

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/s²
- Densidade da água (ρ): 1000 kg/m³
- Coeficiente de velocidade (cv): 0,98
- Vazão total do sistema (Q): 34,84 m³/s
- Eficiência da turbina Pelton (η_p): 0,90
- Eficiência da turbina Francis (η_f): 0,80

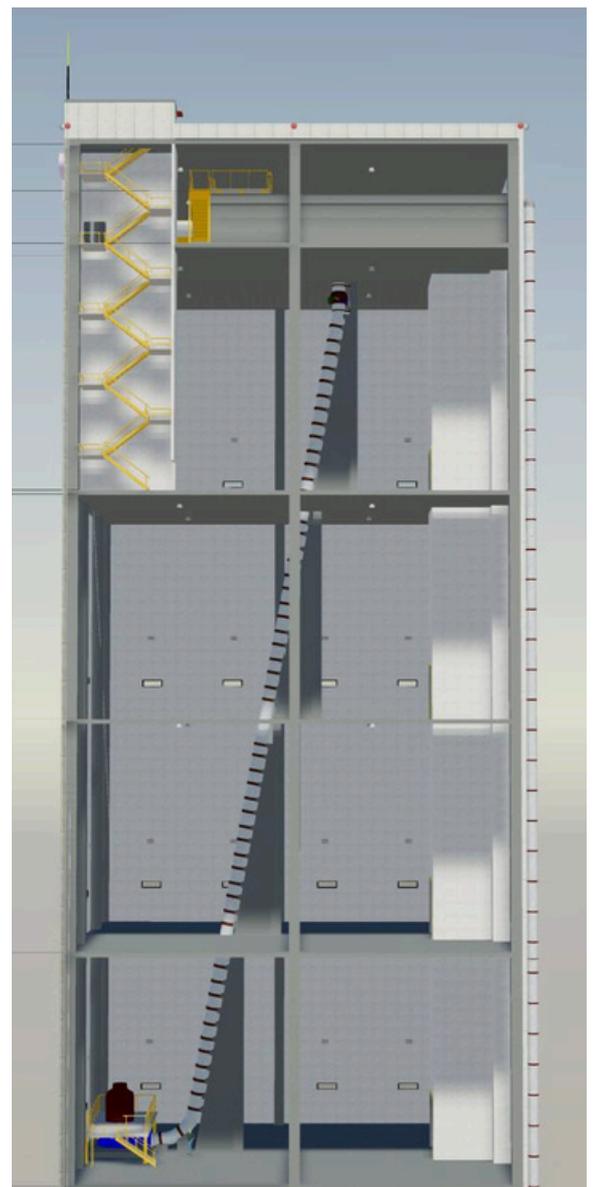
2.1. Conduto Forçado 1

O Conduto Forçado 1 é o canal responsável por conduzir a água do reservatório elevado até a turbina Francis. Com diâmetro interno de 0,90 metros, raio de 0,45m e área de seção transversal de 0,6362 m².

