

REPOTENCIAÇÃO DE UM ROTOR FRANCIS BASEADA EM METODOLOGIAS DE PROJETO PRELIMINAR

Celso Antonio Bittencourt Sales Junior, Ramiro Gustavo Ramirez Camacho

Instituto de Engenharia Mecânica – IEM/UNIFEI, Brasil

celsosalesjunior@unifei.edu.br, ramirez@unifei.edu.br

INTRODUÇÃO

Com o envelhecimento das usinas hidrelétricas e a crescente demanda por energia, a repotenciação tornou-se uma estratégia eficaz para otimizar a geração e estender a vida útil das instalações. Essa intervenção frequentemente envolve o reprojeto de componentes críticos, como o rotor da turbina, determinante para o desempenho hidráulico e a potência gerada. No caso de turbinas Francis, o sucesso da repotenciação depende da flexibilidade do projeto preliminar, pois a nova geometria do rotor deve se adaptar aos componentes já existentes, como a caixa espiral e o distribuidor. Metodologias clássicas como as de Mataix (1975), P. Henry (1990) e Bovet (1970), combinam fundamentos da mecânica dos fluidos com correlações empíricas, porém apresentam limitações quanto à personalização geométrica e à integração com modelagens automatizadas de rotores. Neste contexto, o presente trabalho aplica uma metodologia mais flexível e parametrizável, proposta por Souza (2011), ao reprojeto do rotor de uma turbina real, com foco em viabilizar a repotenciação eficiente por meio de um processo simplificado e compatível com ferramentas computacionais.

METODOLOGIA

As condições de projeto e dimensões originais da usina são: vazão $Q = 1,33 \text{ m}^3/\text{s}$; altura de queda líquida $H = 17,7 \text{ m}$; rotação $n = 750 \text{ rpm}$, rotação específica $n_{qA} = 301$; n° de pás $Z_r = 11$; n° de pás do distribuidor $Z_d = 10$; largura do distribuidor $b_{0,max} = 198 \text{ mm}$; diâmetro máximo da tampa inferior $D_{3e,max} = 0,560 \text{ m}$; diâmetro máximo do cubo $D_{3i} = 0,385 \text{ m}$.

Inicialmente, obtém-se o traçado da superfície média do rotor rebatida no plano vertical (PV), isto é, o canal meridional. As dimensões principais do canal são parametrizadas em funções entre si e, principalmente, do n_{qA} . Dada as convenções apresentadas na Figura 1, calculam-se tais dimensões mediante as Eqs. (1–7). O traçado da coroa (x_i, y_i) e da cinta (x_e, y_e) obedecem às Eqs. (8–13), e equivalem a linhas de corrente (LC) do escoamento. Nas proximidades dos pontos 4i e 4e, tais LC devem ser adaptadas à arcos de círculos, obtendo-se raios r_i e r_e . As arestas de entrada e saída (4i-4e; 5i-5e) são traçadas como linhas equipotenciais (LE), ortogonais às linhas das coroa e cinta em 4i, 4e, 5i e 5e.

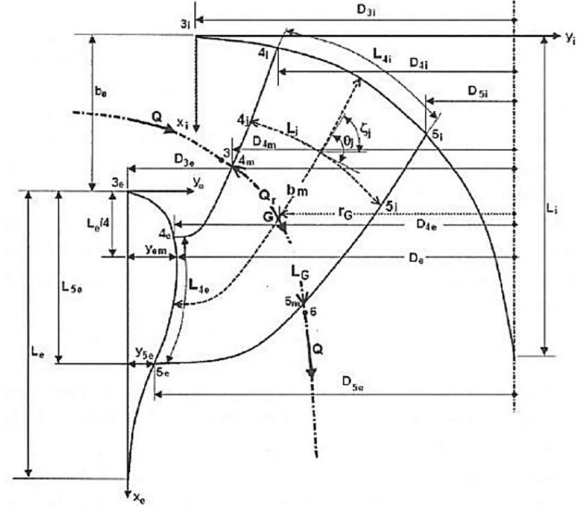


Figura 1.- Superfície média do rotor no PV.

