

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Paulo Victor Barbosa Soares

DESEMPENHO DE UM MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA DO TIPO PELTON
INSTALADA EM UMA BANCADA DIDÁTICA EXPERIMENTAL

SÃO LUÍS - MA

2025

Paulo Victor Barbosa Soares

DESEMPENHO DE UM MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA DO TIPO PELTON
INSTALADA EM UMA BANCADA DIDÁTICA EXPERIMENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Dener Silva de Almeida
Co-orientador: Prof.M.Sc. Diego Paes de Andrade
Peña

SÃO LUÍS - MA

2025

Paulo Victor Barbosa Soares

Desempenho de um modelo de Turbina Hidráulica do Tipo Pelton Instalada em uma Bancada
Didática Experimental

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica
como requisito parcial para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

São Luís, fevereiro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Dener Silva de Almeida – Presidente (Orientador)

Prof. M. Sc. Diego Paes de Andrade Peña – (Co-orientador)

Prof. Dr. Jorge Bertoldo Júnior – Membro

Prof. Dr. Dalmo Inácio Galdez Costa - Membro

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Barbosa Soares, Paulo Victor.

DESEMPENHO DE UM MODELO DE TURBINA HIDRÁULICA DO TIPO
PELTON INSTALADA EM UMA BANCADA DIDÁTICA EXPERIMENTAL /
Paulo Victor Barbosa Soares. - 2025.
45 f.

Coorientador(a) 1: Diego Paes de Andrade Peña.

Orientador(a): Dener Silva de Almeida.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Maranhão, São Luis - Ma, 2025.

1. Turbina Pelton. 2. Operação. 3. Rendimento. I.
Paes de Andrade Peña, Diego. II. Silva de Almeida, Dener.
III. Título.

RESUMO

As turbinas hidráulicas são responsáveis por converter energia hidráulica em trabalho mecânico, que posteriormente é transformado em energia elétrica por meio de um gerador. Tal processo é utilizado em hidrelétricas para a geração de energia a partir de quedas de água, localizadas em mares e rios. A turbina Pelton é uma turbina de ação composta por um rotor com pás em forma de colher, conhecidas como "conchas", que são presas à árvore da turbina. As pás da turbina se encontram alinhadas ao bocal do bico injetor (sistema diretor), que direciona a água a alta velocidade, realizando a rotação da turbina para posterior geração de energia. A energia produzida através desse dispositivo pode ser maximizada ou reduzida variando-se alguns dos parâmetros operacionais da turbina. Desta forma, ensaios foram realizados em um modelo de turbina do tipo Pelton, instalada em uma bancada didática experimental com instrumentação e sistema de aquisição de dados próprios. Tal bancada possibilitou a variação dos seguintes parâmetros operacionais: vazão, torque e grau de abertura do sistema diretor no desempenho da turbina. Foram obtidos: pressão, velocidade angular, potência mecânica, potência hidráulica e rendimento. Esses parâmetros foram analisados com vista à obtenção da condição de operação que propiciou o melhor rendimento, obtida para **P3-Q3** (posição 3 da agulha e vazão $3 \text{ m}^3/\text{h}$), sendo o valor da vazão nesse ponto de $2,96 \text{ m}^3/\text{h}$ e rendimento de 53,7%. Ademais, foram verificados os limites operacionais da turbina, sendo valor máximo de vazão $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$, grau de abertura do sistema diretor posição 3 e torque $166,45 \text{ N.cm}$. Para os valores mínimos, temos: vazão $1,02 \text{ m}^3/\text{h}$, grau de abertura do sistema diretor na posição 2 e torque $1,91 \text{ N.cm}$. As curvas de operação obtidas apresentaram padrão condizente com a literatura.

Palavras-chave: Turbina Pelton; Operação; Rendimento.

ABSTRACT

Hydraulic turbines are responsible for converting hydraulic energy into mechanical work, which is later transformed into electrical energy by means of a generator. This process is used in hydroelectric plants to generate energy from waterfalls located in seas and rivers. The Pelton turbine is a single-action turbine consisting of a rotor with spoon-shaped blades, known as "shells", which are attached to the turbine shaft. The blades are aligned with the nozzle of the injector, which directs the water at high speed, rotating the turbine for subsequent generation of energy. The energy produced through this device can be maximized or reduced by varying some of the turbine's operating parameters. The energy produced through this device can be maximized or reduced by varying some of the turbine's operating parameters. tests were conducted on a model of a Pelton type turbine installed on an experimental didactic bench with its own instrumentation and data acquisition system. This bench allowed for the variation of the following operational parameters: flow, torque and degree of opening of the director system. The following values were obtained: pressure, angular velocity, mechanical power, hydraulic power, and efficiency. These parameters were analyzed to determine the operating condition that provided the best efficiency, which was achieved at P3-Q3 (needle position 3 and flow rate 3 m³/h), with a flow rate of 2.96 m³/h and an efficiency of 53.7%. Additionally, the turbine's operational limits were verified, with a maximum flow rate of 4.25 m³/h, guide vane system opening at position 3, and torque of 166.45 N·cm. The minimum values recorded were: flow rate of 1.02 m³/h, guide vane system opening at position 2, and torque of 1.91 N·cm. The obtained operating curves showed a pattern consistent with the literature.

Keywords: Pelton turbine; Operation; Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Roda d'água vertical	10
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira	12
Figura 3 – Rotor da turbina Francis.....	13
Figura 4 – Turbina Francis.....	13
Figura 5 – Vista lateral turbina Kaplan.....	14
Figura 6 – Rotor da turbina Dériaz.....	15
Figura 7 – Turbina Pelton desenho inicial	16
Figura 8 – Desenho moderno turbina Pelton	17
Figura 9 – Turbina Pelton Horizontal	17
Figura 10 – Bancada de Turbinas Pelton e Francis Labtrix.....	20
Figura 11 – Vista externa do painel	21
Figura 12 – Vista interna do painel.....	21
Figura 13 – Válvula gaveta.....	22
Figura 14 – Medidor de vazão	22
Figura 15 – Conjunto de ajuste de Torque.....	23
Figura 16 - Turbina Pelton Vista Explodida	24
Figura 17 – Reservatório para água.....	25
Figura 18 – Bomba acoplada ao reservatório	25
Figura 19 – Diagrama de blocos LABVIEW	26
Figura 20 – Tela do Software de Aquisição (Sinótico).....	27
Figura 21 – Tela de ensaio.....	27
Figura 22 – Tela de configurações.....	28
Figura 23 – Limites operacionais da turbina Pelton	30
Figura 24 - Vazão x Rendimento	31
Figura 25 - Vazão x Potência Hidráulica.	33
Figura 26 - Vazão x Potência Mecânica.	34
Figura 27 - Rotação x Rendimento.....	35
Figura 28 - Vazão x Rotação	36
Figura 29 - Rendimento x Vazão Ideal	37
Figura 30 - Rendimento x Rotação Ideal	38

LISTA DE SÍMBOLOS

d – Densidade

m – Massa

v – Volume

Q – Vazão

t – Tempo

P_{Hidr} – Potência hidráulica

H_{pa} – Altura de queda na entrada

P_{Mec} – Potência mecânica

T – Torque

ω – Velocidade angular

η – Rendimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	11
3 TURBINAS HIDRÁULICAS	12
3.1 Turbina Pelton	15
4 METODOLOGIA.....	19
4.1 Bancada experimental (instrumentação).....	20
4.1.1 Painel elétrico	20
4.1.2 Medidores de vazão	21
4.1.3 Medidores de torque e velocidade	22
4.1.4 Turbina Pelton da bancada.....	24
4.1.5 Bomba e reservatório	25
4.2 Sistemas de aquisição de dados (LabVIEW).....	25
4.3 Procedimento experimental	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 Definição dos limites operacionais	29
5.2 Curvas de operação e rendimentos	31
5.3 Condição de operação ideal	37
6 CONCLUSÕES.....	39
REFERÊNCIAS	40

APÊNDICE A – TABELA COM OS DADOS COLETADOS DURANTE EXPERIMENTAÇÃO.....	43
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

Máquina de fluido é um dispositivo que promove a conversão de energia de um fluido em trabalho mecânico, ou transforma energia mecânica em energia de fluido (HENN, 2006). Os primeiros dispositivos que utilizaram tal forma de energia, possivelmente, foram as rodas d'água verticais (Figura 1), que a partir da água de um córrego, tem suas pás movimentadas, verticalmente, produzindo assim uma força motriz em seu eixo central. Essa energia produzida pelo eixo já foi utilizada para moer grãos, fornecer água potável e irrigar lavouras (WEG, 2021).

Figura 1 – Roda d'água vertical.



Fonte: MuseuWeg, (2023).

A geração de energia elétrica através do uso de turbinas hidráulicas oferece inúmeras vantagens. Além de possibilitar a produção de energia limpa e renovável, as turbinas hidráulicas são responsáveis por converter energia hidráulica em trabalho mecânico, que posteriormente é transformado em energia elétrica por meio de um gerador. Tal processo é utilizado em hidroelétricas para a geração de energia a partir da diferença de energia gravitacional gerada pelas quedas de água (PEREIRA, 2019).

As turbinas hidráulicas são classificadas como máquinas de fluxo, assim como os seguintes dispositivos: bombas centrífugas, ventiladores, turbocompressores, turbinas a gás e turbinas a vapor (ARCHIBALD, 1997). Segundo Henn (2006), em tais dispositivos o fluido nunca se encontra confinado, e em sua passagem pela máquina transforma energia através da interação com um elemento rotativo, denominado rotor ou receptor. Além do rotor, toda máquina de fluxo possui uma série de componentes como: carcaça, eixos, mancais e outros. De

um modo geral, os dois elementos essenciais para o funcionamento dessas máquinas são: rotor e sistema diretor.

De acordo com Henn (2006), o rotor desempenha um papel fundamental em máquinas de fluxo, sendo responsável por converter a energia mecânica em energia do fluido ou vice-versa. Normalmente, é composto por uma série de pás rotativas que permitem a circulação do fluido de trabalho. Já o sistema diretor, como descrito por Bran (1969), tem a função de conectar à máquina a tubulação, possuindo assim a função de coletar o fluido e dirigi-lo para um percurso específico, regulando a velocidade de rotação da turbina.

2 CENTRAIS HIDRELÉTRICAS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

As centrais hidrelétricas desempenham um papel crucial na matriz energética brasileira, proporcionando uma fonte de energia limpa e confiável. O Brasil possui algumas das maiores usinas hidrelétricas do mundo, como a de Itaipu, localizada na fronteira com o Paraguai, sobretudo em termos de capacidade instalada e geração de energia. Outras usinas notáveis incluem a de Belo Monte e a de Tucuruí (ESPÍNOLA, 2008).

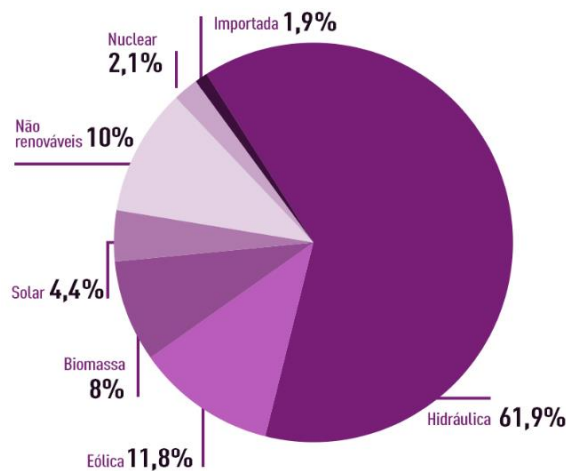
A matriz energética do Brasil sempre esteve ligada à criação de usinas hidrelétricas, devido ao abundante potencial hídrico natural. No entanto, o estímulo para essa abordagem ganhou força após os anos 1960, quando o país buscou acompanhar seu expressivo processo de industrialização e o crescimento demográfico, impulsionado pelo aumento na taxa de urbanização (FONTES, XAVIER E GUIMARÃES, 2016).

As energias renováveis, desempenham um papel fundamental na matriz energética brasileira, representando cerca de 47,4% do total de produção energética do País (PERIUS E CARREGARO, 2012). Vale destacar que a matriz energética engloba todas as fontes de energia utilizadas no país para suprir diversas necessidades, não se limitando apenas à eletricidade. Ela abrange desde fontes como biomassa, eólica, solar e hidrelétrica, até combustíveis fósseis, como petróleo e gás natural, que atendem a residências, veículos, indústrias e outros setores.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2023), a matriz energética brasileira tem nas usinas hidrelétricas a principal fonte de geração de energia elétrica, representando expressivos 61,9% (Figura 2), do total. A abundância de recursos hídricos no país permitiu o desenvolvimento de um extenso sistema de hidrelétricas ao longo de décadas, tornando-as essenciais na produção de eletricidade no Brasil. A capacidade de armazenar água para regular a oferta de energia ao longo do ano, aliada às baixas emissões de carbono, torna as hidrelétricas uma parte fundamental da matriz energética do país.

Essa forma de geração de energia é derivada da captação da energia da água em movimento e das quedas d'água, realizada em usinas hidrelétricas. Essa técnica pode ser aplicada em uma ampla variedade de escalas, desde pequenas centrais hidrelétricas distribuídas por todo o Brasil até gigantes como a Usina de Itaipu (no Paraná), Belo Monte (no Pará), Jirau e Santo Antônio (em Rondônia), São Luiz do Tapajós e Tucuruí (no Pará).

Figura 2 – Matriz elétrica brasileira.



Fonte: (Ministério de Minas e Energia, 2023).

