede após a passagem da água pela microturbina nas diferentes faixas de pressão, foi analisada

a perda de pressão proporcionada pela microturbina no sistema. Foi realizada a comparação entre todos os valores de pressão obtidos antes e, após a passagem da água pela microturbina, os dados de potência e energia gerada pela microturbina foram avaliados conforme sua variabilidade pelo cálculo do coeficiente de variação, utilizando a Equação 1.

Eq. 1

$$CV = \frac{S}{\bar{\chi}} \ . \ 100$$

S = Desvio padrão;

$\bar{\chi}$ = Média dos dados;

CV = Coeficiente de variação (%).

3.2.4 Avaliação da geração de energia elétrica da MCH

Foram coletados os dados de tensão e corrente na saída da microturbina em função da carga de 5,0W instalada em conformidade com a potência nominal do gerador a cada 10 segundos, com cálculo de médias a cada 5 minutos, durante 5 horas de coleta, para cada faixa de pressão estabelecida no sistema. Pelo produto entre a tensão e a corrente elétrica medidas, foi calculada a potência de saída da microturbina.

A energia gerada pela microturbina, foi calculada pelo produto entre a potência de saída e o tempo transcorrido para a coleta dos dados. Os dados de corrente e tensão gerados pela microturbina foram avaliados conforme sua variabilidade pelo cálculo do coeficiente de variação, utilizando a Equação 1.

3.2.5 Determinação de eficiência do sistema de geração da MCH

Para determinar a eficiência do sistema de geração da MCH, foi utilizado a Equação 2.

Eq. 2

$$\eta_{MCH} = \frac{E_{MCH}}{E_{HD}} \times 100$$

η_{MCH} = Eficiência de geração de energia elétrica da microturbina (%);

E_{MCH} = Energia gerada pela microturbina (W);

E_{HD} = Energia hidráulica disponível pela rede (W).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA

A Tabela 12 apresenta a estatística descritiva das aferições de geração de energia, na faixa de pressão avaliada. Constam, também, os valores de pressão (mca), vazão (m³/s), tensão (V), desvio padrão (DV), coeficiente de variação (CV), corrente (A) e potência produzida (W).

PRESSÃO mca	VAZÃO m³/s	TENSÃO V	DV	CV	CORRENTE A	DV	CV	POTÊNCIA W
0,50	0,00E+00	0,00	0,0000	0,0000	0,00000	0,00000	0,0000	0,000
1,50	4,83E-05	4,66	0,0725	1,5564	0,00775	0,00050	6,4739	0,036
2,50	6,67E-05	8,37	0,0885	1,0583	0,02177	0,00008	0,3562	0,182
3,50	8,33E-05	11,10	0,1280	1,1537	0,03303	0,00016	0,4992	0,367
4,50	1,02E-04	11,66	0,0392	0,3363	0,04679	0,00015	0,3184	0,546
5,50	1,12E-04	11,71	0,0202	0,1725	0,05526	0,00026	0,4663	0,647
6,50	1,27E-04	11,78	0,0474	0,4021	0,06405	0,00017	0,2660	0,754
7,50	1,37E-04	11,89	0,0477	0,4009	0,08202	0,00008	0,1024	0,975
8,50	1,45E-04	11,87	0,0500	0,4216	0,09056	0,00015	0,1631	1,075
9,50	1,55E-04	11,80	1,5087	12,7895	0,09727	0,00017	0,1760	1,147
10,50	1,60E-04	11,98	0,0443	0,3702	0,10518	0,00035	0,3370	1,260
11,50	1,67E-04	12,00	0,0307	0,2560	0,11264	0,00222	1,9738	1,351
12,50	1,73E-04	12,18	0,7526	6,1782	0,11845	0,00060	0,5060	1,443
13,50	1,83E-04	12,07	0,0274	0,2273	0,12258	0,00019	0,1536	1,479
14,50	1,88E-04	12,10	0,0317	0,2618	0,12659	0,00046	0,3600	1,532
15,50	1,92E-04	12,09	0,0280	0,2400	0,13218	0,00057	4,3300	1,600

Tabela 12 - Estatística descritiva dos dados de geração de energia em cada faixa de pressão.

Na primeira faixa de pressão avaliada de 0,5mca, o fluxômetro não realizou uma leitura eletrônica. Desta forma, os demais resultados nesta faixa foram atribuídos como zero e descartados nas análises estatísticas.

