Relatório Técnico

Cálculos e Dimensionamento do Sistema DLDAPP

1. Introdução

O Sistema DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump) é uma inovação disruptiva no campo da engenharia hidráulica, concebido com foco em alta eficiência energética, robustez mecânica e sustentabilidade operacional. Desenvolvido para integração ao projeto PMTHPP, o sistema atua como o componente central responsável pelo bombeamento de grandes volumes de água sob alta pressão, com consumo energético significativamente reduzido.

A tecnologia combina de forma estratégica dois princípios mecânicos consagrados — alavancagem e polias móveis — para potencializar o deslocamento dos pistões. Essa configuração permite reduzir substancialmente a força necessária para operação, sem comprometer a vazão ou a estabilidade hidráulica do sistema.

Diferentemente dos sistemas convencionais descritos na literatura técnica, o DLDAPP bombeia água para uma câmara de armazenamento vertical – water chamber – que se estende do nível do subsolo até o reservatório superior. Essa estrutura inovadora permite o aproveitamento ideal da energia potencial gravitacional e da energia hidráulica acumulada, formando um circuito fechado de elevado rendimento energético.

Este relatório apresenta de forma detalhada os fundamentos físicos, os cálculos de desempenho, o funcionamento técnico e os diferenciais que posicionam o DLDAPP como uma solução estratégica para projetos avançados de geração de energia renovável.

2. Objetivos do Sistema

O sistema DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump) foi desenvolvido com o objetivo de oferecer uma solução eficiente e inovadora para o bombeamento contínuo de grandes volumes de água sob alta pressão, atendendo às exigências operacionais do projeto PMTHPP.

A seguir, são apresentados os principais objetivos do sistema:

1. Maximizar a eficiência energética no processo de bombeamento, reduzindo significativamente o consumo de energia por meio do uso combinado de alavancagem mecânica e polias móveis.
2. Viabilizar o transporte de água até o reservatório superior, superando desníveis superiores a 100 metros com segurança, estabilidade e robustez.
3. Minimizar perdas hidráulicas e mecânicas, por meio de um projeto que elimina os principais pontos de ineficiência observados em sistemas de bombeamento convencionais.
4. Garantir operação contínua e autossustentável, integrando-se ao ciclo fechado do PMTHPP sem depender de fontes externas de energia além da gerada pelo próprio sistema.
5. Demonstrar a viabilidade tecnológica de uma abordagem disruptiva, não descrita na literatura tradicional, ampliando as possibilidades de uso de energia hidráulica renovável em larga escala e com baixo impacto ambiental.