3 TURBINAS HIDRÁULICAS

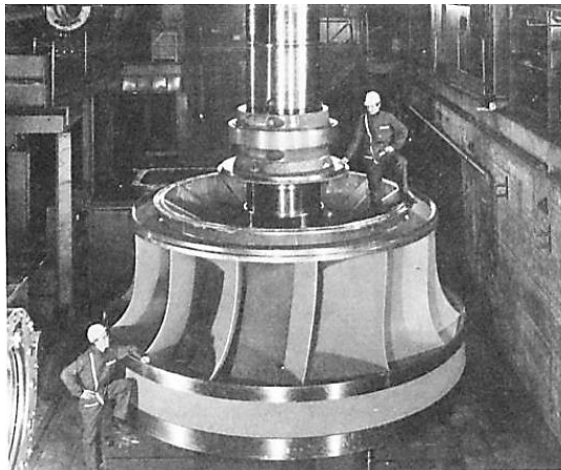
As turbinas têm sua principal função relacionada a utilização da força da natureza para reduzir o trabalho manual, em tempos mais antigos, a utilização da água para acionar dispositivos mecânicos era utilizada na lavoura para moer grãos, fazer farinha e ainda fornecer água potável (WEG, 2021).

Segundo Ost e Kraulich (2013), as principais turbinas hidráulicas são: Francis, Kaplan, Dériaz, Hélice e Pelton. A seleção do tipo de turbina é variável de acordo com a aplicação, visto que cada tipo é adequado para operar em uma faixa específica de vazão e altura de queda.

A turbina Francis pode ser classificada como centrífuga ou semi-axial. Na do tipo centrífuga, a água é inserida a alta velocidade, sendo lançada para fora pelas suas pás curvadas. É ideal para elevadas quedas d'águas, enquanto na semi axial tal operação ocorre a uma velocidade intermediária; e é adequada para locais com queda de água moderada.

As turbinas do tipo Francis apresentam um conjunto de pás fixas ou diretrizes (sistema diretor), que conduzem o fluido para as pás móveis ou rotor (Figura 3).

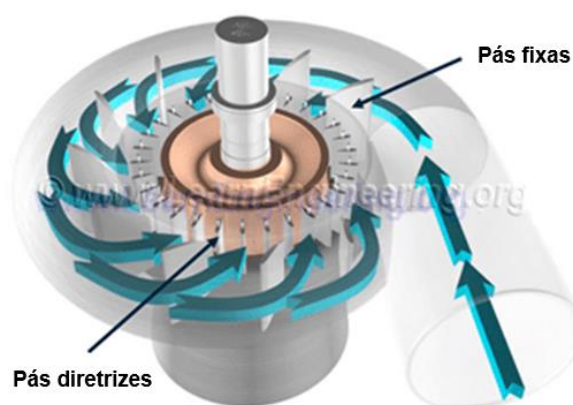
Figura 3 - Rotor da turbina Francis.



Fonte: (MACYNTIRE, 1983).

A água que entra é direcionada através de um tubo em espiral e um conjunto de pás fixas ou diretrizes (Figura 4), que a guiam para atravessar a parede do rotor de forma radial, impulsionando as palhetas desse rotor. Ao passar pelo rotor, a água sai com baixa pressão e velocidade na base. Esse projeto permite a conversão eficiente da energia da água (cinética ou potencial) em energia mecânica para movimentar máquinas ou gerar eletricidade.

Figura 4 - Turbina Francis

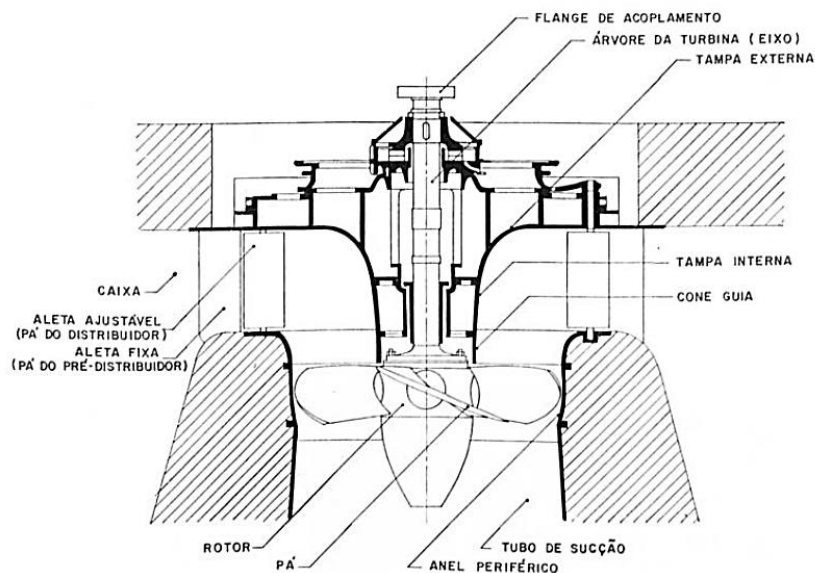


(Theconstructor, 2021)

O conjunto de pás móveis nesse dispositivo, permitem que o seu desempenho seja ajustado para diferentes condições de operação (BERGAMO, 2018).

Segundo Barrena (2010), as turbinas do tipo Kaplan (Figura 5), são do tipo ação total e usadas em pequenas quedas d'água, operando com grandes vazões.

Figura 5 – Vista lateral turbina Kaplan.

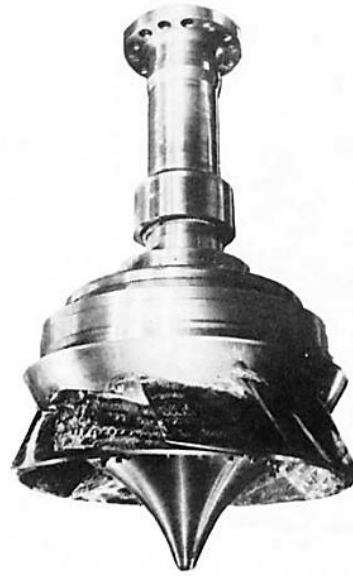


Fonte: (MACYNTIRE, 1983).

Apresentam pás ajustáveis, o que permite que o seu desempenho seja otimizado para diferentes condições de operação, tornando-a uma opção com alta eficiência energética em relação a outras turbinas hidráulicas.

Como descrito por Júnior (2014), a turbina Dériaz (Figura 6) se assemelha ao tipo Kaplan e à Francis rápida, no entanto suas pás fixadas no rotor possuem articulação, podendo variar o ângulo de inclinação das hélices, obtendo assim um maior desempenho, de acordo com as condições especificadas do fluxo de água.

Figura 6 – Rotor da turbina Dériaz.



Fonte: (MACYNTIRE, 1983).

Seu design de lâmina especial é notável, sendo projetado para otimizar a eficiência na conversão de energia hidráulica em energia mecânica. Esse projeto permite que a água flua suavemente através da turbina, resultando em uma alta eficiência na geração de eletricidade. Além disso, as turbinas Dériaz apresentam uma configuração de rotação vertical, em contraste com as turbinas Francis convencionais de rotação horizontal. Essa orientação vertical é especialmente vantajosa para locais com quedas d'água mais baixas, pois facilita o fluxo suave da água pela turbina (MACYNTIRE, 1983).

Muito similar estruturalmente às turbinas do tipo Francis, são as turbinas do tipo Hélice, possuem a mesma estrutura de distribuição de uma turbina Francis, porém o receptor assume uma forma de hélice de propulsão (MACYNTIRE, 1983). Neste tipo de turbina, o fluido percorre uma trajetória paralela ao eixo do rotor e, simultaneamente, experimenta uma alteração de pressão ao passar pelos canais do rotor. Essa turbina é categorizada como axial e de reação, foi projetada para se obter velocidade consideráveis, a partir de baixas quedas e grandes descargas (MACYNTIRE, 1983)

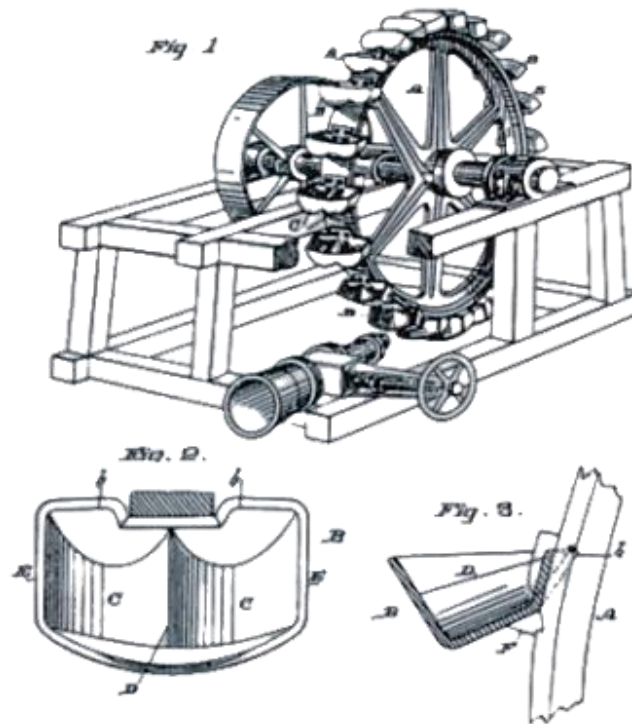
3.1 Turbina Pelton

Por volta do século XIX, surge uma demanda significativa por fonte de energia alternativas para impulsionar máquinas e moinhos, essenciais a expansão das operações de mineração de ouro. As rodas d'água tradicionais apresentam desempenho otimizado para rios

de grande porte, não são eficientes em riachos e quedas d'água de montanha, caracterizado por um fluxo de água mais rápido, e um volume reduzido (PERRIG, 2007).

Em 1879, Lester Pelton desenvolve o primeiro desenho de turbina com concha dupla (Figura 7). Esse desenho já eliminava parte da perda de energia do seu modelo antecessor de roda d'água, já que diminuía a quantidade de água que se acumulava no centro da pá esférica.

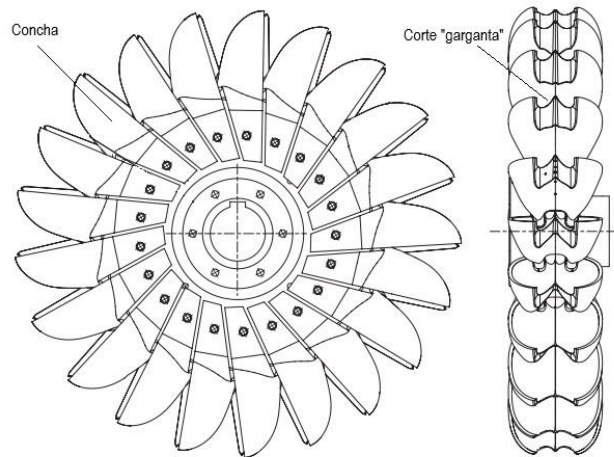
Figura 7 – Turbina Pelton desenho inicial.



Fonte: (PERRIG adaptado, 2007).

Posteriormente o modelo de turbina Pelton foi aperfeiçoado por Willian Doble, que melhorou a forma semicilíndrica de concha para uma forma elíptica (Figura 8), introduzindo um recorte a forma anterior fechada da concha, proporcionando ao jato uma entrada melhor na pá da turbina, dando ao formato um corte em forma de “garganta” (PERRIG, 2007).

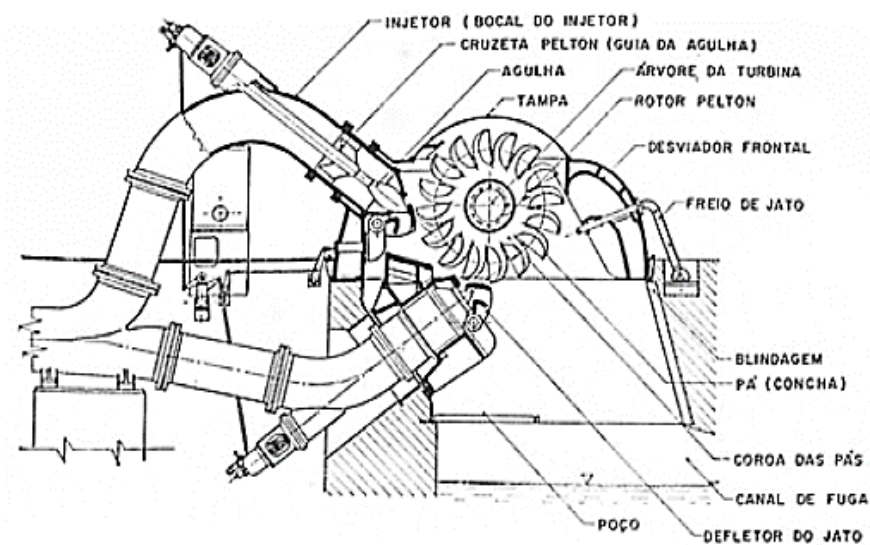
Figura 8 – Desenho moderno turbina Pelton.



Fonte: (PERRIG adaptado, 2007).

As turbinas Pelton são turbinas de ação parcial compostas por um rotor com pás em forma de colher, conhecidas como "conchas", que são presas a árvore da turbina. O rotor é posicionado de forma que as pás fiquem alinhadas ao bocal injetor, que direciona a água em alta velocidade para as conchas do rotor. A água atinge as pás do rotor em um ângulo específico, conhecido como "ângulo de entrada", que é calculado com base na velocidade da água e no diâmetro das conchas. A variação da velocidade do fluido em contato com as pás fornece o impulso necessário para gerar o torque na turbina (ALOMAR, 2022).

Figura 9 – Turbina Pelton Horizontal.



Fonte: (MACYNTIRE, 1983).

