

# Relatório Técnico

## Cálculo da Potência Hidráulica das Turbinas Francis e Pelton

### 1. Introdução

Este relatório técnico apresenta os cálculos hidráulicos que embasam a estimativa de potência gerada pelas turbinas do sistema proposto pela Neon. O sistema utiliza um arranjo híbrido com turbinas Francis e Pelton, operando em conjunto, para maximizar a conversão da energia potencial da água em energia elétrica.

Os cálculos foram realizados com base em princípios da mecânica dos fluidos e da hidráulica aplicada, considerando parâmetros técnicos reais, como a altura de queda, a vazão volumétrica, a eficiência das turbinas e os coeficientes de desempenho recomendados pela literatura técnica.

O objetivo deste relatório é demonstrar, de forma transparente e precisa, como a potência hidráulica de cada turbina foi determinada, servindo como base técnica para análise de viabilidade por empresas parceiras, investidores e instituições interessadas no desenvolvimento e implementação deste sistema hidrelétrico sustentável.

## 2. Dados do Sistema

### Constantes e Parâmetros Gerais

- Altura de queda bruta (H): 104,5 m
- Gravidade (g): 9,81 m/s<sup>2</sup>
- Densidade da água ( $\rho$ ): 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Coeficiente de velocidade ( $c_v$ ): 0,98
- Vazão total do sistema (Q): 34,84 m<sup>3</sup>/s

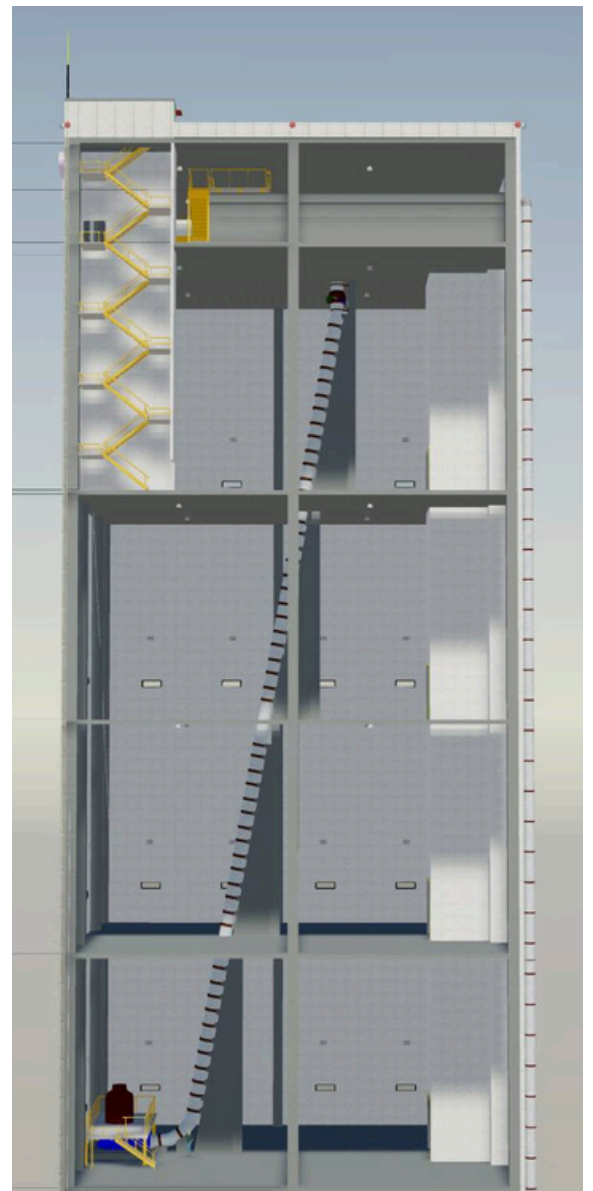
### 2.1. Conduto Forçado 1

O Conduto Forçado 1 é o canal responsável por conduzir a água do reservatório elevado até a turbina Francis. Com diâmetro interno de 2,50 metros, raio de 1,25m e área de seção transversal de 4,909 m<sup>2</sup>.