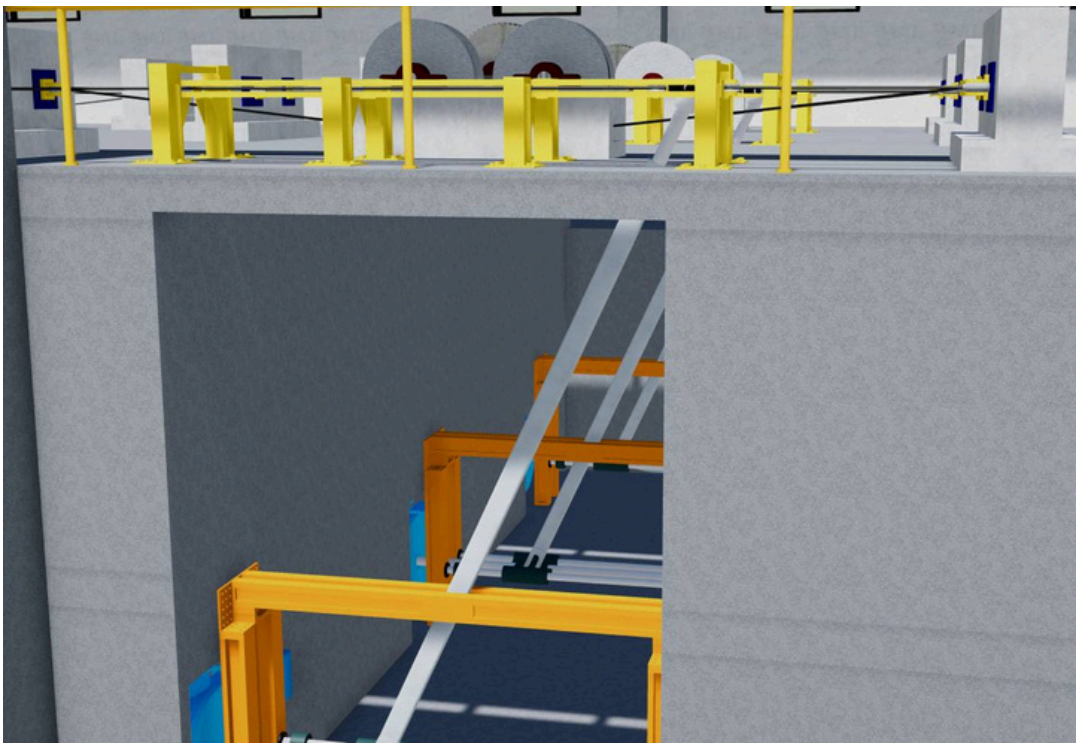
3. Fundamentos e Funcionamento

O sistema DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump) fundamenta-se em princípios clássicos da mecânica e da hidráulica, aplicados de maneira inovadora para superar os limites das tecnologias de bombeamento convencionais.

3.1 Princípios de Funcionamento

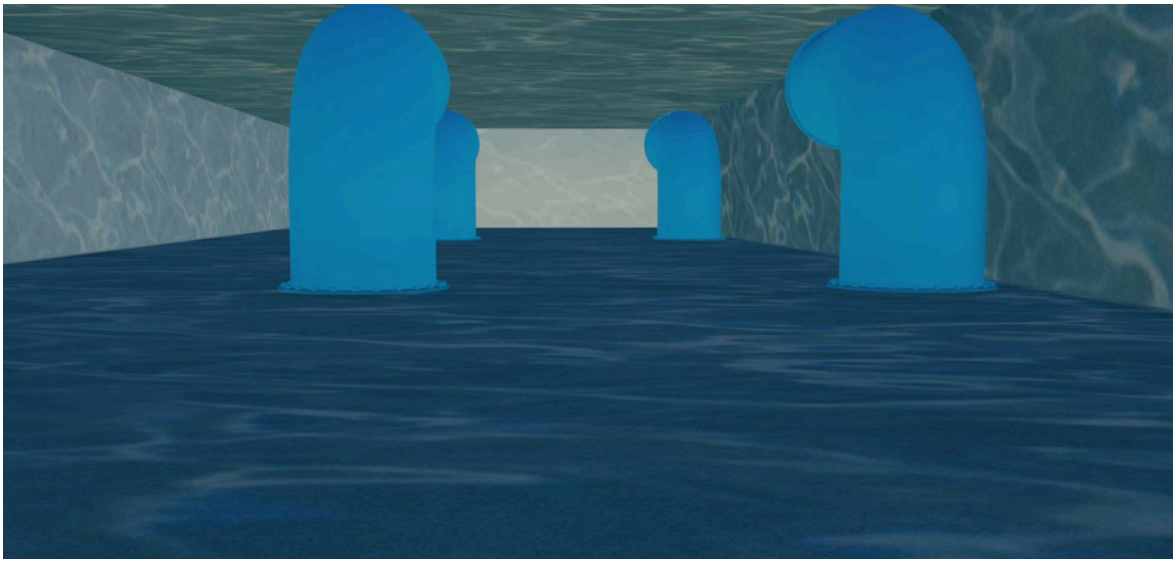
O DLDAPP é composto por um conjunto de bombas de pistão de dupla ação, operadas por alavancas mecânicas e polias móveis. Esse conjunto permite que o movimento alternado dos pistões bombeie água em ambos os sentidos do curso, otimizando o ciclo de trabalho e dobrando a eficiência volumétrica em comparação com bombas de ação simples.

O sistema utiliza alavancagem com uma relação de transmissão mecânica de aproximadamente i = 2,76, o que reduz consideravelmente a força necessária para o acionamento dos pistões. Além disso, polias móveis são incorporadas ao sistema para dividir a carga aplicada, proporcionando uma redução adicional do esforço exigido.