Diâmetro interno (D_1): 0,90 m

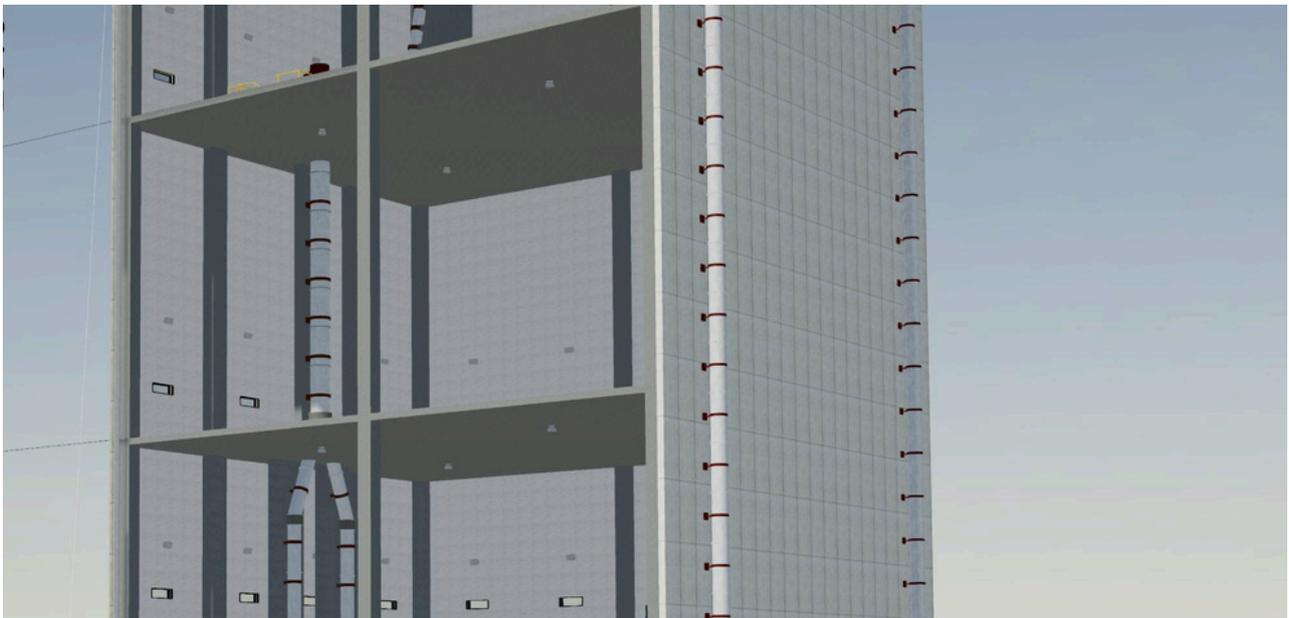
Raio (r_1): 0,45 m

Área da seção transversal (A_1): 0,6362 m²



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 1,00 metro, raio de 0,5m e área de seção transversal de 0,7854 m².



Diâmetro interno (D_2): 1,00 m

Raio (r_2): 0,50 m

Área da seção transversal (A_2): 0,7854 m²

2.3. 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 0,40 metros, resultando em um raio de 0,20 metros e uma área de seção transversal de aproximadamente $0,1256 \text{ m}^2$. 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 = 0,40 m

Raio (r) = 0,20 m

Área da seção transversal de cada jato (A)= $0,1256 \text{ m}^2$

3. Cálculo da Velocidade da Água no Conduto Forçado

V=Velocidade da Água

H=104,5 m

g=9,81 m/s²

Coefficiente de velocidade (cv): 0,98

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

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

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

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

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

3.1. Cálculo da Vazão

Q = Vazão

A=0,7854 m²

V=44,37 m/s

$$Q=A \cdot V$$

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

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

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 1 metro.

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 = 0,50m

Diâmetro inicial = 1m

Área da seção transversal inicial = $A=0,7854 \text{ m}^2$



4.1.Primeira divisão (em 2 condutos):

$$A_1 = \frac{A_2}{2} = \frac{0,7854}{2} = 0,3927m^2$$

$$r_1 = \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,3927}{\pi}} = \sqrt{0,125} = 0,3535m$$