Diâmetro interno ( $D_1$ ): 2,5m

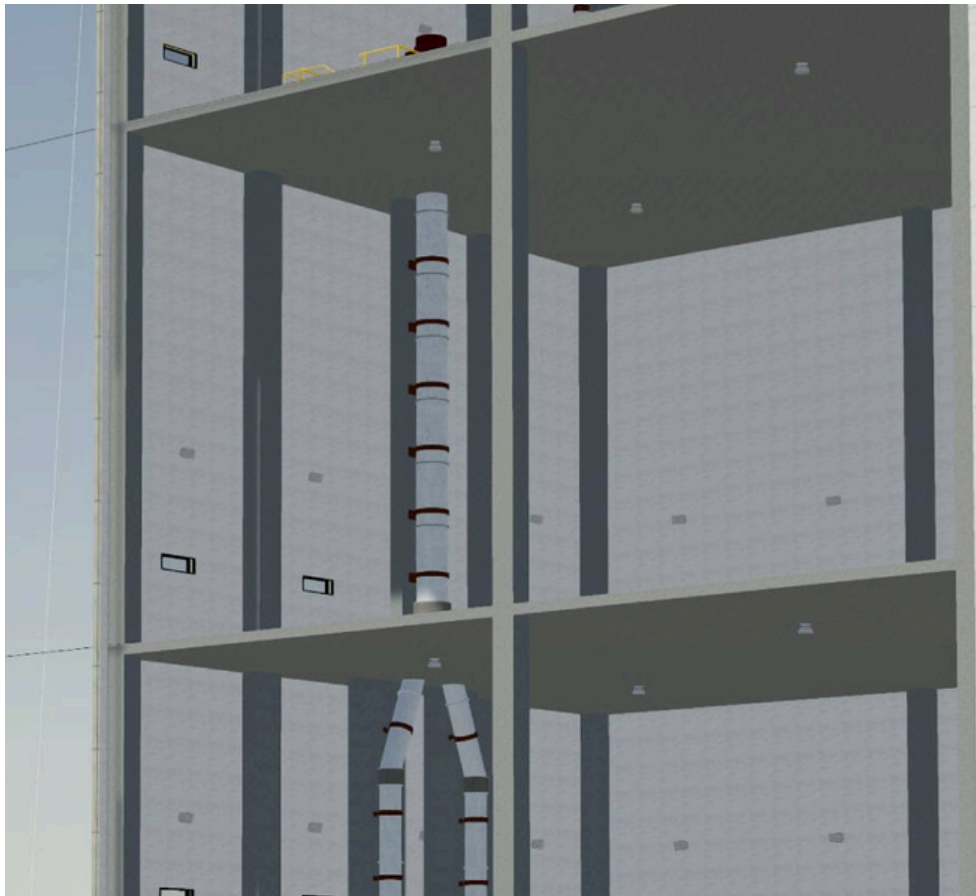
Raio ( $r_1$ ): 1,25 m

Área da seção transversal ( $A_1$ ): 4,909 m<sup>2</sup>



## 2.2. Conduto Forçado 2 (Tubo de Sucção – Saída da Turbina Francis até o Bocal)

O Conduto Forçado 2, também conhecido como tubo de sucção, é o segmento que conecta a saída da turbina Francis aos bocais que alimentam a turbina Pelton. Com diâmetro interno de 2,70m, raio de 1,35m e área de seção transversal de 5,726 m<sup>2</sup>.



Diâmetro interno ( $D_2$ ): 2,70m

Raio ( $r_2$ ): 1,35 m

Área da seção transversal ( $A_2$ ): 5,726m<sup>2</sup>

### 3. Turbina Francis

A Turbina Francis adotada no sistema PMTHPP opera de forma semelhante às turbinas instaladas em usinas hidrelétricas convencionais. Posicionada estrategicamente para aproveitar integralmente a energia gravitacional disponível, ela recebe a água diretamente do reservatório superior, utilizando uma queda bruta de 90 metros e uma vazão total de 34,84 m<sup>3</sup>/s.

Reconhecida por sua versatilidade e elevado desempenho, a turbina Francis visa maximizar o aproveitamento energético da água. Sendo uma turbina de fluxo misto, seu funcionamento estável e contínuo contribui diretamente para a confiabilidade operacional do sistema.

O conduto forçado, com diâmetro interno de 2,5 metros, garante uma velocidade média de escoamento entre 6 e 8 m/s — faixa considerada ideal para minimizar perdas por atrito, prevenir erosão nas paredes do conduto e evitar cavitação na turbina.