3.2 Câmara de Armazenamento Vertical (Water Chamber)

Diferentemente dos sistemas convencionais descritos na literatura técnica, o DLDAPP bombeia água para uma câmara de armazenamento vertical — water chamber — que se estende do nível do subsolo até o reservatório superior, com aproximadamente 125 metros de altura. Essa câmara funciona como um canal pressurizado, acumulando energia potencial gravitacional de forma eficiente.



3.3 Ciclo Hidráulico Integrado

A água bombeada é armazenada na water chamber e, posteriormente, liberada para alimentar as turbinas do sistema PMTHPP. A energia potencial acumulada é convertida em energia cinética e, em seguida, em energia mecânica pelas turbinas Francis e Pelton, completando um ciclo fechado, contínuo e de alto rendimento.

Esse processo permite que a energia utilizada para bombear a água seja reciclada dentro do próprio sistema, maximizando a sustentabilidade e a eficiência global da operação.

4. Cálculos e Dimensionamento

O dimensionamento do sistema DLDAPP foi desenvolvido com base em parâmetros operacionais específicos, considerando a vazão necessária, a altura de bombeamento e a eficiência energética do sistema.

4.1 Pressão na base da câmara de armazenamento vertical

$$H = 109,5m$$

$$\rho = 1000kg/m^3$$

$$g = 9,81m/s^2$$

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

$$P = 1000 \times 9,81 \times 109,5$$

$$P = 1.074.195Pa$$

$$P = 10,74bar$$

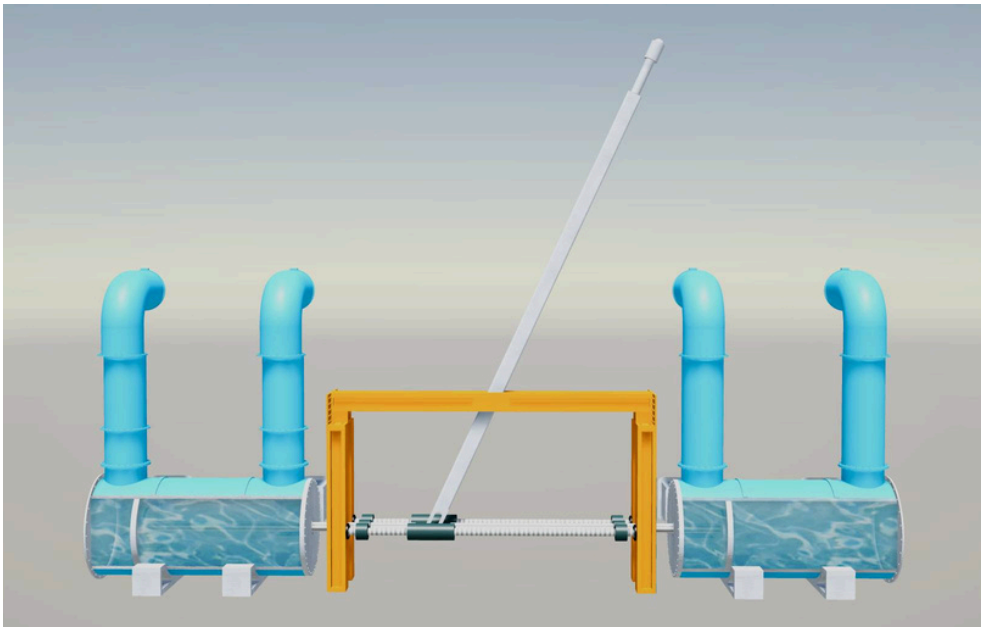
4.2 Área e volume de deslocamento por pistão