Esse torque criado é transmitido para um gerador elétrico, onde é convertido em eletricidade. A turbina Pelton é particularmente eficiente em locais onde há uma fonte de água com alta pressão e baixo fluxo, como em montanhas e áreas com quedas d'água. É capaz de converter até 90% da energia cinética da água em energia mecânica, tornando-a uma das turbinas hidráulicas disponíveis mais eficientes (MACYNTIRE, 1983).

As turbinas Pelton são uma escolha adequada para locais com quedas de água elevadas e vazões reduzidas, pois a captação da água é feita em altitudes onde o curso d'água é de pequeno deflúvio. Essas turbinas são relativamente fáceis de fabricar, instalar e regular, o que as torna uma opção atraente tanto para usinas de grande porte quanto para micro usinas.

Alomar et al. (2022), examinou o efeito da variação de condições de operação de uma turbina Pelton, observando quais características são responsáveis por um maior desempenho. Os parâmetros variados foram: diâmetro de bico, vazão e altura de pressão. O resultado mostrou que o menor diâmetro e a maior vazão caracterizaram a maior potência gerada pela turbina.

Júnior e Branco (2016), realizaram o levantamento de curvas de desempenho de um modelo de turbina Pelton instalada em uma bancada experimental, para determinar as condições para o melhor rendimento e potência produzida por essa turbina. A instrumentação dessa bancada contou com tacômetro instalado no eixo da turbina e o princípio de freio de Prony a partir de uma célula de carga. Os resultados para uma rotação de 700 rpm e 13,5 m de altura de queda obtiveram a maior eficiência.

O estudo proposto por Qasim e Qwaid (2017), utilizou um sistema de controle hidrelétrico inteligente através da placa Arduino Uno R3. Basicamente o dispositivo controlou a taxa de vazão de água em relação a carga aplicada no eixo da turbina Pelton na faixa ideal de velocidade. O resultado obtido mostrou que o uso do sistema de controle inteligente fornece maior estabilidade à operação da turbina Pelton em uma ampla faixa de vazão, fazendo com que a turbina funcione com alta eficiência. Verificou-se um aumento de aproximadamente 35% da eficiência utilizando o controle através do Arduino.

A qualidade do jato injetado a partir de um bocal de turbina Pelton foi tema do estudo proposto por Jung et al. (2019). Segundo os autores, que utilizaram da experimentação e simulação numérica, o grau de excentricidade da agulha é responsável pela difusão do jato, sendo que quanto maior a excentricidade, maior é a difusão do jato. Pontuaram ainda a necessidade de se reproduzir mais experimentos sobre o assunto, em diferentes condições.

O projeto proposto por Juárez *et al* (2023), consistiu na avaliação paramétrica de uma turbina Pelton para a microgeração hidrelétrica em zonas urbanas, através da captação da água da chuva. Houve a necessidade, conforme afirma o autor, de se modelar previamente diferentes

modelos. Através do CFD (*Computational Fluid Dynamics, na língua inglesa*) foi possível a realização de simulações e a determinação de diferentes configurações de fabricação. A configuração hidráulica mais eficiente consistiu em fluxo descendente com dois bocais operando na mesma altura, de 6 metros. O sistema foi testado com dois valores de carga hidráulica, dos quais foi observada eficiência de até 81,13 %. O resultado mostra que a micro hidrelétrica está sendo capaz de fornecer energia suficiente para uma lâmpada LED de 100 W por até 1515 minutos por mês.

Segundo Stamatelos, Anagnostopoulos e Papantonis (2011), foi desenvolvida uma pesquisa que focou na medição de desempenho de uma turbina Pelton. Os parâmetros considerados pelos autores foram: vazão, curvas características do injetor, torque e velocidade de rotação do rotor. O modelo de turbina Pelton utilizado possui dois bicos injetores. Utilizando diferentes configurações dos seguintes parâmetros, vazão, rotação do rotor, torque e quantidade de injetores, foram calculadas a eficiência e potência. Os autores avaliaram toda faixa de operação da turbina, e consideraram os resultados satisfatórios, visto que a eficiência máxima obtida foi de cerca de 86%, para uma faixa de potência de 80 kW, resultados condizentes com a literatura.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma turbina Pelton instalada em uma bancada didática experimental com instrumentação e sistemas de aquisição de dados próprios, para diferentes condições de operação (vazão, torque e grau de abertura do sistema diretor). A variação das condições mencionadas, possibilitará analisar a influência dos parâmetros hidráulicos e mecânicos sob o rendimento da máquina motriz, buscando, assim, a configuração que propicie a condição de operação ideal, isto é, aquela na qual o desempenho máximo é obtido.

4 METODOLOGIA

Nesta seção, serão apresentadas a metodologia e o procedimento experimental. Conforme já mencionado, os ensaios serão realizados em uma bancada de escala laboratorial desenvolvida pela empresa LABTRIX com vistas à obtenção das condições de operação que propiciem a maior eficiência. Mais detalhes acerca da bancada e instrumentação associada, assim como a sequência de execução experimental serão descritos nas seções seguintes.

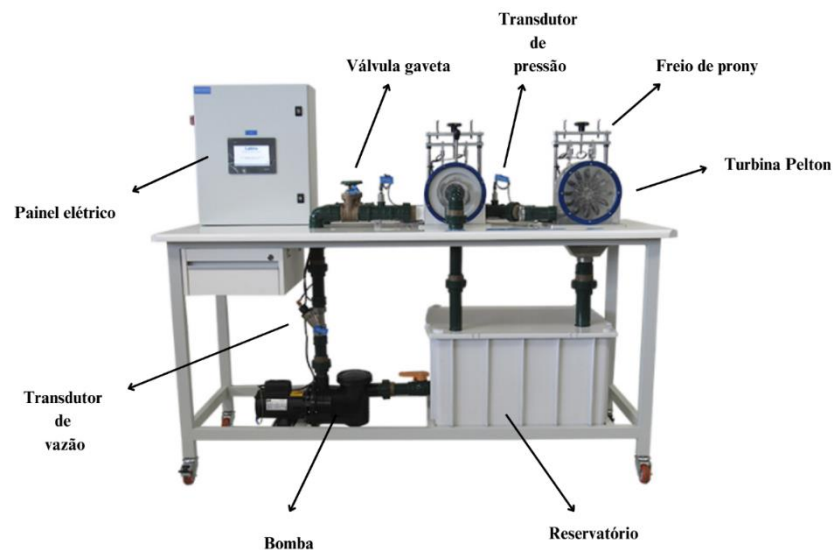
4.1 Bancada Experimental

A Figura 10 apresenta em detalhes a bancada onde serão realizados os ensaios experimentais. Válvulas, transdutores de pressão e células de carga possibilitam a obtenção de grandezas necessárias para o cálculo dos parâmetros que serão analisados, isto é, torque, potência e eficiência.

A aquisição das grandezas é feita por meio de sensores eletrônicos, que enviam seus sinais para um controlador lógico programável. Este, por sua vez, registra esses sinais e os exibe em uma Interface Homem Máquina (IHM) localizada no painel elétrico da bancada. (Mais detalhes na seção 4.1.1).

Além disso, uma bomba radial, alimentada por um reservatório de água acoplado a bancada, fornece a energia necessária para o escoamento de água através da mesma.

Figura 10 – Bancada de Turbinas Pelton e Francis Labtrix.



Fonte: Autoral (2023).

4.1.1 Painel Elétrico

No painel elétrico estão instalados todos os dispositivos de seccionamento e proteção dos equipamentos. Segundo Franchi (2019), o Controlador Lógico Programável (CLP) é um equipamento eletrônico utilizado na automação industrial para controlar e monitorar máquinas. Todas as operações da bancada são realizadas pela IHM por intermédio do controlador lógico programável Schneider Electric® com CPU TM200CE24T e cartão analógico TM3AI4.

O painel disponível com a bancada (Figuras 11 e 12), conecta o software LABTRIX para realizar o monitoramento e processo de aquisição de dados das turbinas, através de transdutores, sendo o CLP é responsável por armazenar esses dados, garantindo que parâmetros sejam utilizados para gerar gráficos e curvas.

Figura 11 – Vista externa do painel.



Fonte: Labtrix (2018).

Figura 12 – Vista interna do painel.



Fonte: Labtrix (2018).

4.1.2 Medidores de Vazão

A densidade (d) é uma propriedade física de uma substância que descreve a quantidade de massa (m) contida em um determinado volume (v), sua unidade é expressa geralmente em (g/cm^3) ou (kg/m^3) (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

A vazão volumétrica (Q) é uma medida da taxa de transferência de volume, isto é, a quantidade de volume que passa por uma área em um determinado intervalo de tempo, ou seja, razão do volume (v) por unidade de tempo (t). As unidades mais comuns são: metros cúbicos por segundo (m^3/s) ou litros por minuto (L/min) (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

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

O ajuste da quantidade vazão da bancada é realizado por válvulas do tipo gaveta (Figura 13), e o medidor de vazão utilizado é um transdutor IFM modelo SBY457 (Figura 14).

Figura 13 – Válvula gaveta.



Fonte: Autoral (2023).

Figura 14 – Medidor de vazão.



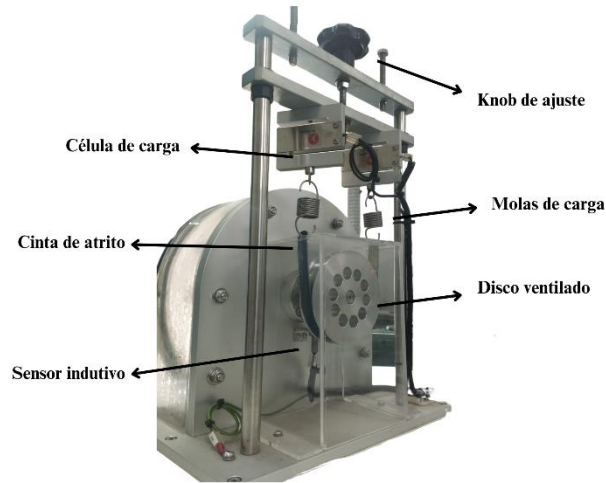
Fonte: Autoral (2023).

4.1.3 Medidores de Torque e Velocidade

O torque é determinado pela magnitude da força aplicada e pela distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo de rotação. Quanto maior a força aplicada e a distância perpendicular ao eixo, maior será o torque produzido. Sua unidade no Sistema Internacional (SI), é de newton metro (N.m), (HIBELLER, 2015).

Para a medida de velocidade é instalado um freio de Prony, Pereira (1999) explica que o freio de Prony é um dos mais antigos mecanismos utilizados para medir o torque de um motor. Consiste basicamente em dois blocos de um material pressionado contra um eixo giratório, que é rotacionado pelo motor. A força de fricção em suas extremidades reduz a velocidade de rotação. Através da força de fricção e da velocidade de rotação é calculado o torque no motor.

Figura 15 – Conjunto de ajuste de torque.



Fonte: Autoral (2023).

No equipamento em questão (Figura 15), duas células de carga são utilizadas para medida da força exigida pelo freio. Através do manipululo, na porção superior ao equipamento é realizado o ajuste de carga mecânica, que através do CLP, é calculado o torque exigido da turbina pelo freio. Para medida de velocidade na turbina, é instalado um sensor indutivo e o sinal é enviado ao CLP que exibe a velocidade em *rpm* na IHM.

A velocidade é um dos parâmetros que, junto ao torque, é utilizada para o cálculo da potência mecânica da turbina, e consequentemente do rendimento. A potência hidráulica (P_{Hidr}), é obtida pelo produto da vazão (Q) e da altura de queda na entrada (H_{pa}), como na Equação (3).

$$P_{Hidr} = H_{pa} \cdot Q \quad (3)$$

Já a potência mecânica é obtida pelo produto do torque pela velocidade, Equação (4):

$$P_{Mec} = T \cdot \omega \quad (4)$$

Em que a velocidade angular é dada em $\omega(\frac{rad}{s})$ o torque em $T(Nm)$ e a P_{Mec} é obtida em Watts.

Para o rendimento na turbina, em porcentagem:

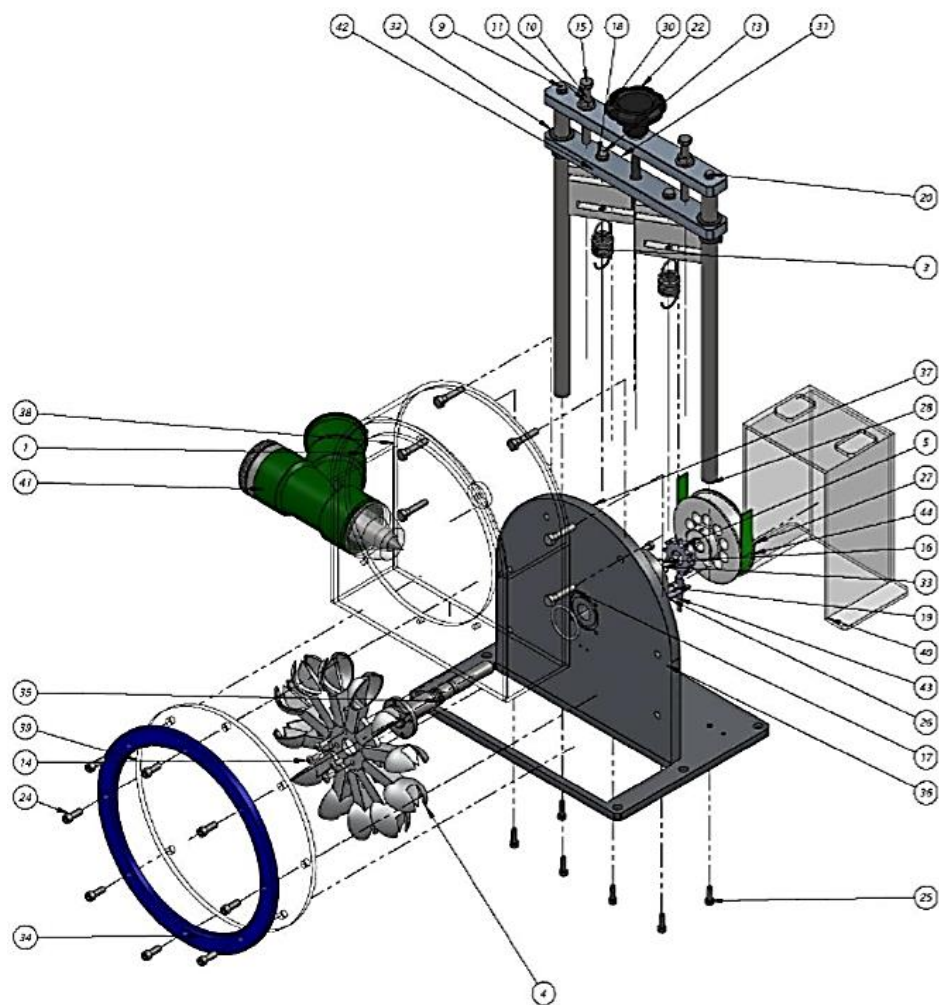
$$\eta = \frac{P_{Mec}}{P_{Hidr}} \cdot 100\% \quad (5)$$

O rendimento η é adimensional.