Após a conversão da energia potencial em energia mecânica rotacional, a água é direcionada por um tubo de sucção com diâmetro interno de 2,7 metros, que permite a recuperação parcial da energia de pressão, reduz a velocidade de saída e mantém a eficiência do sistema em níveis elevados.

Além de sua função primária de geração, a turbina Francis também atua como um ponto de transição hidráulica no sistema PMTHPP. Ao estabilizar o escoamento antes da entrada na turbina Pelton, ela garante que o fluxo descendente chegue com características hidráulicas otimizadas, favorecendo o desempenho da próxima etapa da conversão energética.

Essa sinergia entre as turbinas Francis e Pelton é um dos pilares técnicos do projeto PMTHPP. O arranjo integrado permite que a energia total do sistema seja extraída em dois estágios consecutivos, aumentando a eficiência global do ciclo fechado e contribuindo para a viabilidade da proposta em termos técnicos e energéticos.

### 3.1.Cálculo da Potência da Turbina Francis

Altura de queda bruta (H): 90 m

Vazão (Q): 34,84 m<sup>3</sup>/s

Gravidade (g): 9,81 m/s<sup>2</sup>

$$\eta_{global} = \eta_h \times \eta_m \times \eta_g$$

$$\eta_{global} = 0,90 \times 0,98 \times 0,97 = 0,85$$

$$P = \rho \times Q \times g \times H \times \eta$$

$$P = 1000 \times 34,84 \times 9,81 \times 90 \times 0,85$$

$$P = 26.146.200W$$

$$P = 26.146,2KW$$

### 3.2.Cálculo da Potência da Turbina Francis em Cavalos-Vapor (cv)

Fator de conversão: 1cv=735,5W

$$P = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot \eta}{75}$$

$$P = \frac{1000 \times 34,84 \times 90 \times 0,85}{75}$$

$$P = 35.536,8cv$$

$$P = 35.536,8 \times 735,5 = 26.137.316,4W$$

$$P = 26.137,3KW$$

## 4. Turbina Pelton

A Turbina Pelton é a unidade geradora principal do sistema PMTHPP, instalada horizontalmente na parte inferior da estrutura, operando com quatro turbinas síncronas em série.

A água que sai da turbina Francis entra no tubo de sucção e é então canalizada por um conjunto de quatro bocais simétricos, cada um com diâmetro de 0,50 metros e área de  $0,1963 \text{ m}^2$ , responsáveis por direcionar os jatos de forma precisa sobre as conchas da Pelton.

Com base na equação da continuidade, esse arranjo geométrico garante a aceleração natural do escoamento à medida que a água passa de uma seção ampla para uma menor. O resultado são jatos de alta velocidade, gerados dentro dos limites físicos reais do sistema, otimizando a conversão da energia cinética do fluido em energia mecânica.

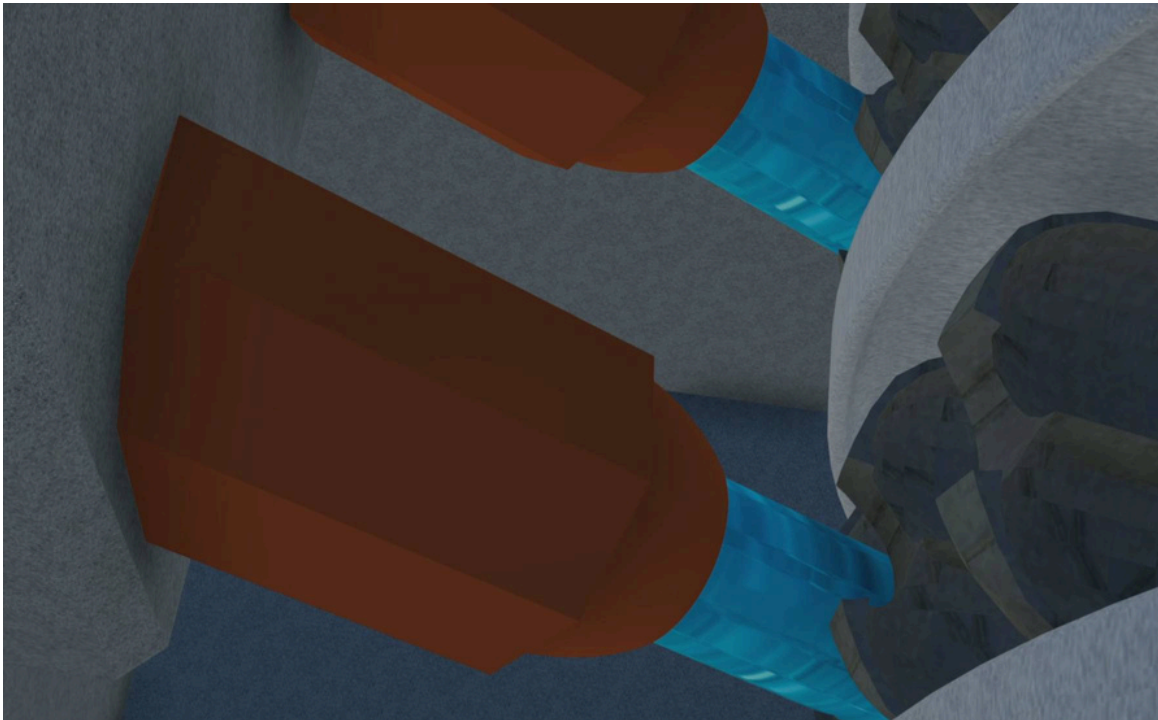
A Turbina Pelton opera com um conjunto horizontal duplo, com dois geradores acoplados simetricamente ao eixo, esquerdo e direito, permitindo o equilíbrio dinâmico do sistema e maximizando a capacidade de geração.