$$r = 0,5m$$

$$d = 1m$$

$$A = 0,7854m^2$$

$$V = 1m^3$$



$$V = A \times L$$

$$L = \frac{1}{0,7854}$$

$$L = 1,273m$$

4.3 Força necessária por pistão

$$P = 1.074.195 Pa$$

$$A = 0,7854 m^2$$

$$F = P \times A$$

$$F = 1.074.195 \times 0.7854$$

$$F = 843.672 N$$

$$F = 86,01 kgf$$

4.4 – Redução de força com alavancagem e polia móvel

Como o sistema DLDAPP opera com dois pistões simultaneamente

$$F = 843.672 N$$

Força total = $F_t = 2 \times F$

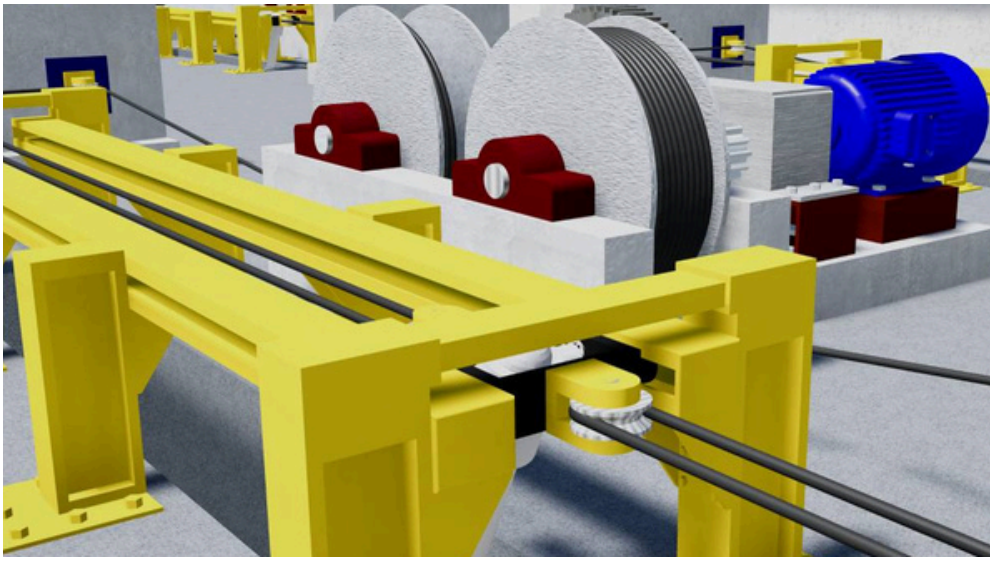
$$F_t = 1.687.345 N$$

$$i = 2,76$$

$$F_r = \frac{F_t}{i}$$

$$F_r = \frac{1.687.345}{2.76}$$

$$F_r = 611.357 N$$



$$F_f = \frac{611.357}{2}$$

$$F_f = 305.678 N$$

$$F_f = 31,17 kgf$$

5. Cálculo da Potência Requerida pelo Sistema de Bombeamento

Para o acionamento dos pistões hidráulicos no sistema DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump), foi implementado um mecanismo de alavanca articulada dimensionado para ampliar a força aplicada com alta eficiência mecânica. O braço superior da alavanca realiza um deslocamento linear de 3,76 metros por ciclo completo de bombeamento.

Considerando-se que o sistema opera com polias móveis para multiplicação da força e redistribuição do esforço, o cabo de aço vinculado ao tambor deverá apresentar um comprimento útil de 7,52 metros, correspondente ao dobro do curso linear da extremidade da alavanca. Esse dimensionamento é essencial para garantir o acionamento completo do pistão em ambos os sentidos de operação.

5.1. Dimensionamento do Tambor

Para permitir o deslocamento linear de 3,76 metros no braço superior da alavanca, foi considerado o uso de um tambor (drum) para enrolamento do cabo de aço.

$r = 0,4m$

$D = 0,8m$

$C = 2,513m$

A quantidade de voltas que o tambor deve realizar para enrolar os 7,52 metros de cabo necessários por ciclo é dada por:

$$N = \frac{7,52}{2,513} = 2,99 \text{ Voltas} \quad \text{ou} \quad f = 3Hz$$

5.2. Transmissão de Movimento e Engrenagens

Para atingir essa exigência de três voltas por segundo no tambor, foi adotado um sistema de engrenagens que parte de um motor de indução trifásico com quatro polos e rotação nominal de 1800 rpm. O sistema de transmissão acopla esse motor a uma engrenagem intermediária do tipo setor (meia engrenagem) com diâmetro de 0,9 metros e rotação de 30 rpm.