4.1.4 Turbina Pelton da Bancada

A turbina da bancada utilizada (Figura 16) tem seu principal componente, rotor, correspondente ao elemento 4. O rotor é projetado para capturar a energia cinética do jato de água, que é direcionado para as pás por meio do bico injetor. A intensidade do jato faz o rotor girar, quanto maior a vazão, maior o valor da potência hidráulica, que em modelos reais é convertido em energia mecânica rotacional.

Figura 16 - Turbina Pelton Vista Explodida.



Fonte: adaptado de Labtrix (2018)

O sistema injetor (Figura 16, número 41) de uma turbina Pelton tem a função de direcionar e acelerar a água em alta pressão, criando um jato que atinge as pás do rotor. O bico

injetor controla a quantidade de água que passa, ajustando o fluxo conforme a necessidade de energia. Esse controle é feito por uma agulha móvel, que pode se mover para frente ou para trás.

Para a posição 0, a agulha possui maior avanço, ou seja, a seção de escoamento do fluido é a menor possível. Para posições superiores (1,2 e 3) há um recuo gradativo da agulha e, conseqüentemente, um aumento gradativo da referida seção, sendo a posição 3 aquela que, obviamente, permite uma maior vazão.

4.1.5 Bomba e reservatório

A bomba utilizada (Figura 18) para fornecimento de água a bancada é do tipo centrífuga, produzida pela Dancor, modelo PF-17. É equipada com um rotor em Noryl, material que consiste em uma resina de éter de polifenileno, que apresenta alta resistência a deformação e a mudança de temperaturas.

Possui potência nominal de 1,0 CV e conta com um filtro na sucção. Para o suprimento contínuo de água, utiliza-se um reservatório (Figura 17) construído em material polimérico com capacidade para 140 l.

Figura 17 – Reservatório para água.



Fonte: Autoral (2023).

Figura 18 – Bomba d'água



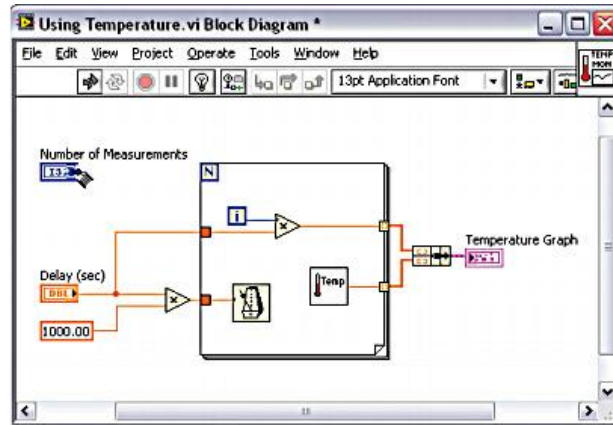
Fonte: Autoral (2023).

4.2 Sistema de aquisição de dados LabVIEW

Para a aquisição e análise dos dados, será utilizado o LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench na língua inglesa*), um software criado pela empresa National Instruments, que possibilita a análise de dados e o processamento de sinais de forma mais eficiente, facilitando a interação virtual de hardwares.

A plataforma utiliza a linguagem G (programação gráfica), que oferece ao usuário a capacidade de implementar diversas estruturas no diagrama de blocos. Com mais de 3000 funções e ferramentas disponíveis, essa linguagem torna a programação mais visual, facilitando a montagem e o entendimento dos sistemas (FONTES, 2018).

Figura 19 – Diagrama de blocos (LABVIEW).

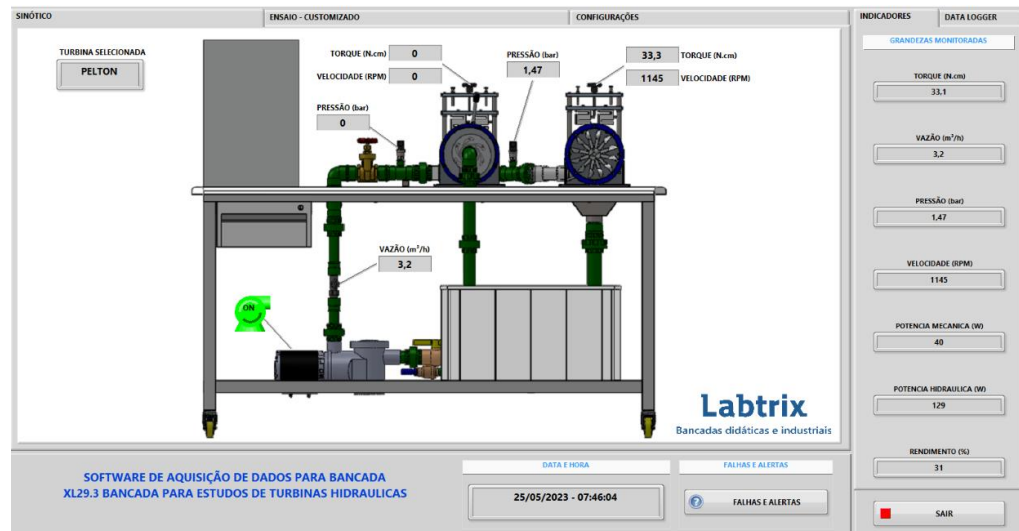


Fonte: LabVIEW

Os programas gerados pelo LabVIEW são chamados de VI (*Virtual Instrument na língua inglesa*), uma vez que os ícones virtuais são muito parecidos com os instrumentos físicos. O seu uso consiste em construir os códigos a serem utilizados a partir de um diagrama de blocos (Figura 19), selecionando os objetos a serem utilizados e conectando-os como entrada e saída para realizar as funções desejadas (AMBITIOUSLY, 2023).

A bancada disponibiliza o software “XL29.3 BANCADA PARA ESTUDOS DE TURBINAS HIDRAULICAS.exe”, que permite ao usuário o controle e monitoramento da bancada utilizando um computador conectado a mesma. O software disponibiliza três telas, a saber: sinótico, ensaio-customizado e configurações.

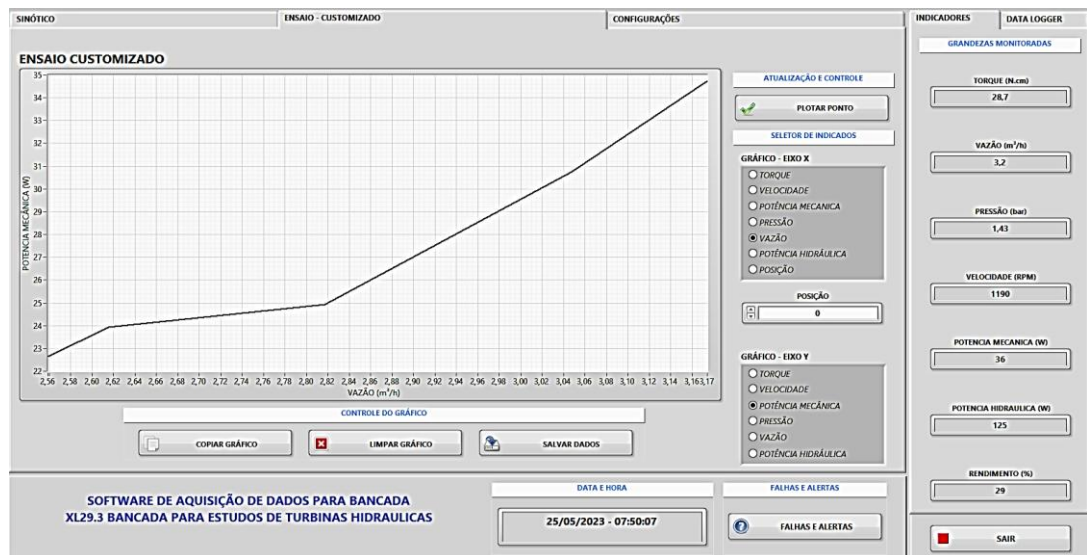
Figura 20 – Tela do Software de Aquisição (Sinótico).



Fonte: Autoral (2023).

A tela sinótica (Figura 20), apresenta o modelo da turbina, os parâmetros medidos, além do *status* da bomba. A indicação de falhas/alertas na operação também é disponibilizada.

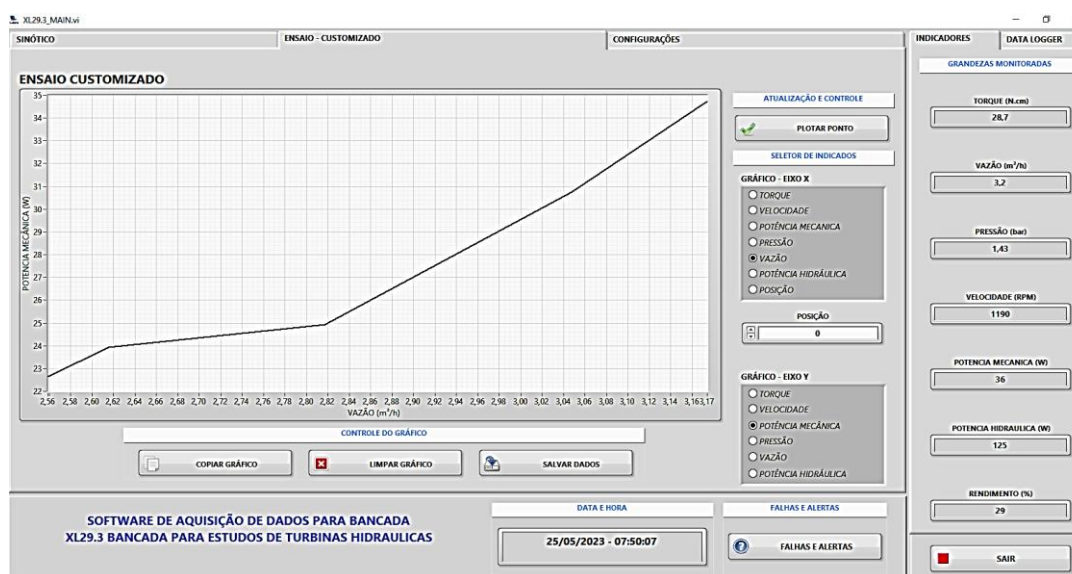
Figura 21 – Tela do Software de Aquisição (Ensaio Customizado).



Fonte: Autoral (2023).

Na tela de ensaios, o software disponibiliza uma tela (Figura 21), que permite ao usuário configurar o gráfico de interesse com as variáveis disponíveis como torque, velocidade, potência mecânica, pressão, vazão, potência hidráulica e posição da agulha injetora.

Figura 22 – Tela do Software de Aquisição (Configurações).



Fonte: Autoral (2023).

Já a tela de configurações é destinada a definição dos diretórios para salvar os arquivos gerados pelo software (Figura 22). Periodicamente, o programa salva essas informações de forma automática assim que alguma alteração é realizada.

4.3 Procedimento Experimental

Com a instrumentação e o sistema de aquisição de dados LABVIEW (Figura 19) apresentados nas seções anteriores foi possível obter os parâmetros de forma direta através dos ensaios, e feita a gravação do experimento assim como as grandezas calculadas utilizando o programa: “XL29.3 BANCADA PARA ESTUDOS DE TURBINAS HIDRAULICAS.exe”.

Os parâmetros operacionais são: vazão (abertura da válvula gaveta fixa), torque (varia-se o manípulo das células de carga) e grau de abertura do sistema diretor (varia-se a posição da agulha de injeção).

A sequência de execução experimental consistiu na variação alternada de um parâmetro operacional, enquanto os demais permaneceram fixos. Para a coleta de dados, inicialmente foi ligada a bomba do sistema e manipulada a válvula gaveta para que a vazão inicial se mantivesse em $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$. O grau de abertura do sistema diretor foi fixado na “posição 0”, não sendo aplicada carga ao eixo, fazendo assim com que o torque se mantivesse nulo.

A partir dessa configuração, lentamente, foi rotacionado o knob de ajuste para se aumentar o torque, reduzindo a movimentação do rotor na medida em que se aumentava o valor

do torque. Definiu-se que o valor limite do torque, seria aquele no qual o rotor, nas condições já mencionadas, visualmente apresentasse parada total. Posteriormente, o valor do torque obtido no momento da parada, é dividido em intervalos iguais, totalizando cinco medidas. De posse desses valores de torque, e sob as condições de vazão e grau de abertura já citadas, o ensaio ocorreu em um intervalo de um minuto, sendo a aquisição de dados obtida utilizando-se o software acima mencionado.