$$D_1 = 2 \times r_1 = 2 \times 0,3535 = 0,707m$$

$$A_1 = 0,3927m^2$$

$$r_1 = 0,3535m$$

$$D_1 = 0,707m$$

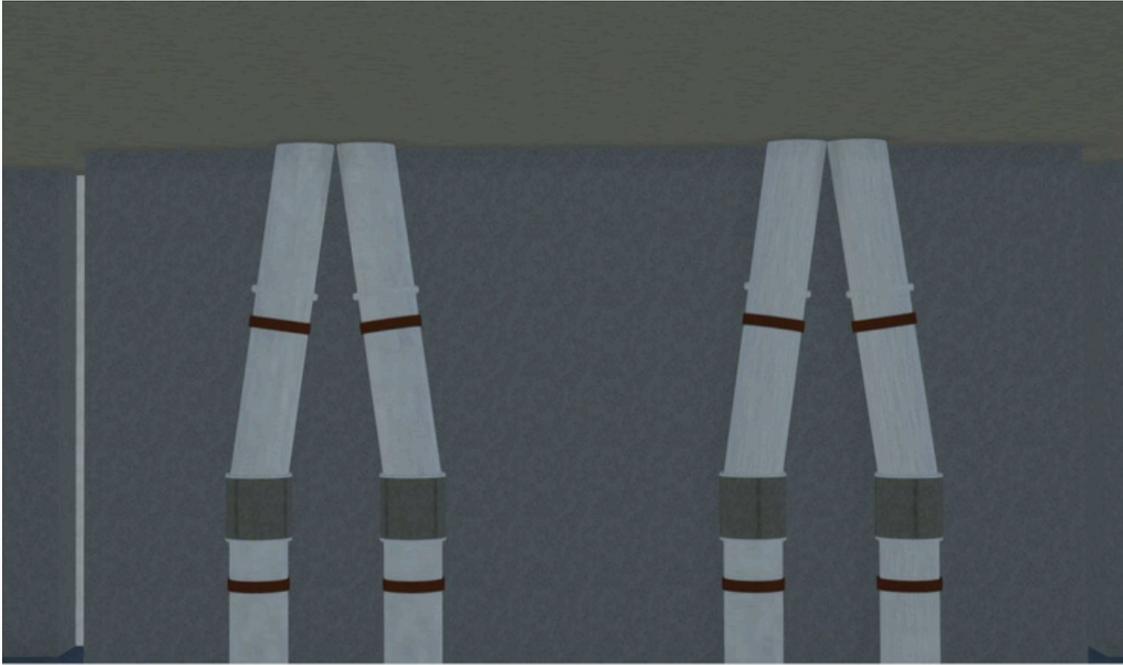
5. Segunda Etapa da Divisão

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.

$$D_1 = 0,707m$$

$$r_1 = 0,3535m$$

$$A_1 = 0,3927m^2$$



5.1. Segunda Divisão

$$A_2 = \frac{A_1}{2} = \frac{0,3927}{2} = 0,1963 \text{ m}^2$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,1963}{\pi}} = \sqrt{0,0625} = 0,25m$$

$$D_2 = r_2 \times 2 = 0,25 \times 2 = 0,50m$$

$$A_2 = 0,1963m^2$$

$$r_2 = 0,25m$$

$$D_2 = 0,50m$$

6.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 $r=0,20$ m

Diâmetro do jato $D=0,40$ m

Área do jato $A=0,1257$ m²

$Q=34,84$ m³/s

Número de jatos: 4

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

$$Q_j = A_j \times V_j = V_j = \frac{Q_j}{A_j} = \frac{8,71}{0,1257} = 69,29 \text{ m/s}$$

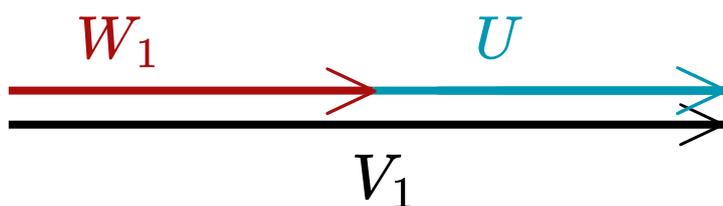
$$V_j = 69,29 \text{ m/s}$$

6.1. 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.

6.1.1. Diagrama de Velocidade na Entrada

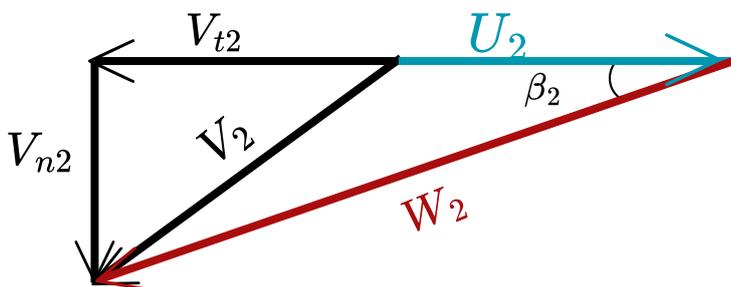


$$U = U_1 = U_2$$

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

$$W_1 = V_1 - U$$

6.1.2 Diagrama de Velocidade na Saída



$$\beta_2 = 15^\circ$$

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

$$W_2 = W_1 \times K$$

$$0 < K < 1$$

Coeficiente de atrito: $K = 0,88$

7.Cálculo da Potência – Turbina Pelton

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

Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery

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

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

Velocidade Absoluta: $V_1 = 69,29 \text{m/s}$

Velocidade Tangencial: $U = 31,87 \text{m/s}$

$$U = U_1 = V_1 \times 0,46 = 69,29 \times 0,46 = 31,87 \text{m/s}$$

Velocidade Relativa na Entrada: $W_1 = 37,42 \text{m/s}$

$$W_1 = V_1 - U = 69,29 - 31,87 = 37,42 \text{m/s}$$

Velocidade Relativa na Saída: $W_2 = 32,92 \text{m/s}$

$$W_2 = W_1 \times K = 37,42 \times 0,88 = 32,92 \text{m/s}$$

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

Coeficiente de atrito: $K = 0,88$

Eficiencia global: $\eta = 0,90$

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

$$P = 1000 \times 34,84 (69,29 - 31,87) \times 31,87 \times (1 + 0,88 \times 0,965)$$

$$P = 76.450.761,6 \text{W} \times \eta$$

$$P = 68.805.685,4 \text{W}$$

$$P = 68,8 \text{MW}$$

8.Cálculo da Potência – Turbina Pelton

Claudio Mataix

"Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas"