Dessa engrenagem, o movimento é transmitido a uma engrenagem menor acoplada ao tambor, que opera a 180 rpm, conforme exigido para garantir as 3 rotações por segundo.

Engrenagem Setor

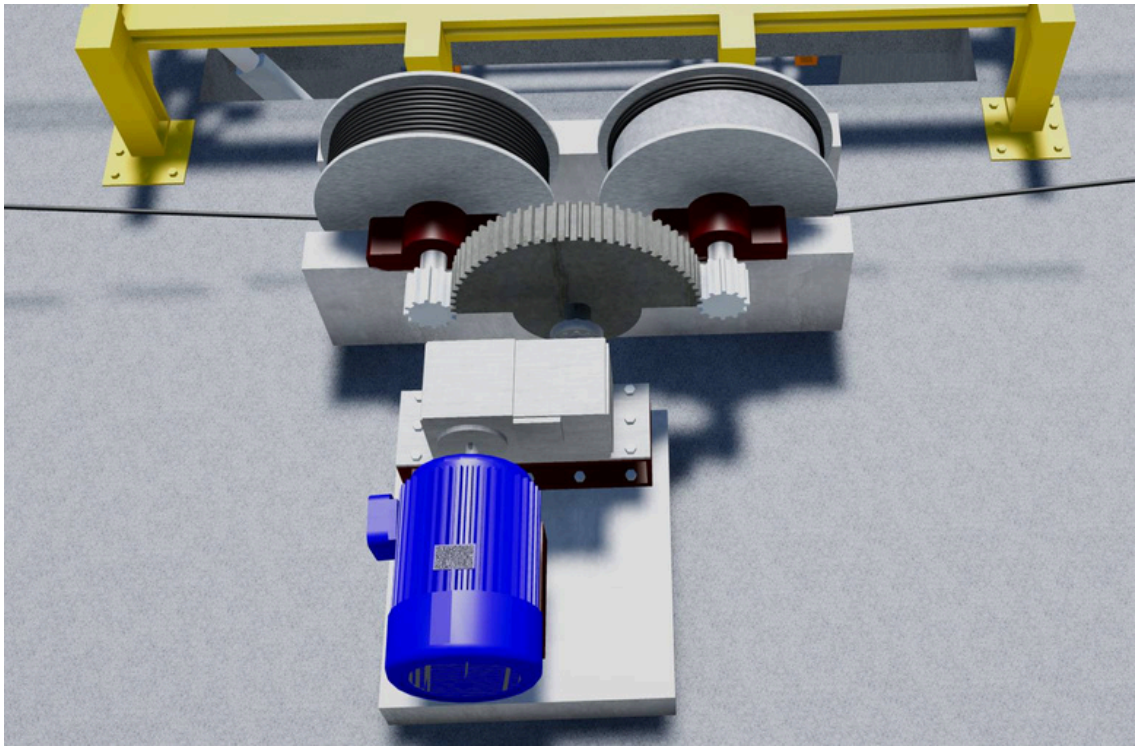
$N_{mot} = 30rpm$

$D_{mot} = 0,9m$

Engrenagem Menor

$N_{mov} = 180rpm$

$$\frac{N_{mot}}{N_{mov}} = \frac{D_{mov}}{D_{mot}} \qquad \frac{30}{180} = \frac{D_{mov}}{0.9} \qquad D_{mov} = 0,15m$$