Após as cinco medidas de torque, foi ainda realizada uma adicional para verificar o valor exato (através dos arquivos obtidos) em que o rotor do sistema sofreu uma parada total devido a carga elevada sobre o eixo do rotor, totalizando assim seis valores de torque diferentes. O mesmo procedimento acima se repetiu para a “posição 1”, “posição 2” e “posição 3”, obtendo-se, desta forma, medidas para todas as configurações experimentais para a vazão de 1,0 m³/h.

Procedeu-se da mesma forma com incrementos de 0,5 m³/h, alcançando-se a vazão máxima de 4,0 m³/h. Após tal vazão, o aumento máximo permitido pelo sistema, foi de, aproximadamente, 0,2 m³/h, sendo 4,2 m³/h o valor máximo alcançado.

A variação dos parâmetros mencionados possibilitou a obtenção das grandezas necessárias, isto é; vazão, pressão, velocidade, potência mecânica, potência hidráulica e rendimento.

Em cada sequência os dados foram gerados, adquiridos e armazenados para posterior análise e geração das curvas de operação e rendimento. Tais dados são apresentados em forma de Tabelas disponibilizadas no Apêndice. Ressalta-se que as grandezas citadas no parágrafo anterior foram todas obtidas pelo programa, e os valores da tabela são as médias para cada parâmetro desses.

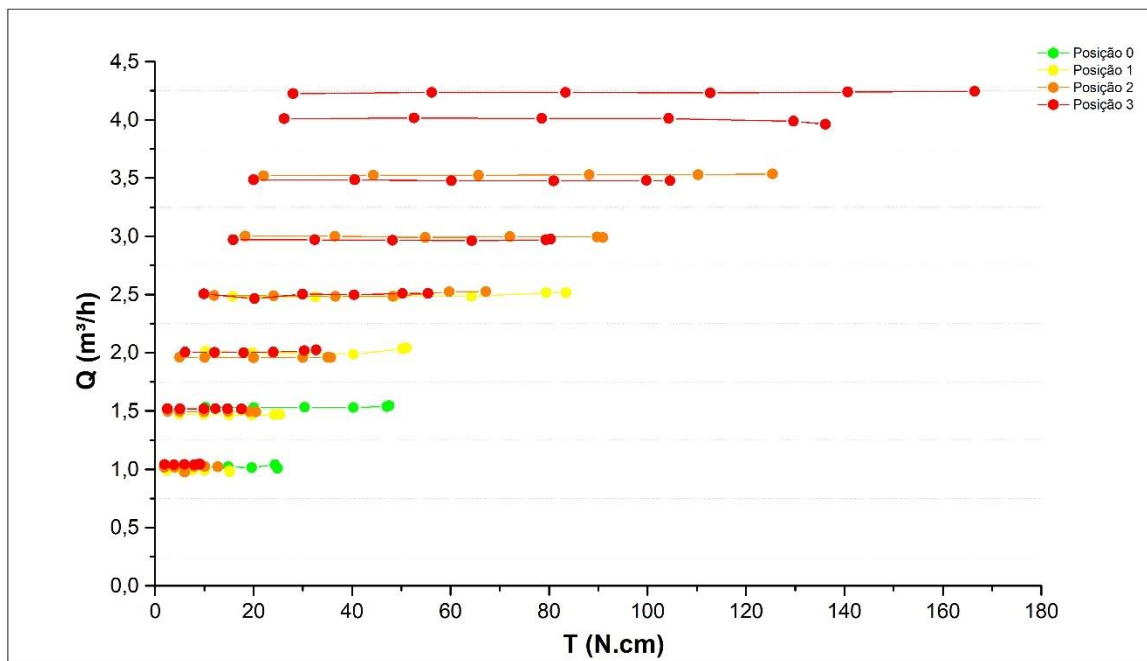
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados, seguidos de uma análise e discussão sobre os mesmos, levando em consideração hipóteses formuladas e comparação com estudos anteriores. Os dados coletados foram analisados de acordo com os critérios estabelecidos na metodologia, e os resultados, para melhor compreensão, foram divididos em subseções para melhor detalhamento.

5.1 Definição dos limites operacionais.

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios, seguidos de uma análise detalhada e discussão sobre os mesmos. Os dados coletados foram analisados afim de se obter os limites operacionais de acordo com os critérios estabelecidos na metodologia. São apresentados em forma gráfica, através do *software OriginLab*, para que sejam evidenciados os pontos relativos aos limites operacionais da turbina, ou seja, valores de mínimo e máximo operacional.

Figura 23 – Limites operacionais da turbina Pelton.



Fonte: Autoral (2024).

Para elaboração do gráfico (Figura 23), foi calculada a média de vazão e torque para cada uma das medidas e organizado esses dados em forma de tabela. Os valores máximos foram obtidos para a seguinte configuração experimental: vazão $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$, grau de abertura do sistema diretor posição 3 e torque $166,45 \text{ N.cm}$ (Figura 23). Para os valores mínimos, temos: vazão $1,02 \text{ m}^3/\text{h}$, grau de abertura do sistema diretor na posição 2 e torque $1,91 \text{ N.cm}$, (Figura 23).

Nota-se que para maiores valores de vazão, foi plotado um número de pontos menor. Durante as experimentações, percebeu-se que com o aumento gradativo da vazão, para as posições 0, posição 1 e posição 2, o limite máximo de vazão alcançado para cada posição foi sempre menor que sua posição posterior, sendo esses valores máximos, respectivamente; $1,55 \text{ m}^3/\text{h}$, $2,52 \text{ m}^3/\text{h}$ e $3,53 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para a posição 0, a agulha do sistema está com a configuração mais próxima para restringir o fluxo da água. Conforme já mencionado, à medida em que se aumenta a posição, a

agulha do sistema recua, permitindo assim um fluxo de água maior, e, consequentemente, maior vazão ao sistema.

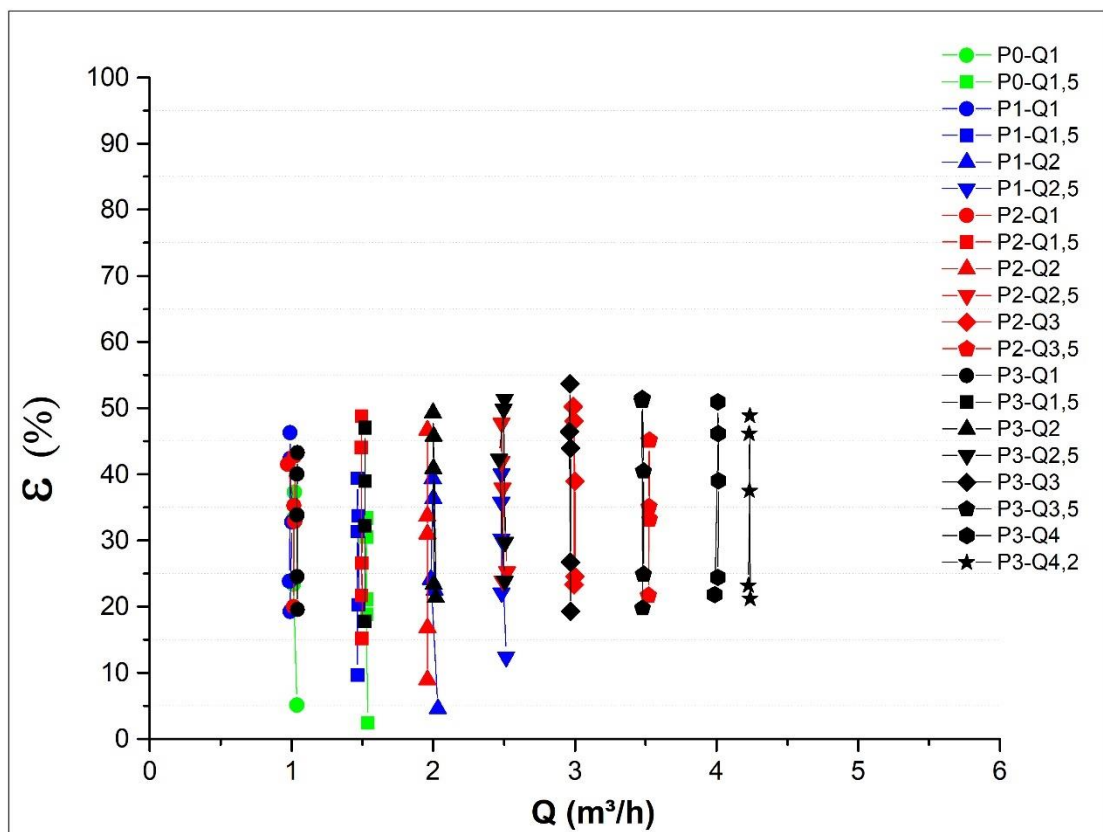
Sendo assim, a posição 3, foi a única que possibilitou a aquisição de dados para todo o intervalo analisado, ou seja, de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ até $4,3 \text{ m}^3/\text{h}$.

5.2 Curvas de operação e rendimentos

De posse dos dados, os resultados foram estruturados em forma de Tabela (no apêndice) e plotados através do *software OriginLab*. Foram fixados dois parâmetros experimentais enquanto um foi alterado, através dessas combinações obteve-se uma variação de vazão, grau de abertura e torque.

Conforme discutido anteriormente, o valor de torque utilizado foi sempre a média do valor de torque obtido para um intervalo de um minuto (1 minuto). Nas seções seguintes desconsiderou-se a sexta medida de torque para cada configuração de vazão e posição, já que essa foi realizada apenas para se obter o valor máximo obtido, vale ressaltar que para tal valor, praticamente, não houve rotação do rotor da turbina.

Figura 24 - Vazão x Rendimento.



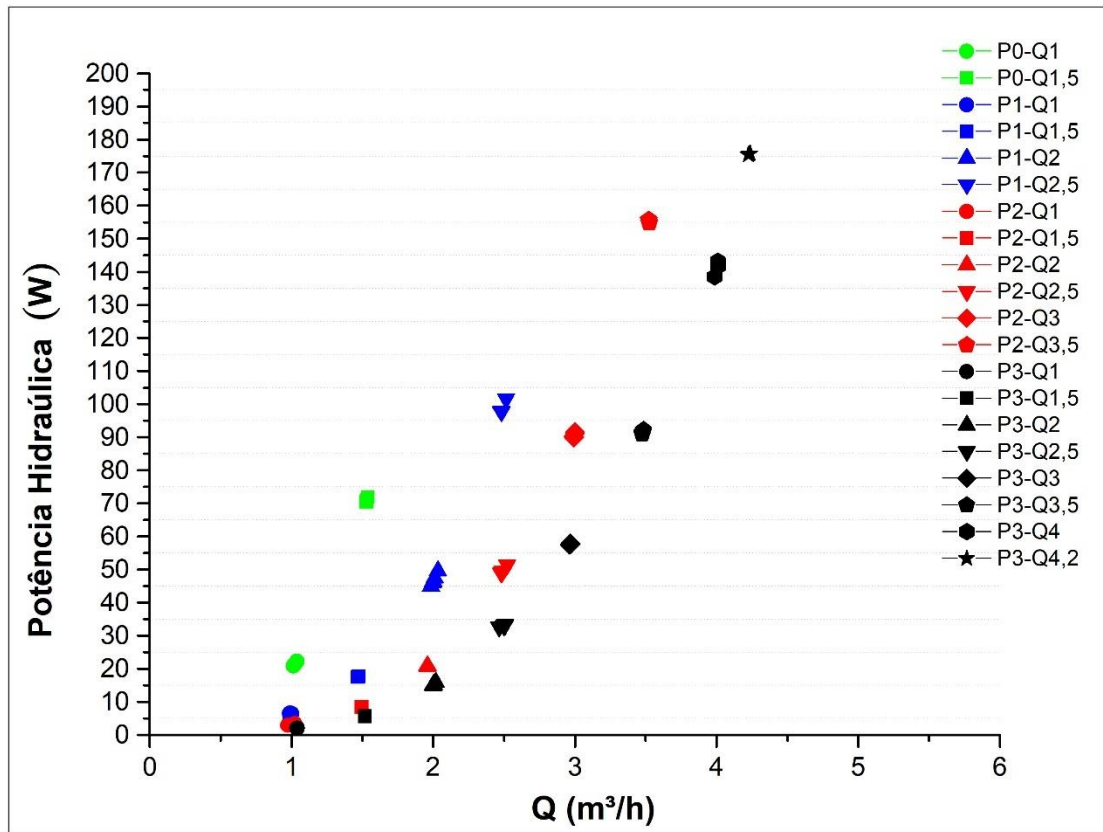
Fonte: Autoral (2024).

A Figura 24 mostra que, de um modo geral, com o aumento da posição da agulha e da vazão, há uma tendência de maiores rendimentos. O maior valor obtido foi para **P3-Q3** (posição 3 da agulha e vazão $3 \text{ m}^3/\text{h}$), sendo o valor da vazão nesse ponto de $2,96 \text{ m}^3/\text{h}$ e rendimento de 53,7%.