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

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

$$\text{Velocidade Absoluta: } V_1 = 69,29 \text{m/s}$$

$$\text{Velocidade Tangencial: } U = 31,87 \text{m/s}$$

$$U = U_1 = V_1 \times 0,46 = 69,29 \times 0,46 = 31,87 \text{m/s}$$

$$\text{Velocidade Relativa na Entrada: } W_1 = 37,42 \text{m/s}$$

$$W_1 = V_1 - U = 69,29 - 31,87 = 37,42 \text{m/s}$$

$$\text{Velocidade Relativa na Saída: } W_2 = 32,92 \text{m/s}$$

$$W_2 = W_1 \times K = 37,42 \times 0,88 = 32,92 \text{m/s}$$

$$\text{Cos}\beta_2 = \cos 15^\circ = 0,965$$

$$\text{Coeficiente de atrito: } K = 0,88$$

$$\text{Eficiencia global: } \eta = 0,90$$

Componentes Tangenciais das Velocidades Relativas

$$W_{U_1} = W_1 = 37,42 \text{m/s}$$

$$W_{U_2} = W_2 \times \text{Cos}\beta_2 = 32,92 \times 0,965 = 31,76 \text{m/s}$$

$$F = \rho \times Q \times (W_{U_1} - (-W_{U_2}))$$

$$F = 1000 \times 34,84 \times (37,42 + 31,76)$$

$$F = 2.410.231,2 \text{N}$$

$$P = F \times U = 2.410.231,2 \times 31,87 = 76.814.068,3 \text{W}$$

$$P = 76.814.068,3 \times \eta$$

$$P = 69.132.661,5 \text{W}$$

$$P = 69,13 \text{MW}$$

9.Cálculo da Potência da Turbina Francis

A turbina Francis foi estrategicamente posicionada no estágio intermediário do sistema PMTHPP, com foco na eficiência hidráulica e no controle da pressão ao longo do ciclo. O primeiro motivo para essa escolha está relacionado à diferença de pressão entre a entrada e a saída da turbina — uma característica inerente ao seu funcionamento e que pode, inclusive, levar à cavitação se não for bem administrada.

O segundo motivo refere-se ao seu papel estratégico na elevação da pressão do sistema. Após converter a energia potencial gravitacional em energia mecânica, a água é conduzida a um conduto forçado com área de seção transversal gradualmente crescente, promovendo a recuperação de pressão e garantindo condições ideais para a etapa seguinte do processo.

Altura de queda bruta (H): 80 m

Vazão (Q): 34,84 m³/s

Gravidade (g): 9,81 m/s²

Eficiência da turbina (η): 0,80

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

$$P = 1000 \times 34,84 \times 9,81 \times 80$$

$$P = 27.342.432W$$

$$P = 27.342.432 \times \eta$$

$$P = 21.873.945,6W$$

$$P = 21,87MW$$

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

Fator de conversão: $1cv=735,5W$

Altura de queda bruta (H): 80 m

Vazão (Q): $34,84 \text{ m}^3/\text{s}$

Gravidade (g): $9,81 \text{ m/s}^2$

Eficiência da turbina (η): 0,80

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

$$P = \frac{1000 \cdot 34,84 \cdot 80 \cdot 0,8}{75}$$

$$P = 29.730,13cv$$

$$P = 29.730,13 \times 735,5 = 21.866.513,1W$$

$$P = 21,87MW$$

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 posicionada de forma estratégica no estágio intermediário do sistema, com o objetivo de otimizar a conversão da energia potencial gravitacional em energia mecânica, enquanto eleva a pressão na linha de fluxo descendente. A escolha técnica se justifica tanto pela diferença de pressão entre a entrada e a saída — característica intrínseca às turbinas Francis — quanto pela função de estabilização hidráulica no ponto médio do sistema.

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.