Os valores obtidos referentes ao coeficiente de variação (CV) na tensão (V) foram inferiores a 2,0% em 13 dos 15 intervalos de pressões avaliadas. Na faixa de pressão 5,5mca, obteve-se o menor resultado de coeficiente de variação, que foi de 0,1725%.

O coeficiente de variação que obteve o maior resultado foi 12,78%, obtido na faixa de pressão 9,5mca. Todavia, todas ficaram abaixo do valor de referência, o que

indica pouca variabilidade nos dados, considerados como homogêneos por Gomes (1990).

Em relação aos dados de Corrente (A), os valores encontrados foram ainda mais baixos nas análises de coeficiente de variação, sendo na faixa de pressão 1,5mca observado a maior variabilidade, que foi de 6,47%.

A baixa dispersão dos resultados pode ser justificada pelo fato dos experimentos serem executados em laboratório, uma vez que a pressão e a vazão não sofrem variações de leitura dentro de cada uma das faixas de pressão avaliadas. Este fator pode ser atribuído à utilização da válvula redutora de pressão no sistema, que ajudou a manter a pressão constante.

4.2 AVALIAÇÃO DA PERDA DE PRESSÃO NA TUBULAÇÃO EM FUNÇÃO DA MICROTURBINA

A Figura 18 apresenta os valores de perda de pressão referentes a cada faixa de pressão avaliada.

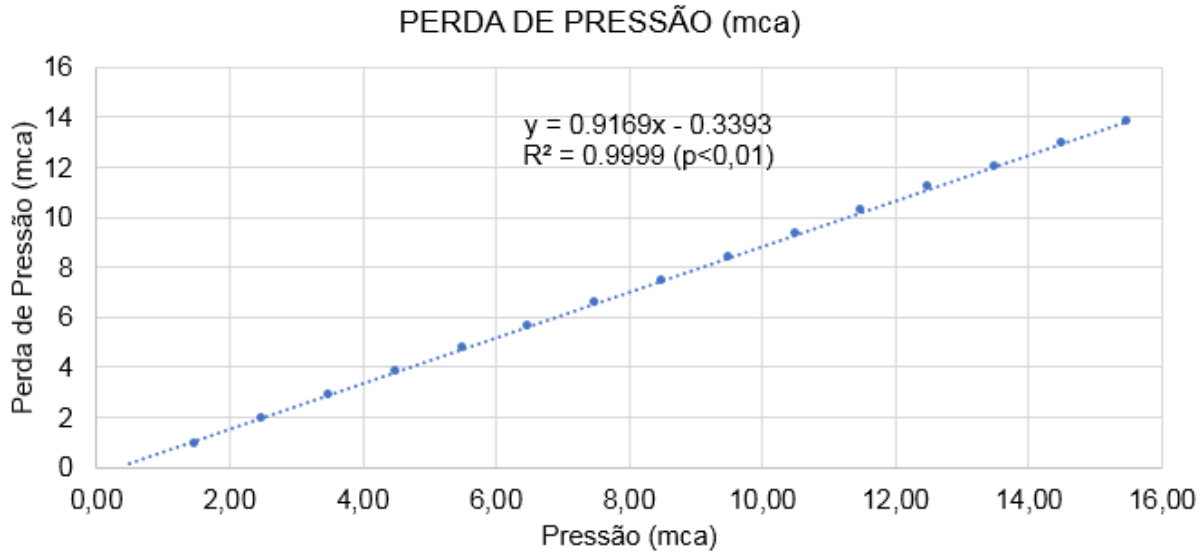

Figura 18 – Faixa de pressão e suas respectivas perdas de pressão aferidas.

Os valores de coeficiente de determinação (R^2) indicam o quanto da variação da variável do eixo das ordenadas é explicada pelo modelo (equação do gráfico)

envolvendo a variável no eixo das abscissas, assim, busca-se valores próximos a 1,0. Os valores de p inseridos entre parênteses indicam a significância dos modelos. Como demostra a Figura 18, todos apresentaram 99% ($p < 0,01$) de confiança, ou seja, pelo menos 99% de confiança nos dados experimentais, segundo Charnet (1999).

Na menor faixa de pressão avaliada (1,5mca), o valor da perda de pressão foi de 0,93mca, este equivalente a 62% de perda total de energia do trecho após a instalação da microturbina.