Dentro do ciclo fechado do sistema PMTHPP, a função da Pelton é complementar a conversão energética iniciada pela turbina Francis, garantindo o aproveitamento integral da energia hidráulica disponível.

Esta etapa final consolida a eficiência global do sistema, contribuindo diretamente para a viabilidade técnica e econômica do projeto.

## 4.1. Dimensões do Bocal – Turbina Pelton

Os bocais da turbina Pelton têm papel fundamental na transformação da energia hidráulica em energia cinética de alta intensidade. Cada bocal possui um diâmetro de 0,50 metros, resultando em um raio de 0,25 metros e uma área de seção transversal de aproximadamente  $0,1963\text{m}^2$ . O sistema conta com quatro bocais simétricos, estrategicamente posicionados para direcionar jatos de água com alta velocidade e precisão sobre as pás da Turbina Pelton.



Diâmetro do bocal = 0,50 m

Raio ( $r$ ) = 0,25 m

Área da seção transversal de cada jato ( $A$ )= $0,1963\text{m}^2$

## 4.2. Cálculo da Velocidade da Água

V=Velocidade da Água

H=104,5 m

g=9,81 m/s<sup>2</sup>

Coeficiente de velocidade (cv): 0,98

$$v = cv\sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$v = 0,98\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 104,5}$$

$$v = 0,98\sqrt{2049,09}$$

$$v = 0,98 \cdot 45,28$$

$$v = 44,37 \text{ m/s}$$

## 4.3. Cálculo da Vazão

Q = Vazão

A=0,7854 m<sup>2</sup>

V=44,37 m/s

$$Q=A \cdot V$$

$$Q=0,7854 \cdot 44,37$$

$$Q=34,84 \text{ m}^3/\text{s}$$



## 4.4.Divisão do Conduto Forçado – Primeira Etapa

Após a passagem pela turbina Francis, a água é conduzida por meio de um tubo de sucção conhecido como Conduto Forçado 2, que possui diâmetro inicial de 2,70 metros.

Com o objetivo de garantir uma distribuição eficiente e simétrica da vazão, esse conduto principal se bifurca em duas ramificações idênticas, configurando a primeira etapa do processo de divisão do fluxo.

Raio inicial = 1,35m

Diâmetro inicial = 2,70m

Área da seção transversal inicial = 5,726m<sup>2</sup>



#### 4.5.Primeira divisão (em 2 condutos):

$$A_1 = \frac{A_2}{2} = \frac{5,726}{2} = 2,863m^2$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{2,863}{3,14}} = \sqrt{0,91} = 0,954m$$