5.3. Cálculo do Torque no Tambor

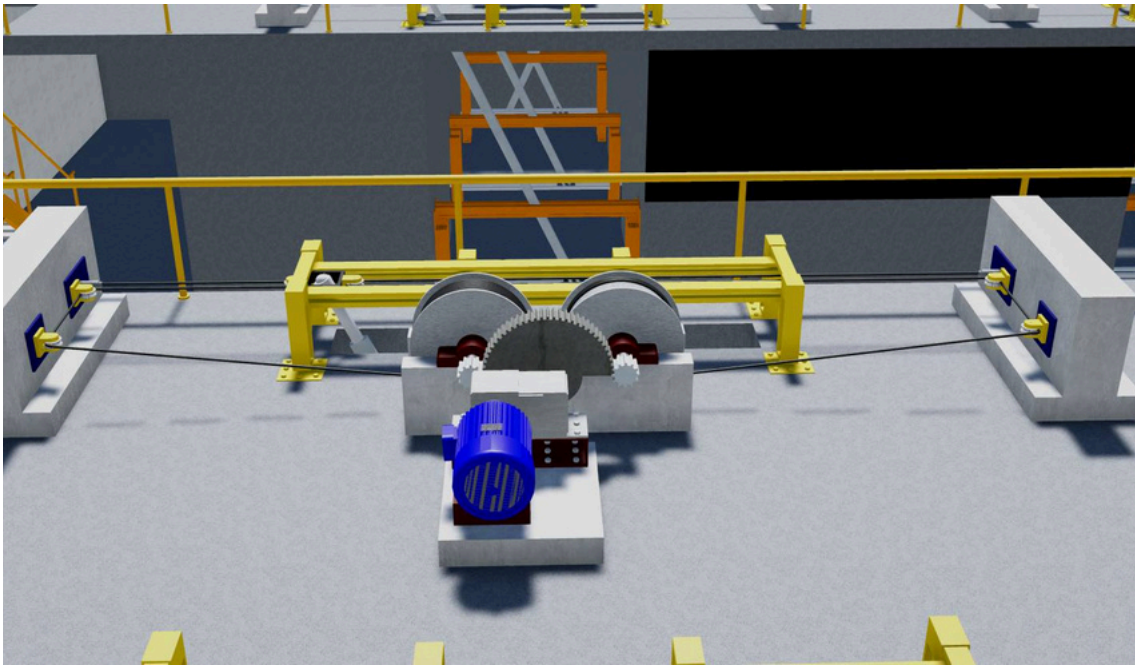
$F_f = 305.678N$
$r = 0,4m$
$f = 3Hz$
$\pi = 3,14$

$T = F \times r$
$T = 305.678 \times 0,4$
$T = 122.271Nm$

$\omega = 2\pi \times f$

$\omega = 2 \times 3,14 \times 3$

$\omega = 18,84rad/s$



5.4. Cálculo da Potência Requerida por Bomba

A potência necessária para o acionamento de cada unidade individual do sistema DLDAPP é calculada com base na força aplicada ao pistão, no curso do pistão e na frequência de operação (número de ciclos por segundo). Esse cálculo também leva em consideração a eficiência mecânica do sistema, as perdas por atrito e a distribuição da carga entre os componentes.

$$T = 122.271Nm$$

$$\omega = 18,84rad/s$$

$$\eta = 0,9$$

$$P = T \times \omega$$

$$P = 122.271 \times 18,84$$

$$P = 2.303.593W$$

$$P_f = \frac{P}{\eta}$$

$$P_f = \frac{2.303.593}{0,9}$$

$$P_f = 2.559.584W$$

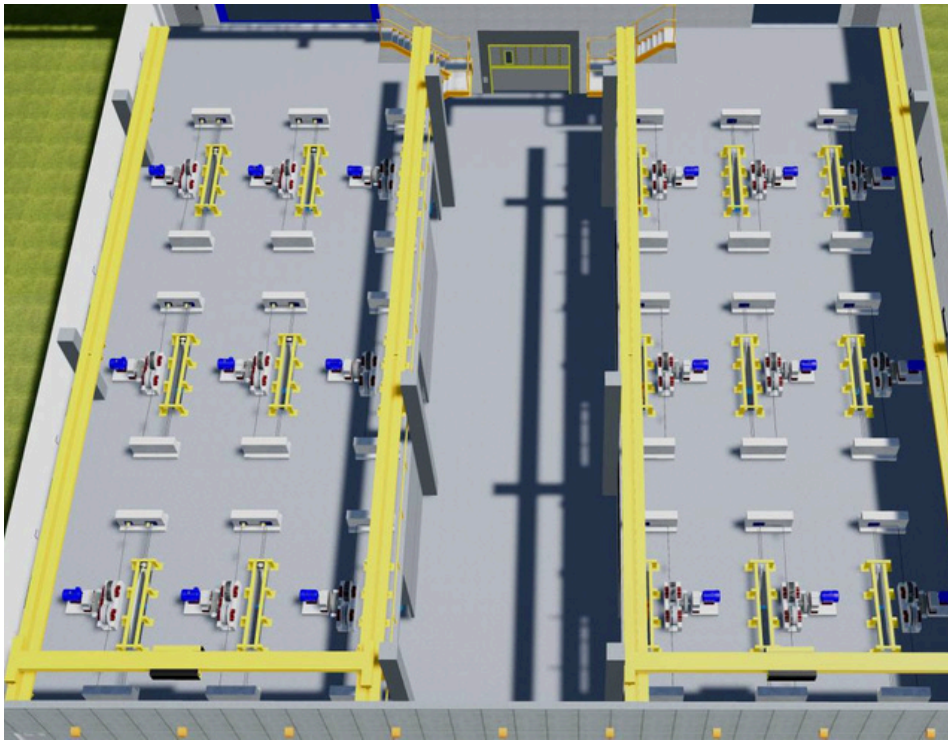
Como o sistema é composto por 18 unidades de bombeamento operando simultaneamente, a potência total requerida é:

$$P_t = 18 \times P_f$$

$$P_t = 18 \times 2.559.548$$

$$P_t = 46.071.868W$$

$$P_t = 46,1MW$$



6. Balanço Energético do Sistema PMTHPP

O sistema PMTHPP, operando com o conjunto integrado de turbinas Francis e Pelton e com o circuito de bombeamento fechado DLDAPP, foi dimensionado para garantir autossuficiência energética, com excedente significativo de energia líquida.

A potência total gerada pelo sistema é a soma das duas turbinas:

$$P_{Pelton} = 68,8MW \qquad P_T = 68,8 + 21,8$$
$$P_{Francis} = 21,8MW \qquad P_T = 90,6MW$$

O consumo total de energia pelas 18 bombas do sistema DLDAPP em operação contínua foi estimado em:

$$P_C = 41,6MW$$

Energia líquida disponível:

$$P_N = P_T - P_C$$
$$P_N = 90,6 - 41,6$$
$$P_N = 44,5MW$$

O sistema opera com um excedente de 44,5 MW, o que comprova sua eficiência energética e viabilidade operacional em ciclo fechado.

A energia gerada pelas turbinas não apenas compensa integralmente o consumo das bombas hidráulicas, mas também entrega uma potência líquida substancial, disponível para comercialização ou uso externo, mantendo o sistema autossustentável sem dependência de fontes energéticas externas.

Conclusão – Sistema DLDAPP e Bombas Hidráulicas

Este relatório apresentou em detalhes o funcionamento, os fundamentos técnicos e os cálculos de dimensionamento do sistema DLDAPP (Duo Leveraged Double Acting Piston Pump), componente central do circuito hidráulico do PMTHPP.

Diferentemente das abordagens tradicionais de bombeamento, o DLDAPP adota um sistema de pistões de dupla ação acionados mecanicamente, com o uso integrado de alavancagem e polias móveis. Essa arquitetura permite uma significativa redução da força necessária para o acionamento dos pistões, sem comprometer a vazão nem a estabilidade operacional, tornando o sistema altamente eficiente sob o ponto de vista mecânico e energético.

Os cálculos foram conduzidos com base em parâmetros físicos reais — incluindo pressão hidrostática, área de pistões, deslocamento volumétrico, torque e potência no tambor — demonstrando que, mesmo em condições de operação em alta profundidade e com grande vazão, o sistema se mantém estável e energeticamente viável. A análise também comprovou que, com os mecanismos de redução mecânica aplicados, o esforço exigido por bomba é amplamente reduzido, tornando possível seu acionamento com motores elétricos de potência compatível.

O sistema DLDAPP comprova que é possível desenvolver uma solução de bombeamento robusta e de alta eficiência sem recorrer a tecnologias rotodinâmicas convencionais. O conceito é especialmente aplicável em projetos de ciclo fechado como o PMTHPP, em que o controle da energia hidráulica e o reaproveitamento de pressão são cruciais para a viabilidade e a sustentabilidade do sistema como um todo.

© 2025 根恩株式会社.All rights reserved.