Já na maior faixa de pressão avaliada (15,5mca), obteve-se um valor de 13,8mca de perda de pressão, equivalente a 89% de perda total de energia.

As perdas de pressão foram crescentes em relação à pressão disponível de cada faixa avaliada até a faixa 12,5mca, chegando a um valor máximo de 89,6%. A partir da faixa de pressão 11,5mca, pode-se dizer que as perdas foram constantes em relação à pressão disponível, com uma variação dos valores entre si de menos que 1%. Não se pode afirmar que estas perdas continuariam a ser constantes até a pressão máxima de uso da microturbina, estipulada pelo fabricante em 60mca, sem antes realizar os mesmos ensaios que foram submetidas por este trabalho.

Independente da faixa de pressão avaliada, todos os percentuais de perdas de pressão foram altos e podem inviabilizar a utilização da microturbina em casos os quais a pressão mínima requerida no ponto de consumo do trecho em que ela for instalada seja maior que 1,7mca.

Os expressivos valores das perdas de pressão podem estar ligados à proporção de tamanho dos componentes da microturbina, sendo sua perda de pressão proporcional ao diâmetro de seu duto e orifício de jato, como também avaliado por Porto (2006).

No sistema utilizado, os diâmetros de entrada e saída da tubulação na microturbina eram iguais, de tamanho 25mm, confeccionados em PVC, diferente de Levin (1969), que sugere utilizar um trecho de tubo com diâmetro 20% maior na adução da microturbina, para diminuir os efeitos da perda de pressão.

Segundo Khosrowpanah (1984) é possível obter bons resultados na instalação de microturbina em substituição a válvulas redutoras de pressão em trechos de tubulações, fato este que viabiliza sua instalação independente da sua elevada perda de pressão, sendo possível criar meios mecânicos de regulagem destes percentuais.

4.3 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE PRESSÃO

A Figura 19 apresenta os valores da geração de energia em cada faixa de pressão avaliada.

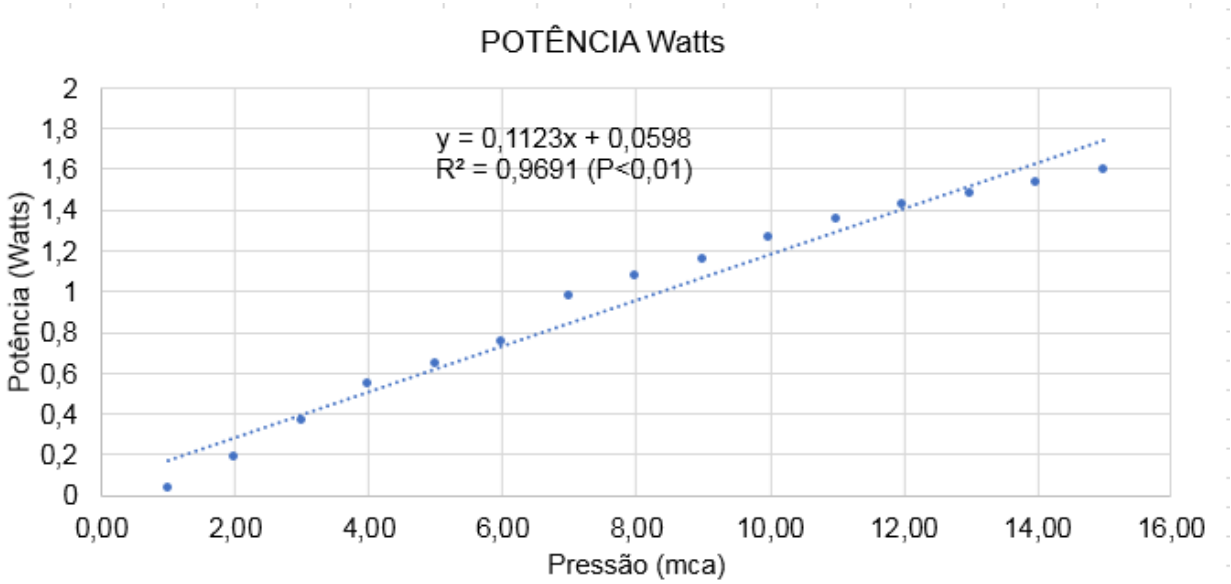

Figura 19 - Relação entre a energia e a pressão.