$$D_1 = 2 \times r_1 = 2 \times 0,954 = 1,90m$$

$$A_1 = 2,863m^2$$

$$r_1 = 0,954m$$

$$D_1 = 1,90m$$

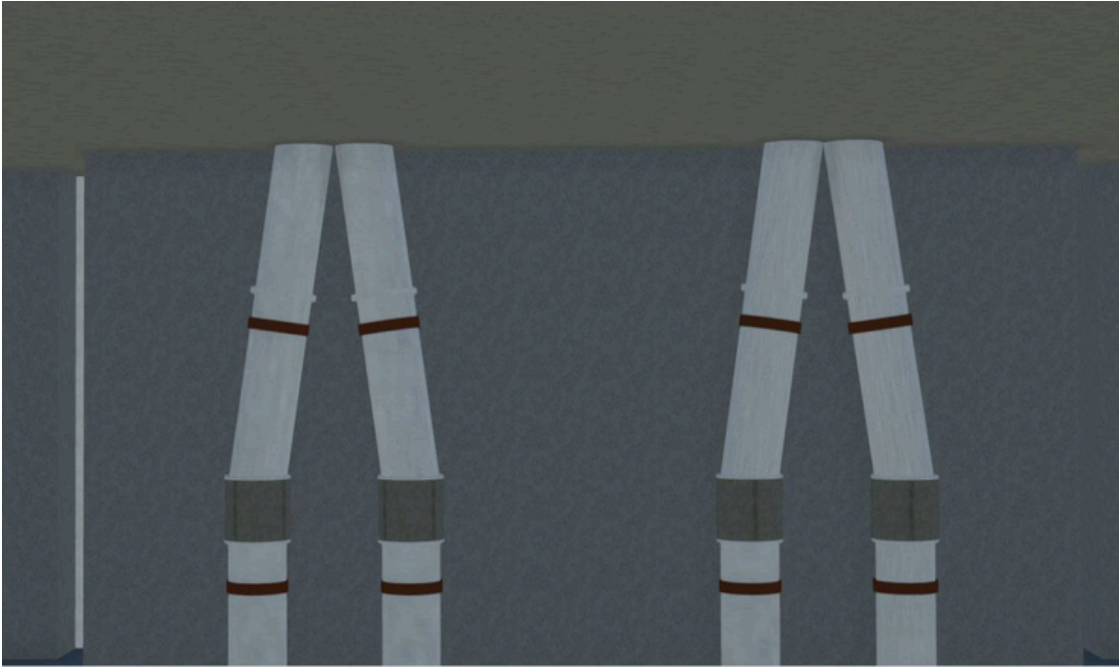
#### 4.6. Segunda Etapa da Divisão

Na segunda etapa de divisão, cada uma das duas ramificações anteriores se subdivide novamente, totalizando quatro ramificações finais. Essa configuração foi adotada para direcionar a vazão de maneira balanceada aos quatro bocais que alimentam a turbina Pelton, otimizando o aproveitamento energético e mantendo a estabilidade do sistema hidráulico.

$$A_1 = 2,863m^2$$

$$r_1 = 0,954m$$

$$D_1 = 1,90m$$



#### 4.7. Segunda Divisão

$$A_2 = \frac{A_1}{2} = \frac{2,863}{2} = 1,431m^2$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,431}{3,14}} = \sqrt{0,445} = 0,675m$$

$$D_2 = 2 \times r_2 = 2 \times 0,675 = 1,35m$$

$$A_2 = 1,432m^2$$

$$r_2 = 0,675m$$

$$D_2 = 1,35m$$

## 4.8.Cálculo da Velocidade do Jato da Turbina Pelton

Após a divisão do conduto forçado em quatro ramificações simétricas, cada ramificação é conectada diretamente a um bocal responsável por direcionar o jato de água. Esses bocais apresentam uma área de seção transversal consideravelmente menor em relação aos condutos que os alimentam.

De acordo com o princípio da equação da continuidade, derivado do teorema de Bernoulli, quando um fluido incompressível escoar de uma seção com área maior para uma com área menor, sua velocidade aumenta proporcionalmente, de modo a conservar a vazão constante.

Esse aumento de velocidade é essencial para a eficiência do sistema, pois gera quatro jatos de água em alta pressão, garantindo a transferência da energia cinética do fluxo de forma eficaz para as pás da turbina Pelton. Essa conversão direta de energia contribui significativamente para o alto rendimento do conjunto turbina-gerador.