Observa-se um padrão de aumento de rendimento de **Q1** ($1,0 \text{ m}^3/\text{h}$) até **Q3** ($3,0 \text{ m}^3/\text{h}$). Para a vazão de **Q3,5** ($3,5 \text{ m}^3/\text{h}$) houve uma queda nos valores do rendimento, enquanto os valores de **Q4** ($4,0 \text{ m}^3/\text{h}$) e **Q4,2** ($4,2 \text{ m}^3/\text{h}$) se mantiveram próximo a **Q3**. Como mostrado na Equação (5), o rendimento é o quociente da potência mecânica pela potência hidráulica, sendo a potência hidráulica, Equação (4 3), obtida pelo produto da altura de queda e vazão. Enquanto que a potência mecânica, Equação (5), pelo produto do torque pela velocidade de rotação. Apesar do aumento de vazão verificado, o que gera um valor de potência hidráulica maior, a elevação do rendimento se justifica, também, pelo aumento do valor de potência mecânica, que sofreu um acréscimo no intervalo mencionado (Tabela 1 a Tabela 4 do apêndice), devido, principalmente, ao aumento do torque.

Observou-se que durante o experimento, houve uma dificuldade de se manter o valor do torque próximo ao esperado com o aumento da vazão. Para valores maiores da vazão, muitas vezes foi preciso manipular levemente a rotação da válvula gaveta (mantendo no painel a mesma vazão) para que o torque fosse alcançado. Isso pode ter ocasionado uma diferença nas medições, já que pela lógica, os valores de rendimento de **Q3,5** deveriam se aproximar mais dos valores de **Q3**.

Figura 25 - Vazão x Potência Hidráulica.

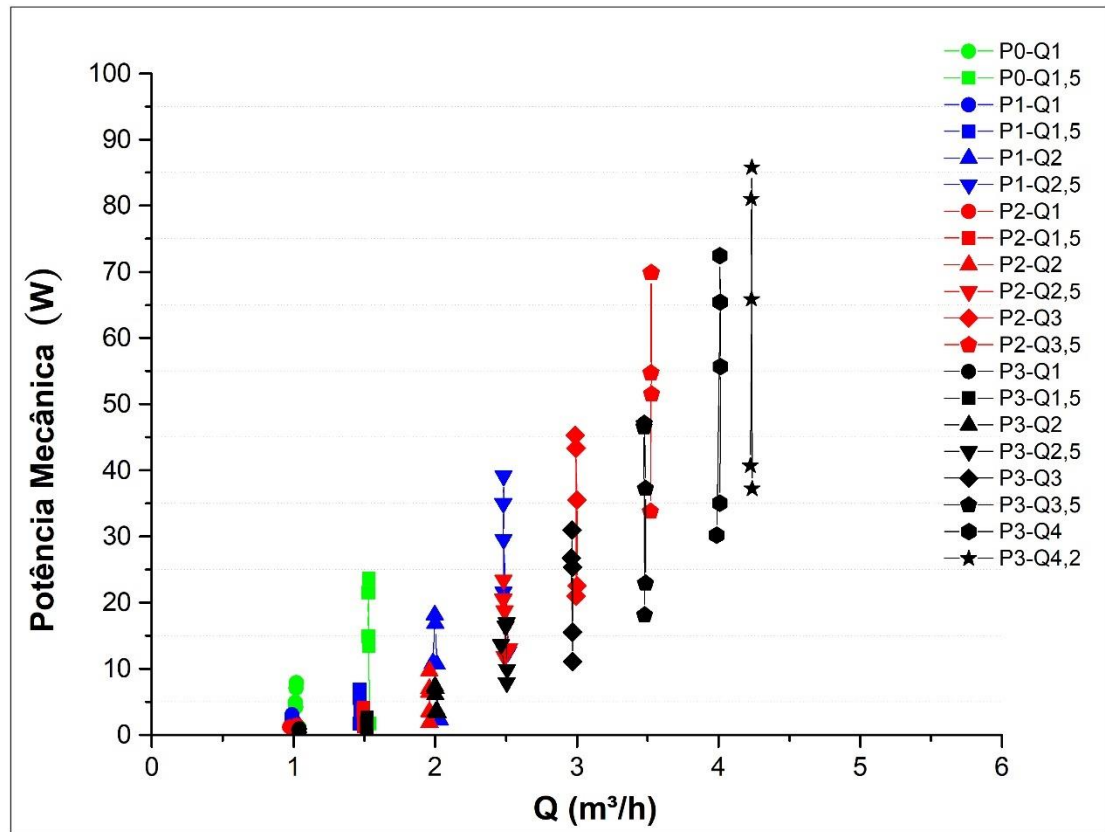


Fonte: Autoral (2024).

Para potência hidráulica (Figura 25), como na fórmula anteriormente mencionada (equação 3), a grandeza é obtida pelo produto da altura de queda e vazão. Como a altura de queda se manteve constante, somente a vazão exerceu influência no desempenho. Para qualquer curva analisada na Figura 25, os pontos se encontram muito próximos entre si.

Apesar das curvas serem construídas para valores distintos de torque (cinco medidas), (conforme apêndice), a altura se mantém constante durante toda experimentação, a influência sofrida é da vazão que se mantém próxima ao valor constante. Houve poucas oscilações durante o processo experimental, fazendo assim com que os pontos de qualquer uma das curvas tenham um curto distanciamento entre si. O comportamento crescente da curva ao longo do aumento de vazão foi como o esperado Equação (3), o valor máximo atingido foi para a vazão $4,24 \text{ m}^3/\text{h}$ e potência hidráulica $175,82 \text{ W}$.

Figura 26 - Vazão x Potência Mecânica.



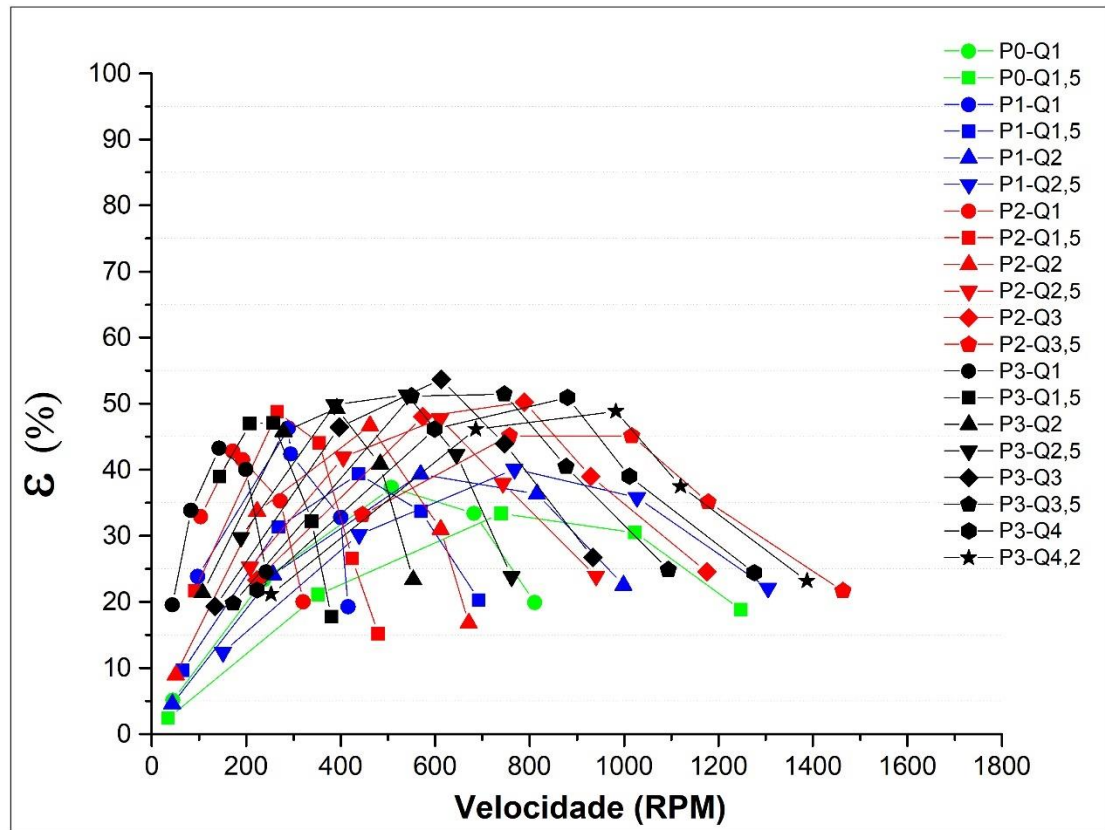
Fonte: Autoral (2024).

Para a obtenção da potência mecânica (Figura 26), foi utilizada a Equação (4), que relaciona o produto do torque pela velocidade angular. Observou-se que para valores maiores de vazão, foram obtidos maiores valores de potência mecânica. Isso ocorre devido ao aumento da vazão, pois a pressão na saída do bico injetor é maior (conforme Tabelas apresentadas no apêndice), gerando assim maior rotação do rotor (velocidade angular), permitindo assim com que o sistema possa sofrer uma carga maior aplicada pelo freio de Prony, sem sofrer parada. Desta forma, são alcançados maiores valores de torque, para maiores valores de vazão. O valor máximo obtido foi para uma vazão de $4,24 \text{ m}^3/\text{h}$, em que foi encontrada a potência mecânica de: $85,78 \text{ W}$.

Observou-se no gráfico que, na maioria dos casos, para uma mesma vazão as posições menores da agulha geram maior valor de potência mecânica. Isso se dá pelo fato de que a velocidade nesse ponto possui um valor maior, no entanto, para vazão superior a $2 \text{ m}^3/\text{h}$, já se percebe que em alguns pontos o valor de potência atingido é maior para uma posição da agulha superior, isso ocorre pois com o aumento da vazão, um intervalo maior de torque é alcançado,

e para esses valores, embora a velocidade seja menor, o valor do torque é suficiente para que que em determinado ponto a potência seja maior.

Figura 27 - Rotação x Rendimento.



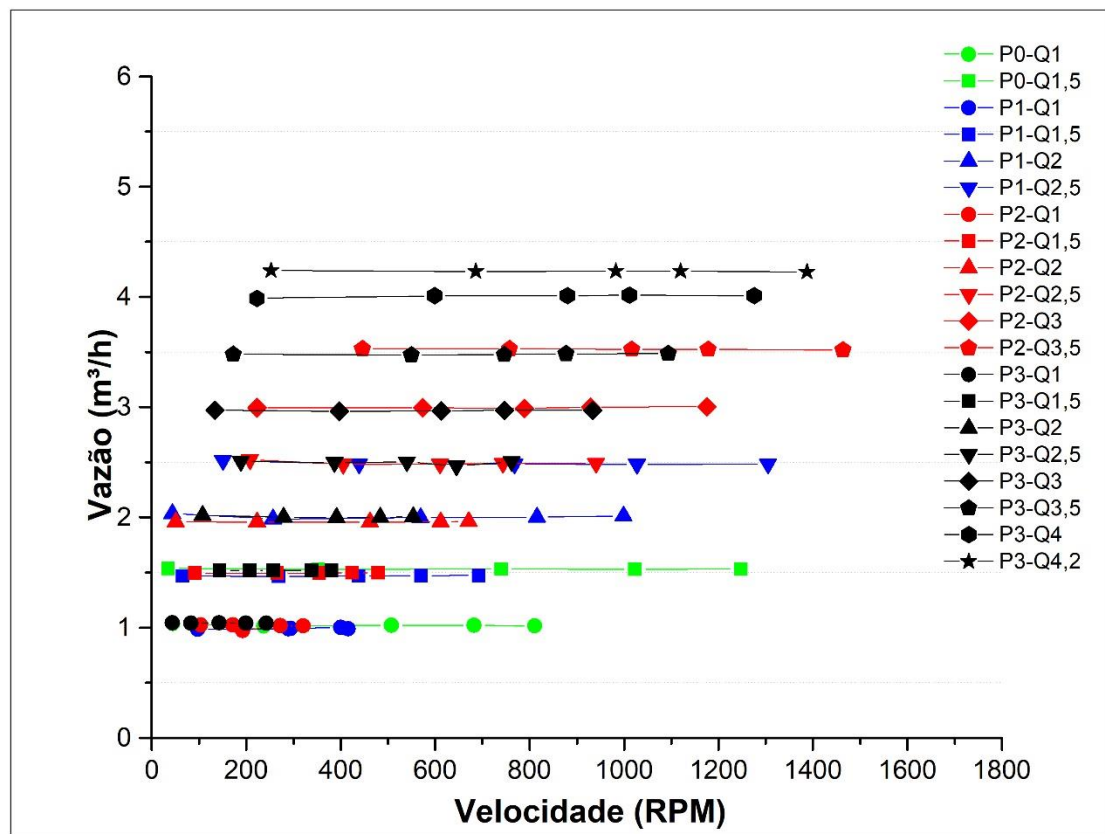
Fonte: Autoral (2024).

A Figura 27 apresenta a variação do rendimento em função da velocidade de rotação. O ponto de máximo rendimento obtido ficou para 613,02 RPM e rendimento de 53,7%. De um modo geral, para os pontos que se encontram em uma faixa de 0 a 400 RPM, foram obtidos valores de rendimento crescentes, sendo que os maiores valores de rendimento obtidos foram na faixa de 400 a 1000 RPM, e para velocidades acima desse intervalo, houve um decréscimo no rendimento.

Para justificar o padrão, é utilizada por exemplo a curva **P0-Q1,5**. Para o primeiro ponto dessa curva, se obtém o menor valor da velocidade, 35,0 RPM (segundo Tabela 1), e o maior valor de torque, 47,07 *N.cm* (Tabela 1). Para o segundo e terceiro ponto o rendimento é crescente, sendo o terceiro ponto um ponto ótimo de operação, no qual a curva atinge seu valor máximo de rendimento, a partir desse, a curva começa a decrescer, obtendo menores valores de rendimento para o quarto e quinto ponto.

Apesar da velocidade ser maior nesses dois últimos pontos, o valor do torque foi reduzido (conforme verificado nas tabelas), gerando assim uma potência mecânica (Equação 4), menor, consequentemente do rendimento. Outra justificativa para esse decréscimo, é que em altas rotações, o movimento das pás pode criar turbulência e maior arrasto no fluxo da água, fazendo assim com que parte da energia seja dissipada, diminuindo assim a eficiência do sistema.