Os resultados da regressão linear mostraram-se positivos em relação às variáveis de energia e pressão, demonstrando a confiabilidade no modelo em 96,91%.

Pode-se observar que a melhor produção de energia em função da pressão foi na faixa 7,5mca, seguida de 8,5mca e 9,5mca. A partir destas faixas, a geração de energia diminui em relação à pressão disponível, o que ocorreu inversamente nas faixas mais baixas até a de 4,5mca, na qual a crescente produção de energia estabilizou-se.

O maior valor de geração de energia foi de 1,6W, alcançada na faixa de pressão 15,5mca. Em relação à tensão, houve uma estabilidade a partir da faixa de pressão 12,5mca, sendo alcançado os valores citados pelo fabricante, que correspondem a 12V.

Em termos de comparação para possíveis equipamentos consumidores, esta geração seria de 1,19kW/mês.

Os resultados encontrados por Sosnoski (2015) demonstram valores maiores de geração de potência, na faixa de 53W com uma pressão disponível de 5,0mca e vazão 0,00137m³/s, o que se deve principalmente ao fato de seu conjunto de microturbina e gerador possuir a geometria dimensionada de acordo com o proposto por Camus e Eusebio (2006) e as diretrizes construtivas de CERPCH (2019).

A potência máxima da microturbina fornecida pelo fabricante, é de 10W, sendo descrito como alcançado na máxima pressão de uso, que são 60mca. Não se pode alegar que este valor seria encontrado com a continuidade dos ensaios até faixas maiores de pressão, pois houve uma queda de geração com o aumento de pressão das 4 últimas faixas. A falta do gráfico de geração em função da pressão, da microturbina do fabricante, também torna essa comparação incompleta.

4.4 AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENERGIA DA MICROTURBINA EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE VAZÃO

A Figura 20 apresenta os valores da geração de potência em cada faixa de vazão encontrada.

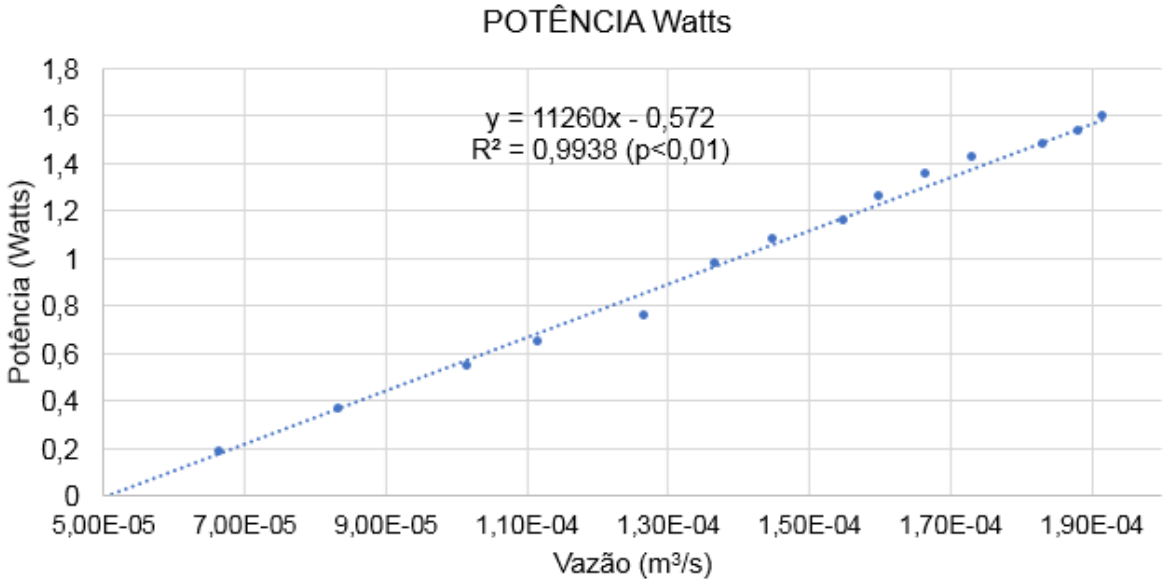

Figura 20 - Relação entre a energia produzida e as faixas de vazão.