Raio do jato  $r=0,25\text{ m}$

Diâmetro do jato  $D=0,50\text{ m}$

Área do jato  $A=0,1963\text{ m}^2$

$Q=34,84\text{ m}^3/\text{s}$

Número de jatos: 4

$$Q_j = \frac{Q_t}{4} = \frac{34,84}{4} = 8,71\text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_j = \frac{Q_j}{A_j} = \frac{8,71}{0,1963} = 44,37\text{ m/s}$$

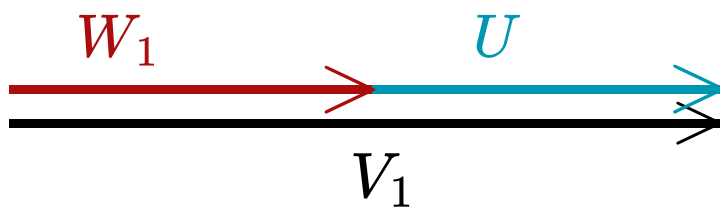
$$V_j = 44,37\text{ m/s}$$

## 4.9. Diagrama Vetorial das Velocidades – Turbina Pelton

A eficiência de uma turbina Pelton atinge seu valor máximo quando a relação entre a velocidade tangencial da roda ( $U$ ) e a velocidade absoluta do jato de água ( $V_1$ ) é ideal. Na teoria, essa condição ocorre quando  $\frac{U}{V_1} = \frac{1}{2}$ , ou seja, quando a velocidade tangencial é exatamente metade da velocidade do jato. Essa proporção garante o melhor aproveitamento da energia cinética do fluido, maximizando a transferência de energia para a turbina.

Na prática, devido a perdas mecânicas e efeitos secundários como atrito e turbulência, a eficiência máxima ocorre com valores um pouco inferiores, geralmente na faixa de 0,45 a 0,48. No projeto adotamos 0,46.

## 4.10. Diagrama de Velocidade na Entrada

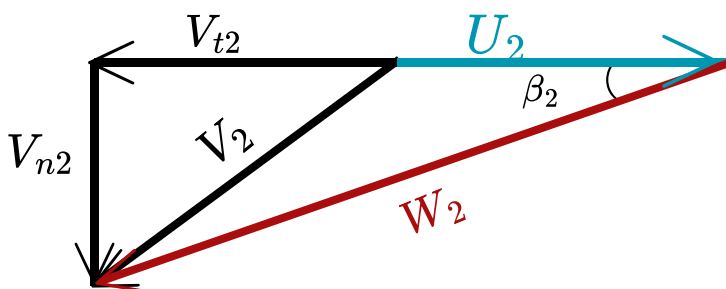


$$U = U_1 = U_2$$

$$U = V_1 \times 0,46$$

$$W_1 = V_1 - U$$

## 4.11 Diagrama de Velocidade na Saída



$$\beta_2 = 15^\circ$$

$$V_{t2} = -(W_2 \times \cos \beta_2 - U_2)$$

$$W_2 = W_1 \times K$$

$$0 < K < 1$$

## 4.12.Cálculo da Potência – Turbina Pelton

Dixon, S. L., & Hall, C. A.

Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 34,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Velocidade Absoluta: } V_1 = 44,37 \text{ m/s}$$

$$U = U_1 = V_1 \times 0,46 = 44,37 \times 0,46 = 20,41 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidade Tangencial: } U = 20,41 \text{ m/s}$$

$$W_1 = V_1 - U = 44,37 - 20,41 = 23,96 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidade Relativa na Entrada: } W_1 = 23,96 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidade Relativa na Saída: } W_2 = W_1 = 23,96 \text{ m/s}$$

$$\cos \beta_2 = \cos 15^\circ = 0,965$$

$$\eta_{global} = \eta_h \times \eta_m \times \eta_g$$

$$\eta_{global} = 0,93 \times 0,98 \times 0,97 = 0,88$$

$$P = \rho \times Q (V_1 - U) \times U \times (1 + \cos \beta_2)$$

$$P = 1000 \times 34,84 (44,37 - 20,41) \times 20,41 \times (1 + 0,965) \times \eta$$

$$P = 33.464.876 \text{ W} \times 0,88$$

$$P = 29.449.091 \text{ W}$$

$$P = 29,449 \text{ KW}$$

#### 4.13. Cálculo da Potência com Base no Torque

A potência mecânica gerada no eixo da turbina Pelton pode ser determinada pela multiplicação do torque transmitido pela velocidade angular.