Figura 28 - Vazão x Rotação.



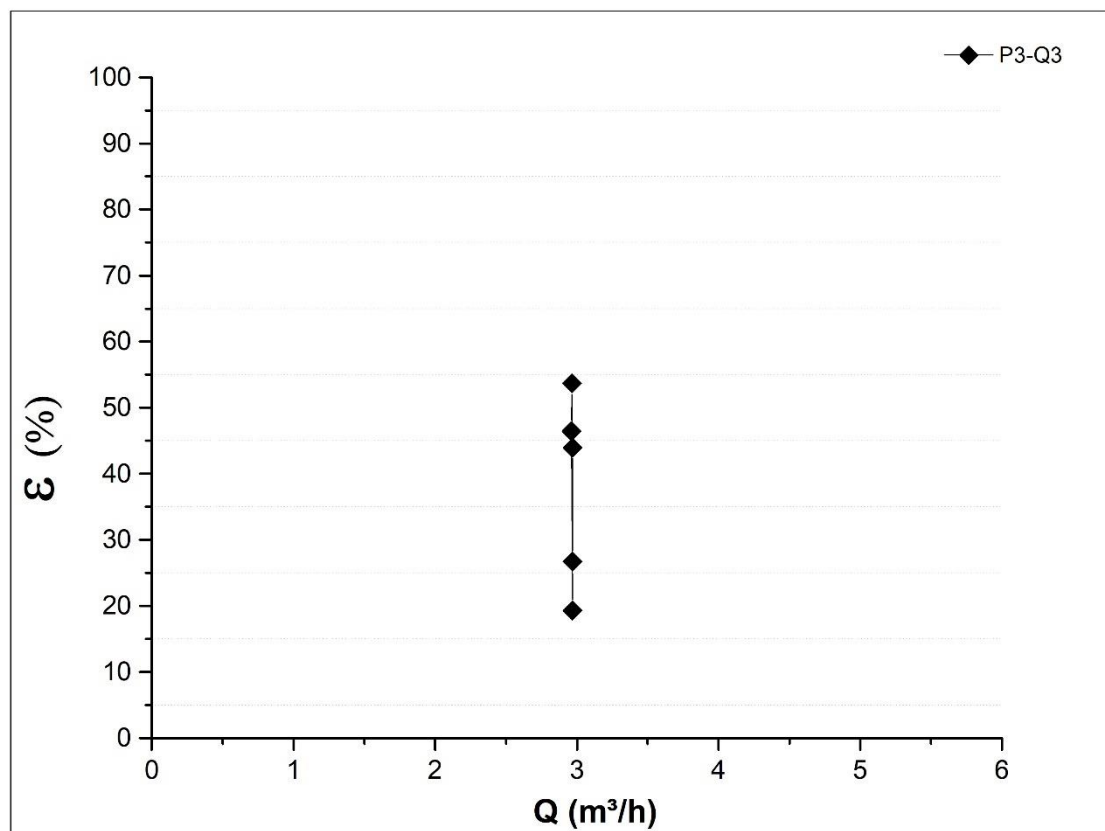
Fonte: Autoral (2024).

Relacionando a vazão pela velocidade (Figura 28), obtemos um padrão, que segundo Henn (2006), para um mesmo grau de abertura, as curvas são aproximadamente paralelas ao eixo da abscissa, isso ocorre devido a seção de passagem do fluxo da água no sistema injetor e velocidade da água se manterem constante, independente da rotação da turbina. Esse padrão é obtido para as turbinas de ação.

5.3 Condição de operação ideal

Como apresentado anteriormente, a partir dos dados obtidos experimentalmente, variando vazão, grau de abertura e torque, foi possível gerar diferentes gráficos para representar potências e rendimento. A presente seção apresenta os valores dos parâmetros obtidos que propiciam a condição de operação ideal, ou seja, aquela na qual se obtém o máximo rendimento. Tais condições já foram mencionadas nas seções anteriores de maneira indireta, sendo aqui enfatizadas para melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

Figura 29 – Rendimento x Vazão Ideal.



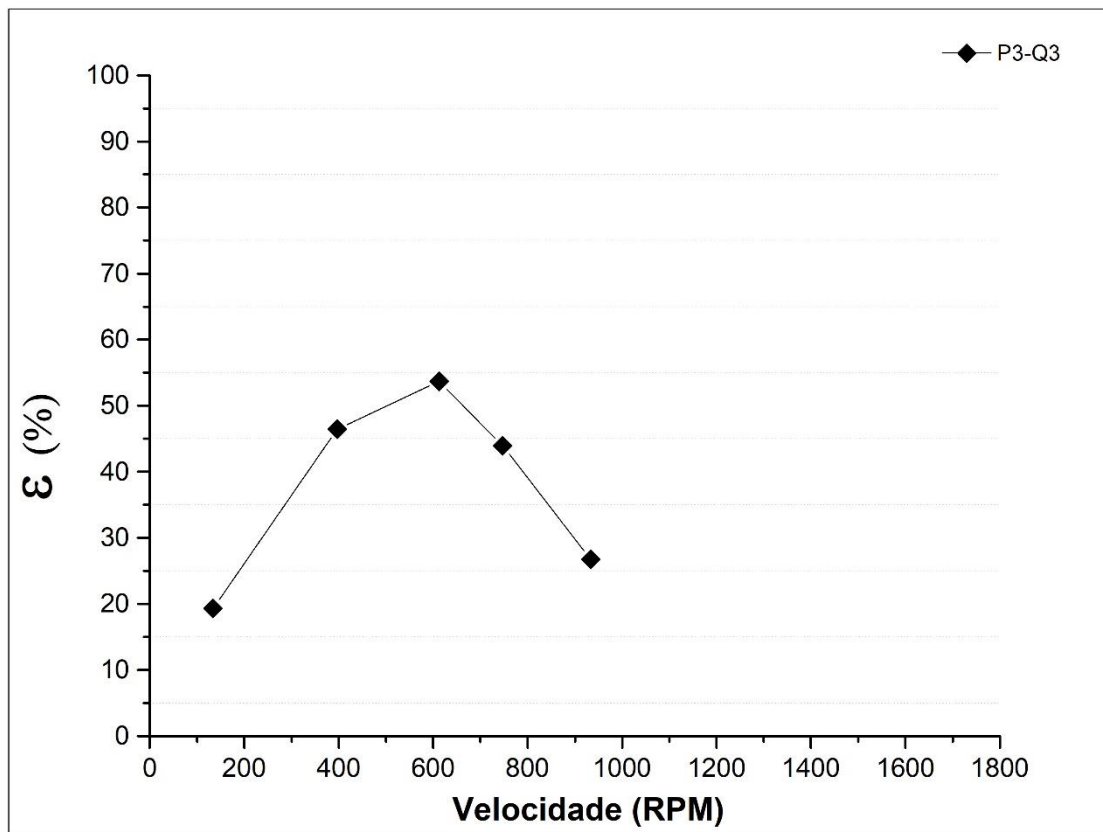
Fonte: Autoral (2024).

A Figura 29 exibe a curva do rendimento em função da vazão para **P3-Q3**, condição na qual se alcançou a máxima eficiência. O máximo valor do rendimento, 53,7%, foi alcançado

para a configuração experimental representada por **P3-Q3** (posição 3 da agulha e vazão $3 \text{ m}^3/\text{h}$). Em tal condição a torque medido é de $48,21 \text{ N.cm}$.

A Figura 30, que apresenta a variação da eficiência em função da velocidade de rotação, mostra que o valor deste parâmetro para configuração mencionada é de 613,02 rpm e rendimento de 53,67 %.

Figura 30 - Rendimento x Rotação Ideal.



Fonte: Autoral (2024).

Na maioria dos casos, percebeu-se que os resultados obtidos apresentaram o comportamento esperado. Foi possível a detecção dos limites operacionais da bancada experimental, assim como a condição ótima de operação e ainda padrões de comportamento que condizem com aqueles apresentados pela literatura.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo compreender e analisar o desempenho de uma turbina Pelton instalada em uma bancada experimental. Com base nos resultados obtidos através de ensaios, foi possível observar que a turbina Pelton, amplamente utilizada em sistemas de geração de energia hidrelétrica, se destaca pela eficiência em converter a energia cinética da água em energia mecânica.

Os experimentos realizados permitiram verificar na prática os princípios teóricos envolvidos, como a interação entre os jatos de água e as conchas da turbina, o efeito do freio de prony, que através da correia gerou carga sobre o eixo do rotor. Não obstante, foi possível compreender a influência de variáveis como vazão, pressão e velocidade de rotação, que estão diretamente ligadas ao desempenho do sistema.

Para os limites operacionais da turbina, o maior valor foi obtido para a configuração de vazão $4,25 \text{ m}^3/\text{h}$ e torque $166,45 \text{ N.cm}$.

Para as curvas operacionais, a curva de potência mecânica apresentou uma tendência de crescimento, estando de acordo com a literatura. O máximo valor da potência, $85,78 \text{ W}$, foi obtido para a vazão de $4,24 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para a curva operacional de potência hidráulica, o padrão de crescimento foi condizente com o esperado, visto que o aumento da vazão garante maior valor da grandeza. O valor máximo obtido foi $175,83 \text{ W}$ para vazão $4,24 \text{ m}^3/\text{h}$.

A curva de rendimento apresentou um padrão de crescimento ascendente ao longo do aumento de vazão, até a curva **P3-Q3**, na qual obteve-se o ponto de rendimento máximo atingido de $53,7\%$ para uma vazão de $2,96 \text{ m}^3/\text{h}$. Após esse valor as curvas foram descendentes. Esse padrão condiz com a literatura, visto que para todo projeto há um ponto de operação ótima.

Constatou-se que a condição ideal de operação é obtida para P3-Q3, curva essa que apresenta o melhor valor operacional, gerando assim maior rendimento operacional.

Portanto, conclui-se que o trabalho contribuiu para consolidar os conhecimentos sobre turbinas Pelton, reforçando sua relevância para projetos de geração de energia hidrelétrica e suas diferentes possíveis configurações de operação para a geração sustentável de energia.

Para trabalhos futuros sugere-se que seja utilizado um modelo real de turbina Pelton para comparação de rendimento, e considerar plotar diagrama topográfico da bancada Pelton.

REFERÊNCIAS

- ALOMAR, O. R. et al. **Performance analysis of Pelton turbine under different operating conditions: An experimental study**. Ain Shams Engineering Journal, Mosul, Iraq, 2022.
- AMBITIOUSLY, E. **National Instruments Corp.** Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html/>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- ARCHIBALD, J. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2. ed., rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997.
- BARRENA, V. B. V. **Análise e dimensionamento de uma turbina hidráulica, por redes neurais para uma minicentral**. Universidade Nacional de Engenharia, Lima, Peru, 2010.
- BERGAMO, P. R. **Especificações de turbinas hidráulicas**. 2018. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, 2018.
- BRAN, R.; SOUZA, Z. **Máquinas de fluxo, turbinas bombas e ventiladores**. Rio de Janeiro, 1969.
- ESPÍNOLA, M. O. G. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da energia vertida turbinável da Usina Hidrelétrica de Itaipu para a síntese de amônia**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2008.
- FONTES, A. **Veja como o LabVIEW atua no processamento de dados captados por sensores**. Publicado em 30 ago. 2018. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/labview/>. Acesso em: 13 jun. 2023.
- FONTES, G. A.; XAVIER, Y. M. A.; GUIMARÃES, P. B. **Princípio fundamental ao meio ambiente: Pequenas Centrais Hidrelétricas na matriz energética brasileira**. 2016.
- FRANCHI, C. M. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2019.
- HENN, É. A. L. **Máquinas de fluido**. 2. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2006.
- HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.
- JUNG, I. H.; KIM, Y. S.; SHIN, D. H.; CHUNG, J. T.; SHIN, Y. **Influence of spear needle eccentricity on jet quality in micro Pelton turbine for power generation**. Energy, [S.l.], v. 175, p. 58-65, May 2019.

JÚNIOR, C. G.; BRANCO, F. P. **Instrumentação de uma bancada com turbina Pelton para medição de potência**. XXIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Teresina, Piauí, 2016.

JÚNIOR, O. B. **Um estudo de turbinas hidráulicas: uma evolução tecnológica**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Campina Grande, Paraíba, 2014.

JUÁREZ, M. A.; ORTIZ, C. R.; COBIAN, V. H.; REBOLLAR, B. M.; ALARCON, I.; PULIDO, D. **Parametric assessment of a Pelton turbine within a rainwater harvesting system for micro hydro-power generation in urban zones**. Energy for Sustainable Development, México, Toluca, 2023.

LABTRIX. **XL29.3 Bancada para estudo turbinas Pelton e Francis**. LABTRIX Indústria de Bancadas Técnicas LTDA. São Paulo, Itatiba, 2018. Disponível em: <https://labtrix.com.br/xl29-3/>. Acesso em: 6 jun. 2023.

MACYNTIRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2024.

OST, A. P.; KRAULICH, C. V. **Dimensionamento e modelagem de um rotor de turbina Pelton para ser aplicado em uma bancada didática**. Horizontina, 2013.

PEREIRA, J. C. **Dinamômetros hidráulicos**. 1999. Disponível em: <https://www.joseclaudio.eng.br/energia/dinos1.html>. Acesso em: 18 jun. 2023.

PEREIRA, R. A. et al. **SSA: Turbina de Pelton**. In: **SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 2019, Resende**. Anais [...]. Resende, Rio de Janeiro, 2019.