Considerando o modelo de regressão linear, afirma-se que existe uma relação

positiva e constante entre as variáveis. O valor de R^2 (0,9938) indica um bom ajuste do modelo linear para descrever esta relação. Neste caso, 99,38% da variação da energia pode ser explicada pelo modelo proposto envolvendo a vazão.

Os melhores resultados estão entre 1,6E-04m³/s a 1,72E-04m³/s, que se situam nas faixas de 10,5mca a 11,5mca, e demonstraram uma próximidade com as faixas de pressões que obtiveram melhores gerações.

Com o modelo de microturbina avaliada, a vazão máxima foi de 1,92E-04m³/s, valor considerado baixo por Thiago Filho (2004), o qual em sua classificação das caracteristicas de turbinas de fluxo cruzado, citou o valor de 0,025m³/s como mínimo para obter potência de 1kW. Estima-se que essa geração chegaria a somente 0,208kW, nesta faixa de 0,025m³/s, caso se mantivessem constantes os resultados de variabilidade de energia em função do aumento de vazão.

De acordo com Lopes (2016), seus valores encontrados foram menores, com geração de 0,012Wh e vazão de 1,10E-04m³/s; contudo, sua pressão não foi citada para efeito de comparação.

Ainda, em seu trabalho, Lopes (2016) atingiu 12V com a faixa de vazão de 1,66E-04m³/s, valores muito próximos aos aferidos neste trabalho, que foram alcançados a uma vazão de 1,67E-04m³/s.

Destaca-se que a variação de vazão não é um fator negativo para se alcançar resultados expressivos na geração de potência utilizando a microturbina tipo Michel-banki em casos que exista a possibilidade de utilizaçao de reservatórios (não a fio d’água), como avaliado por Farret (1999).

4.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA MICROTURBINA

A Figura 21, apresenta os valores de eficiência em porcentagem com relação a cada faixa de pressão (mca) avaliada.

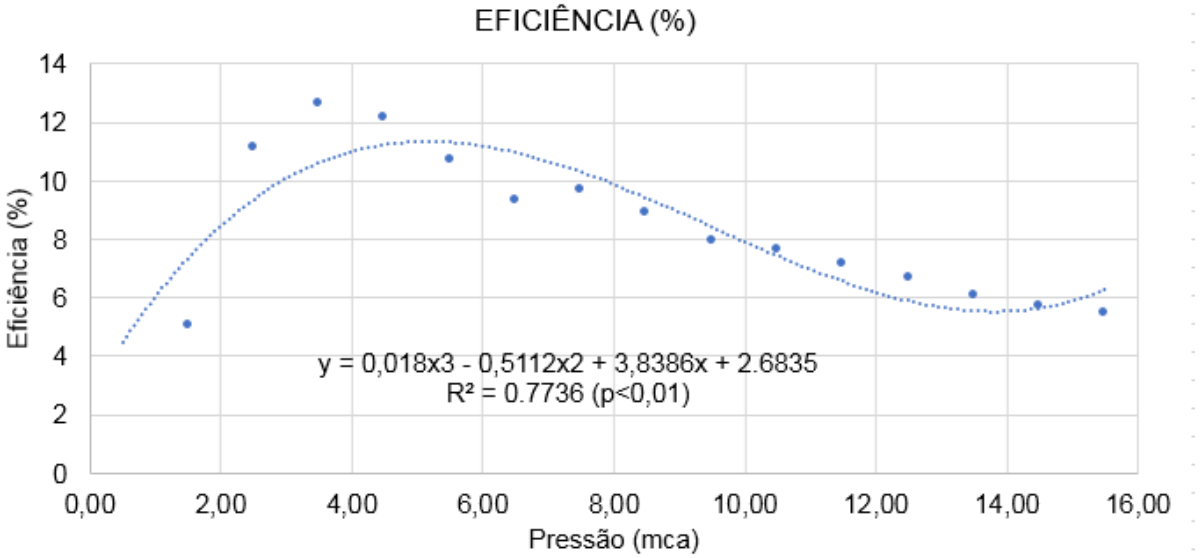

Figura 21 - Relação entre eficiência e a pressão.

A avaliação da regressão linear representou uma dispersão dos resultados de eficiência, entre as faixas de pressão, de 77,36% de variabilidade.

Através dos valores obtidos nos cálculos, evidenciou-se que o aumento de pressão não é sinônimo de aumento de eficiência na microturbina.