#### 4.14. Cálculo da Força Aplicada nas Turbinas

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$Q = 34,84 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_1 = 44,37 \text{ m/s}$$

$$U = 20,41 \text{ m/s}$$

$$\beta_2 = 15^\circ$$

$$\cos \beta_2 = 0,9659$$

$$F = \rho \times Q \times (V_1 - U) \times (1 + \cos \beta_2)$$

$$F = 1000 \times 34,84 \times (44,37 - 20,41) \times (1 + 0,9659)$$

$$F = 1.641.067 \text{ N}$$

#### 4.15. Cálculo do Torque

$$D = 4,6 \text{ m}$$

$$r = 2,3 \text{ m}$$

$$T = F \times r$$

$$T = 1.641.067 \times 2,3$$

$$T = 3.744.454 \text{ N/m}$$

## 4.16.Cálculo da Potência Mecânica

A potência mecânica útil na saída do eixo da turbina corresponde ao resultado direto da conversão da energia hidráulica em energia rotacional. Essa potência representa a energia disponível para ser transferida ao gerador e pode ser calculada por meio do torque e da velocidade angular.

$$U = 20,41m/s$$

$$D = 4,6m$$

$$U = \frac{\pi \times D \times N}{60}$$

$$N = \frac{U \times 60}{\pi \times D}$$

$$N = \frac{20,41 \times 60}{3,14 \times 4,60}$$

$$N = 84,75RPM$$

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60}$$

$$\omega = \frac{2\pi \times 84,75}{60}$$

$$\omega = 8,87rad/s$$

$$P = T \times \omega$$

$$P = 3.744.454 \times 8,87$$

$$P = 33.213.307W \times 0,88$$

$$P = 29.227,7KW$$



## 5. Potência Combinada – Resultado Final da Conversão Energética

O sistema PMTHPP foi projetado para aproveitar de forma inteligente e escalonada a energia hidráulica disponível em seu ciclo fechado. A configuração adotada, composta por duas turbinas operando em estágios distintos, permite um aproveitamento mais eficiente da energia potencial e cinética da água, maximizando o rendimento global do sistema.

A Turbina Francis, operando sob uma queda de 90 metros e vazão de 34,84 m<sup>3</sup>/s, gera uma potência líquida de:

$$P_{Francis} = 26,146,2KW$$

Já a Turbina Pelton, instalada no nível mais baixo, contribui com uma potência líquida de:

$$P_{Pelton} = 29.449KW$$

A potência líquida total gerada pelo sistema PMTHPP, já considerando as eficiências reais de ambas as turbinas, é:

$$P_{Total} = 55.595,2KW$$

Esse valor representa a energia efetivamente disponível para uso, após todas as perdas mecânicas, hidráulicas e térmicas. A potência líquida gerada é superior à potência consumida pelas bombas de recirculação, resultando em um excedente energético mensurável, essencial para a autossuficiência do sistema e sua viabilidade comercial.

# Conclusão – Turbomáquinas e Geração de Energia

O presente relatório apresentou o dimensionamento e a análise de desempenho das turbinas utilizadas no sistema PMTHPP, com ênfase na eficiência hidráulica e energética da conversão de energia em ciclo fechado.

A Turbina Francis foi estrategicamente posicionada no estágio superior do sistema PMTHPP para converter, de forma eficiente e segura, a energia potencial gravitacional da água em energia mecânica. Com uma queda de 90 metros e alta vazão, opera segundo os princípios das usinas hidrelétricas convencionais, garantindo elevado rendimento.

Além de gerar energia, a Francis estabiliza o escoamento antes da entrada da Turbina Pelton, assegurando condições hidráulicas ideais para o segundo estágio do processo.

A turbina Pelton atua como a unidade geradora principal do sistema PMTHPP, instalada horizontalmente na base da estrutura hidrelétrica. Seu eixo está acoplado de forma simétrica a dois geradores — esquerdo e direito — otimizando o balanço dinâmico e a distribuição da carga.

Todos os cálculos de vazão, velocidade, potência hidráulica e eficiência foram conduzidos com base em parâmetros reais de operação, respeitando os princípios da mecânica dos fluidos e da termodinâmica aplicada. O balanço energético confirmou que a energia gerada supera a energia consumida pelas bombas, garantindo a autossuficiência do sistema e o excedente para fins comerciais.

Os resultados obtidos validam a robustez técnica do sistema e confirmam a viabilidade de sua aplicação em projetos de geração de energia renovável.