PERIUS, M. R.; CARREGARO, J. B. **Pequenas centrais hidrelétricas como forma de redução de impactos ambientais e crises energéticas**. Vol. 16, nº 2, 2012.

PERRIG, A. **Hydrodynamics of the free surface flow in Pelton turbine buckets**. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Suíça, 2007.

QASIM, A. M.; QWAID, A. H.; FARAGE, T. Z.; OWALD, A. J.; QASIM, M. A. **The effect of speed smart control system SSCS on the performance of hydropower system**. Engineering and Technology Journal, v. 35, nº 6, p. 602-608, 2017.

FOX R. W.; MCDONALD A. T.; PRITCHARD P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. LTC Editora, 2014.

RECOMPLAST. **Tecnologia e reciclagem: termoplástico de engenharia LDTA.** Disponível em: <https://www.recomplast.com.br/noryl-ppo>. Acesso em: 5 jul. 2023.

STAMATELOS, F. G.; ANAGNOSTOPOULOS, J. S.; PAPANTONIS, D. E. **Performance measurements on a Pelton turbine model.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, [S.l.], v. 225, n. 3, p. 351-358, May 2011.

TUNDISI, J. G. **Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções.** Estudos Avançados, 2008, p. 13.

WEG. **Museu de Ciência e Tecnologia: História da roda d'água e sua importância para nosso desenvolvimento.** MuseuWeg.net, 2021. Disponível em: <https://museuweg.net/blog/historia-da-roda-dagua-e-sua-importancia-para-nosso-desenvolvimento/>. Acesso em: 28 mar. 2023.

APÊNDICE A – TABELA COM OS DADOS COLETADOS DURANTE EXPERIMENTAÇÃO

Tabela 1 – Valores para posição 0

POSIÇÃO 0 - VAZÃO 1,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 5	4,95	1,02	0,76	810,68	4,20	21,10	19,90
TORQUE 10	9,87	1,02	0,76	682,70	7,06	21,13	33,40
TORQUE 15	14,85	1,02	0,76	507,59	7,89	21,17	37,26
TORQUE 20	19,62	1,01	0,75	237,12	4,87	20,81	23,36
TORQUE 25	24,32	1,04	0,79	44,43	1,13	22,29	5,08
TORQUE MÁXIMO	24,87	1,01	0,81	87,14	2,26	22,20	10,14
POSIÇÃO 0 - VAZÃO 1,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 10	10,20	1,53	1,70	1247,54	13,33	70,88	18,81
TORQUE 20	20,06	1,53	1,70	1023,36	21,51	70,52	30,52
TORQUE 30	30,40	1,53	1,69	740,41	23,56	70,61	33,39
TORQUE 40	40,26	1,53	1,70	352,62	14,85	70,51	21,08
TORQUE 50	47,07	1,54	1,72	35,00	1,72	71,85	2,40
TORQUE MÁXIMO	47,50	1,55	1,71	20,00	0,99	72,05	1,38

Fonte: Autoral (2024).

Tabela 2 – Valores para posição 1

POSIÇÃO 1 - VAZÃO 1,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 2,5	2,43	0,99	0,20	415,66	1,06	5,50	19,22
TORQUE T5	4,97	1,00	0,23	399,92	2,08	6,36	32,75
TORQUE 7,5	7,59	0,99	0,20	294,02	2,34	5,52	42,36
TORQUE 10	10,04	0,99	0,24	289,26	3,04	6,57	46,27
TORQUE 15	15,05	0,99	0,24	97,58	1,54	6,44	23,86
TORQUE MÁXIMO	15,12	0,98	0,23	25,00	0,40	6,16	6,48
POSIÇÃO 1 - VAZÃO 1,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 5	4,92	1,47	0,44	692,46	3,57	17,64	20,26
TORQUE 10	9,88	1,47	0,44	570,25	5,90	17,51	33,70
TORQUE 15	15,00	1,47	0,44	438,08	6,89	17,49	39,35
TORQUE 20	19,62	1,47	0,44	268,44	5,52	17,59	31,36
TORQUE 25	24,27	1,47	0,44	65,98	1,68	17,43	9,60
TORQUE MÁXIMO	25,36	1,47	0,44	30,00	0,53	17,42	4,53
POSIÇÃO 1 - VAZÃO 2,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 10	10,23	2,01	0,87	998,81	10,70	47,54	22,51
TORQUE 20	19,71	2,00	0,85	816,00	16,84	46,39	36,34
TORQUE 30	30,44	2,00	0,85	568,93	18,14	46,12	39,32
TORQUE 40	40,28	1,99	0,83	257,13	10,85	44,92	24,13
TORQUE 50	50,21	2,03	0,90	43,13	2,27	49,66	4,57
TORQUE MÁXIMO	51,01	2,04	0,90	25,00	1,34	49,67	2,68
POSIÇÃO 1 - VAZÃO 2,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 16	15,81	2,48	1,45	1304,67	21,60	97,91	22,07
TORQUE 32	32,56	2,48	1,45	1027,21	35,02	97,73	35,81
TORQUE 48	48,65	2,48	1,45	768,31	39,13	97,65	40,09
TORQUE 64	64,25	2,48	1,45	438,41	29,51	97,67	30,20
TORQUE 80	79,42	2,51	1,48	151,05	12,56	101,56	12,37
TORQUE MÁXIMO	83,46	2,52	1,49	115,00	5,24	101,66	9,67

Fonte: Autoral (2024).

Tabela 3 – Valores para posição 2

POSIÇÃO 2 - VAZÃO 1,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 2	1,91	1,02	0,12	320,91	0,64	3,20	19,99
TORQUE 4	3,96	1,02	0,12	272,46	1,13	3,20	35,29
TORQUE 6	5,97	0,97	0,11	192,38	1,20	2,90	41,49
TORQUE 8	7,94	1,02	0,12	172,05	1,43	3,35	42,78
TORQUE 10	10,09	1,02	0,12	103,77	1,10	3,33	32,89
TORQUE MÁXIMO	12,74	1,02	0,12	30,00	0,40	3,30	11,90
POSIÇÃO 2 - VAZÃO 1,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 2,5	2,53	1,50	0,21	479,68	1,27	8,40	15,14
TORQUE 5	5,02	1,50	0,21	424,39	2,23	8,38	26,57
TORQUE 10	9,94	1,49	0,21	354,75	3,69	8,39	44,06
TORQUE 15	14,82	1,50	0,21	265,57	4,12	8,46	48,77
TORQUE 20	19,21	1,49	0,21	91,03	1,82	8,44	21,66
TORQUE MÁXIMO	20,48	1,49	0,21	5,00	0,00	8,40	1,26
POSIÇÃO 2 - VAZÃO 2,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 5	5,00	1,96	0,39	671,33	3,51	20,93	16,81
TORQUE 10	10,06	1,96	0,39	611,97	6,45	20,81	30,97
TORQUE 20	19,99	1,96	0,39	462,38	9,68	20,75	46,66
TORQUE 30	29,98	1,96	0,39	223,20	7,01	20,80	33,70
TORQUE 35	35,06	1,96	0,39	50,98	1,87	20,85	8,97
TORQUE MÁXIMO	35,67	1,96	0,39	35,00	1,31	20,86	6,23
POSIÇÃO 2 - VAZÃO 2,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 12	12,00	2,49	0,73	940,58	11,82	49,48	23,88
TORQUE 24	24,06	2,49	0,73	743,31	18,73	49,37	37,93
TORQUE 36	36,60	2,48	0,73	610,68	23,41	49,01	47,74
TORQUE 48	48,31	2,48	0,72	405,42	20,51	48,94	41,91
TORQUE 60	59,70	2,52	0,75	207,87	13,02	51,44	25,26
TORQUE MÁXIMO	67,17	2,53	0,75	40,00	1,41	51,54	5,43
POSIÇÃO 2 - VAZÃO 3,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 18	18,29	3,00	1,12	1175,81	22,52	91,62	24,57
TORQUE 36	36,50	3,00	1,12	929,26	35,52	91,12	38,96
TORQUE 54	54,84	2,99	1,11	789,19	45,31	90,20	50,24
TORQUE 72	72,07	3,00	1,11	574,14	43,34	90,18	48,04
TORQUE 90	89,77	2,99	1,10	222,97	20,97	89,93	23,30
TORQUE MÁXIMO	90,96	2,99	1,10	165,00	15,72	89,68	17,46
POSIÇÃO 2 - VAZÃO 3,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 22	22,03	3,52	1,63	1463,50	33,76	155,79	21,67
TORQUE 44	44,33	3,52	1,62	1178,44	54,70	155,74	35,13
TORQUE 66	65,64	3,52	1,62	1016,33	69,85	154,91	45,10
TORQUE 88	88,15	3,53	1,61	757,50	69,86	154,91	45,13
TORQUE 110	110,28	3,53	1,61	445,87	51,49	154,97	33,22
TORQUE MÁXIMO	125,37	3,53	1,61	70,00	9,19	154,97	5,89

Fonte: Autoral (2024).

Tabela 4 – Valores para posição 3

POSIÇÃO 3 - VAZÃO 1,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 2,0	1,93	1,04	0,07	242,66	0,49	2,00	24,52
TORQUE 4,0	3,83	1,04	0,07	199,15	0,80	1,99	40,04
TORQUE 6,0	5,94	1,04	0,07	142,95	0,89	2,05	43,26
TORQUE 8,0	7,94	1,04	0,07	83,08	0,69	2,05	33,82
TORQUE 10	8,78	1,04	0,07	43,14	0,40	2,03	19,56
TORQUE MÁXIMO	9,14	1,04	0,07	20,00	0,19	2,03	9,32
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 1,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 2,5	2,49	1,52	0,14	380,24	0,99	5,58	17,73
TORQUE 5,0	5,06	1,52	0,13	338,77	1,80	5,57	32,23
TORQUE 10	9,91	1,52	0,14	257,55	2,67	5,68	47,08
TORQUE 12,5	12,29	1,52	0,14	207,63	2,67	5,71	46,98
TORQUE 15	14,73	1,52	0,14	143,44	2,22	5,68	38,95
TORQUE MÁXIMO	17,53	1,52	0,14	30,00	0,28	5,72	9,50
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 2,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 6,0	6,07	2,00	0,28	553,28	3,52	15,07	23,36
TORQUE 12	12,05	2,00	0,27	483,10	6,10	14,92	40,85
TORQUE 18	17,97	2,00	0,28	391,77	7,37	14,98	49,28
TORQUE 24	23,99	2,00	0,28	279,30	7,02	15,34	45,74
TORQUE 30	30,30	2,02	0,29	107,16	3,39	15,92	21,37
TORQUE MÁXIMO	32,67	2,03	0,29	45,00	1,54	15,84	9,60
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 2,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 10	9,88	2,51	0,49	762,14	7,89	33,13	23,83
TORQUE 20	20,21	2,47	0,49	645,24	13,66	32,62	42,31
TORQUE 30	29,97	2,50	0,48	540,16	16,95	33,03	51,34
TORQUE 40	40,45	2,50	0,48	387,42	16,41	32,94	49,80
TORQUE 50	50,26	2,51	0,49	188,58	9,91	33,38	29,73
TORQUE MÁXIMO	55,45	2,51	0,49	35,00	2,03	33,24	6,29
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 3,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 16	15,84	2,97	0,72	934,06	15,50	57,93	26,74
TORQUE 32	32,40	2,97	0,71	747,15	25,35	57,74	43,91
TORQUE 48	48,21	2,97	0,72	613,02	30,95	57,69	53,67
TORQUE 64	64,29	2,96	0,71	397,08	26,73	57,56	46,44
TORQUE 80	79,34	2,97	0,71	133,75	11,08	57,63	19,27
TORQUE MÁXIMO	80,32	2,98	0,71	10,00	0,84	57,83	1,44
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 3,5							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 20	20,01	3,49	0,97	1093,91	22,92	92,19	24,87
TORQUE 40	40,53	3,49	0,97	877,54	37,24	92,01	40,49
TORQUE 60	60,20	3,48	0,97	746,61	47,08	91,46	51,47
TORQUE 80	80,96	3,47	0,96	549,77	46,58	91,04	51,15
TORQUE 100	99,76	3,48	0,96	172,50	18,14	91,12	19,77
TORQUE MÁXIMO	104,56	3,48	0,96	60,00	6,57	91,23	7,17
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 4,0							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 26	26,21	4,01	1,31	1275,73	35,02	143,20	24,44
TORQUE 52	52,58	4,01	1,31	1011,15	55,68	142,73	39,00
TORQUE 78	78,54	4,01	1,30	880,55	72,41	142,22	50,92
TORQUE 104	104,31	4,01	1,30	599,05	65,43	141,77	46,15
TORQUE 130	129,67	3,99	1,28	222,50	30,19	138,50	21,82
TORQUE MÁXIMO	136,14	3,96	1,28	55,00	9,98	137,40	5,70
POSIÇÃO 3 - VAZÃO 4,2							
	TORQUE (N.cm)	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (bar)	VELOCIDADE (RPM)	POTENCIA MECANICA (W)	POTENCIA HIDRAULICA (W)	RENDIMENTO (%)
TORQUE 28	28,01	4,22	1,53	1387,11	40,68	175,48	23,18
TORQUE 56	56,16	4,23	1,53	1120,25	65,86	175,75	37,49
TORQUE 84	83,35	4,24	1,53	982,67	85,78	175,68	48,83
TORQUE 112	112,78	4,23	1,53	686,13	81,03	175,63	46,13
TORQUE 140	140,68	4,24	1,53	252,74	37,21	175,83	21,17
TORQUE MÁXIMO	166,45	4,25	1,53	110,00	19,17	176,23	10,87

Fonte: Autoral (2024).