O menor valor encontrado foi de 5,06%, na faixa de menor pressão. Valor este muito próximo do calculado na faixa de maior pressão, que foi de 5,48%.

Com média de 8,42%, a microturbina demostrou um valor máximo de eficiência de 12,66%, na faixa de pressão 3,5mca com vazão de 0,833E-04m³/s.

Camus e Elsébio (2006) afirmaram que, em conjuntos mais simples, é possível atingir eficiências na faixa de 60 a 75%, com a utilização da turbina Michel-banki, no entanto, estes percentuais foram encontrados se considerado o uso de tubo de sucção e saída final para a atmosfera, não em situações em que o escoamento pós turbina está canalizado, como neste trabalho.

Segundo Beluco (1994), estas turbinas apresentam eficiência na faixa de 65%, com grande possiblidade de variação de vazão.

A construção do tubo de sucção com chapas de aço contribui de maneira drástica para o aumento de eficiência destas turbinas, cita Mello Junior (2000).

Como a construção da microturbina avaliada é apenas com intuito de reduzir custos, esta falta de engenharia na sua concepção reduz a sua capacidade de ser mais eficiente em todos os aspectos.

5. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados no experimento permitiram concluir que a utilização da microturbina em um fluxo canalizado gerou uma perda de pressão de 62% a 89% entre as faixas avaliadas, fato este que pode inviabilizar a sua instalação em trechos de tubulações onde requerem maiores pressões a jusante. Contudo, recomenda-se a sua utilização como válvula redutora de pressão em trechos canalizados, em que sua geração de energia se somaria a esta utilidade.

No que se refere à geração de energia elétrica, observou-se uma melhora nos resultados nas faixas de pressão 7,5mca, 8,5mca e 9,5mca, com geração máxima de 1,6W de potência entre todas as faixas.

Em relação à determinação da eficiência, o valor máximo obtido foi de 12,66%, encontrado na faixa de pressão 4,5mca. Conclui-se que esse baixo valor é influenciado pela canalização do fluxo de saída da microturbina; portanto, sugere-se que a sua instalação seja diretamente no ponto de alimentação de equipamentos ou dispositivos onde o fluxo seja livre para atmosfera e possa ser instalado seu duto de sucção, melhorando, assim, sua geração de energia e eficiência geral.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHIKARI, D. (2011). **Sustainability Analisys of Hydropower In Nepal**. Helsinki, Finlândia: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2008). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2012). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Brasília: PRODIST - Diretoria Geral.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. (2012). **Resolução Normativa nº482/2012**. Brasília, Brasil: Diretoria Geral.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (05 de Junho de 2018). **BIG - Banco de Informação de Geração**. Fonte: BIG - Banco de Informação de Geração: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm

ALVES, G. M. (2007). **Avaliação da viabilidade de implantação de uma microcentral hidrelétrica, para atender consumidores localizados em regiões isoladas**. Botucatu: Tese (Doutorado em concentração energia na agricultura) - UNESP.

ALVES, G. M. (2007). **Avaliação da Viabilidade de Implantação de uma Micro-central Hidroelétrica para Atender Consumidores Localizados em Regiões Isoladas**. Botucatu: UNESP - Faculdade de CIências Agronômicas.

AMPIM, E., & A., M. S. (2017). **A Study of Hydro and pumped storage hydropower in Northern Norway**. Noruega: Faculty of Engeineering Science and Technology - University of Norway.

BELUCO, A. Tese de Mestrado. **Viabilidade de Microcentrais Hidrelétricas Baseadas no Emprego de Equipamentos de Mercado**. UTFRG – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Porto Alegre – RS, Brasil – 1994.

CAMPOS, L., & MARCONDES, N. (2017). **Análise da viabilidade técnica e econômica do potencial energético do rio RANCHARIA**. Curitiba: Monografia (Graguação em Engenharia Elétrica) - UTFPR.

CAMUS, C., EUSÉBIO, E. **GESTÃO DE ENERGIA - Energia Mini-Hídrica.** ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. DEEA – Secção de Economia e Gestão, 2006.

CASTRO, D. F. (2015). **Eficiência Energética aplicada a Instalações Elétricas Residênciais** . Rio de Janeiro: Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UFRJ.

Centro de Referência de Pequenas Centrais Hidrelétricas - **CERPCH**. (05 de Junho de 2019). Fonte: https://cerpch.unifei.edu.br/pt/

Charnet, R.; Luna, C.A.; Bonvino, H.; Charnet, E.M.R. **Análise de modelos de regressão linear com aplicações**. Campinas: UNICAMP, 1999. 356p.

DOZIER, A. (2012). **Integrated Water and Power Modeling Framework for Renewable Energy Integration** (Tese Mestrado ed.). Colorado, Estados Unidos: Department of Civil and Environmental Engineering - Colorado State University.

DUPONT, F. H., GRASSI, F., & ROMITTI, L. (2015). **Energias Renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria - Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM, v. 19, n°1(Ed. Especial), p. 70-81.

ELETROBRÁS. (1985). **Manual de Microcentrais Hidrelétricas**. 584 p.

ELETROBRÁS. (2000). **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas.** Eletrobrás.

ELETRODEX ELETRÔNICA. (16 de Junho de 2019). Fonte: http://www.eletrodex.com.br/

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. (2017). **Balanço Energético Nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética - (EPE).

GARCIA, F. R., & RIBEIRO, C. (2015). **Estudo técnico e econômico comparitivo entre a utilização de hidrogeradores verticais acionados por turbinas kaplan e hidrogeradores acoplados a turbina kaplan bulbo**. Universidade Federal do Ceará - UFC.

GOLDEMBERG, J. (2015). **O estado atual do setor elétrico brasileiro**. Revista USP, 37-44.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 12.ed. São Paulo: Nobel, 1990. 467p.

GOMES, V. O. (2015). **Estudo dos impactos da geração alternativa residencial de energia elétrica na rede de distribuição**. Pampulha: Monografia (Especialização em Engenharia Elétrica) - UFMG.

GÓMEZ, M.F.; SILVEIRA, S. Delivering off-grid electricity systems in the Brazilian Amazon. **Journal of Energy for Sustanaible Development.** v. 16, p. 155 -167, 2012.

GUITARRARA, G. B. (2012). **Estimativa de Vazão para a Implantação de Micro-centrais hidrelétricas com utilização do SIG**. São Carlos, São Paulo, Brasil: USP.

IAC. (2007). **Lighting the way: Toward a Sustainable Energy Future**. (M. C. Gaspar, Trad.) São Paulo, São Paulo: FAPESP.

IORRA, P.R.Q. (2013). **Análise de Potencial de Microgeração Hidroelétrica Predial**. Rio Grande do Sul: UFRGS - Escola de Engenharia.

KOCK, J. (2014). **Micro Central Hidrelétrica com Turbina Hidrocinética**. Pato Branco, Paraná: UTFPR .

Laboratório avançado de sistemas de automação - LASA . (S/A). Matriz de contato. Fundação Municipal de Ensino de Piracicaba, p. 14.

LIMA, F. (2013). **Tipos de Turbinas Hidráulicas aplicada às pequenas, mini e microcentrais**.

LIMA, G. M. (2013). **Microgeração em Sistemas de Abastecimento de Água**. Itajubá: Universidade Federal de Itajuba.

LOPES, K. S. (2016) - **Observação de Vazão Hidráulica Residencial como Potencial Gerador de Eletricidade Monitorado via Plataforma Arduino**. In: XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental, 2016, Brasília. Anais do XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental, 2016. p. 712.

MARQUES,T; MUNHOZ, G. P. (2015). **Estudo de Turbina para Implantação em uma Central Hidrelétrica**. Curitiba, Paraná, Brasil: UTFPR .

MELLO JUNIOR, A. G. (2000). **A turbina de fluxo cruzado (Michell-Banki) como opção para centrais hidrelétrica de pequeno pore**. São Paulo: Dissertação (Pós-Graduação em Energia) - USP.

MENEZES, V. P. (2015). Linhas de Transmissão de Energia Elétrica: **Aspectos Técnicos, Orçamentários e Construtivos** . Rio de Janeiro: Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UFRJ.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2010). **Avaliação da Eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019)**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Enegia.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2016). **Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024)**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia.

MONTALVÃO, E; FARIA I. D. (s.d.). **Boletim do Legislativo n°16, de 2012: Energia Sustentável para Todos**. Brasil: Núcleo de Estudos, Consultoria do Senado Federal.

MORAIS, L. (2015). **Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras**. Bauru: (Dissertação em Engenharia Elétrica) - Unesp.

NETTO, J. M. A. (2015). **Manual de Hidráulica (9° ed.)**. São Paulo: Ed. Blucher.

NEWTON, J. A. (2012). **A Lucid Energy Dreams: In-pipe hydropower systems spell opportunity**. Acesso em 2019, disponível em <https://www.wwdmag.com/industrial-water-wastes-digest/iwwd-octobernovember-2012>

OLIVEIRA, F., & ALBERTIN, M. (2007). **Estudo de caso - Eficiência energética no prédio da Etufor**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, p. 8.

PACHECO, G. R., GALICE, G. F., TERRA, M. B., DAL MORO, R. M., & PACHECO, V. R. (2014). **Arduino + Brino para a robótica educacional.** Brasilia.

PROPHET, R. (2015). **An Investigation Into the Feasibility of a Micro-hydro installation for the Guardbridge Energy Centre as Part of a Brownfield**

Redevelopment. Glasgow, Reino Unido: Department of Mechanical and Aerospace Engineering - University of Strathclyde.

PUCRS. (s.d.). USE - **Uso Sustentável da Energia: Manual de Economia de Energia**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: Faculdade de Engenharia - Grupo de Eficiência Energética. Acesso em 2019, disponível em <http://pucrs.br/biblioteca/manualuse.pdf>

REIS, L. B; CUNHA, E. C. N. (2006). **Energia Elétrica e Sustentabilidade - Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. Barueri, São Paulo: USP - Faculdade de Saúde Pública e Núcleo de Informações em Saúde Ambiental.

RONDINA, J. M. (2007). **Geração distribuida utilizando micro-centrais hidro-elétricas com tecnologia assíncrona**. Uberlândia: Disertação (Mestre em Engenharia Elétrica) - UFU.

SÁ, C. M. (2010). Micro, Mini e PCHs: **Pequenas Centrais Hidrelétricas**. (Kelps, Ed.) Goiânia: PUC Goiás.

SALES, A. L. (2007). **Perspectivas de evolução, a médio e longo prazos, do parque gerador de energia elétrica no Brasil.** Campinas: Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Unicamp.

SANTOS, R. C. (2013). **Análise de cavitação de uma turbina hidráulica do tipo Kaplan**. Rio de Janeiro: Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFRJ.

SCHNEIDER, C. R. (2013). **Estudo de viabilidade de uma microcentral hidrelétrica como fonte alternativa de energia**. 2013: Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - UNIJUÍ.

SILVA FILHO, D. d. (2003). **Dimensionamento de usinas através de técnicas de otimização evolutiva**. São Carlos: Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - USP.

SILVA, M. A. C. (2012). **Factores de Sustentabilidade em Energias Renováveis**. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - Área Departamental de Engenharia Mecânica.

SOARES JUNIOR, R. L. (2013). **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**. Rio de Janeiro: Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - UFRJ.

SOSNOSKI, A. S. (2015). **Produção de energia por mini e micro hidrelétricas na rede de distribuição de água**. São Paulo: Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - USP .

SOUZA, A. R., PAIXÃO, A. C., UZÊDA, D. D., DIAS, M. A., DUARTE, J., & AMORIM, H. S. (2011). **A placa Arduino: uma opcão de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 1-5.

SOUZA, Z; SANTOS, A. H. M; BORTONI, E. C. (2009). **Centrais Hidrelétricas: Implantação e Comissionamento** (2° ed.). Rio de Janeiro: Interciência.

STEPANOFF, A. J. (1967). **Centrifugal and Axial Flow Pumps** (2° ed.). Nova Iorque: Ed. John Wiley and Sons.

SVENDSEN, T. M. (2013). **Hydroeletric Power in Present and Future Energy Systems**. 2013. Noruega: Department of Physics and technology, University os Bergen.

TIAGO FILHO, L. G. **Eficiência dos equipamentos de PCH's no Brasil**. ItajubáMG: EFEI, 2004.

TOLMASQUIM, M. T. . (2016). **Energia Renovável - Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. EPE: Rio de Janeiro.

VERGÍLIO, K. E. (2012). **Geração distribuída e pequenas centrais hidrelétricas: alternativas para geração de energia elétrica no Brasil**. São Carlos: Monografia (Graduação em energia elétrica) - Universidade de São Paulo.