$$D_{5e} = 24,786 \frac{H^{0.5}}{n} + 0,685 \frac{Q^{0.5}}{H^{0.25}} \quad (1)$$

$$b_0 = (0,00168 n_{qA} - 0,0000018 n_{qA}^2) D_{5e} \quad (2)$$

$$D_{3i} = \left(\frac{0,16}{0,00211 n_{qA} + 0,08} \right) \quad (3)$$

$$D_{3e} = (1,255 - 0,00633 n_{qA}) D_{5e} \quad (4)$$

$$D_{4i} = (0,5 - 84,5 n_{qA}^{-1}) D_{5e} \quad (5)$$

$$D_{4e} = (1,025 - 0,0003 n_{qA}) D_{5e} \quad (6)$$

$$D_{5i} = (0,86 - 0,00218 n_{qA}) D_{5e} \quad (7)$$

$$y_{i,j} = 1,54 \cdot D_{3i} \cdot \sqrt{\frac{x_{ij}}{L_i} \cdot \left(1 - \frac{x_{ij}}{L_i}\right)^3} \quad (8)$$

$$L_i = (0,4 + 0,00168 n_{qA} - 0,00000177 n_{qA}^2) D_{5e} \quad (9)$$

$$y_{e,j} = 3,08 \cdot y_{em} \cdot \sqrt{\frac{x_{ej}}{L_e} \cdot \left(1 - \frac{x_{ej}}{L_e}\right)^3} \quad (10)$$

$$y_{em} = \frac{0,162 \cdot (D_{3e} - D_{5e})}{\sqrt{\frac{L_{5e}}{L_e} \cdot \left(1 - \frac{L_{5e}}{L_e}\right)^3}} \quad (11)$$

$$L_e = (0,0000042 n_{qA}^2 - 0,004 n_{qA} + 1,2) D_{5e} \quad (12)$$

$$L_{5e} = (0,26 - 0,00021 \cdot n_{qA}) D_{5e} \quad (13)$$

Após o traçado o canal meridional, procede-se ao cálculo das velocidades absolutas meridionais, média, c_m , e no ponto 4i, c_{m4i} , utilizando Eqs. (14 – 15), onde D_m e a_m são, respectivamente, o diâmetro médio e o valor médio da função $a_j = f(s_j) = \frac{c_{mj}}{c_{m4i}} D_j$. Com isso, é determinar distribuição das velocidades ao longo da aresta de entrada, utilizando a Eq. (16),

onde, s_j corresponde ao comprimento da aresta, medido a partir de $4i$, até um ponto j , e s ao comprimento total da aresta.

$$c_m = \frac{Q}{\pi b_0 D_{3e}} \quad (14)$$

$$c_{m4i} = \frac{c_m D_m}{a_m} \quad (15)$$

$$\ln \left(\frac{c_{mj}}{c_{m4i}} \right) = \frac{s_j}{4 \cdot r_i} \cdot \left[\frac{s_j}{2 \cdot s} \cdot \left(\frac{r_i}{r_e} - 1 \right) + 1 \right] \quad (16)$$

De posse da distribuição de velocidades, traçam-se tubos de corrente (TC) tangentes entre si, de diâmetros b_j , localizados em D_j , de modo que, as vazões parciais k_j correspondentes, calculadas pela Eq. 17, sejam relativamente próximas entre si.

$$k_j = b_j c_{mj} D_j \quad (17)$$

Inicia-se o traçado dos TC pelo TC médio b_m , e então determinam-se os centros dos demais tubos posicionando-os nos pontos médios entre as intersecções superior e inferior do TC médio com a aresta de entrada. Em seguida, tais tubos são traçados, mediante ajustes nas localizações de seus centros e diâmetros, e na posição do traçado da coroa, de modo a garantir as tangências entre si e com a cinta e coroa, bem como a uniformidade das vazões parciais. Na sequência, são traçadas as LC iniciais, observando a concordância com os raios r_i e r_e , bem como a aresta de entrada equivalente a uma LE. As intersecções dessas LC com a aresta de saída determinam os centros dos TC nessa aresta, na qual também deve-se manter a uniformidade da vazão e tangência às LC. Para tanto, as LC devem ser ajustadas iterativamente, resultando em um canal final típico, conforme ilustrado na Figura 2, onde observa-se o ajuste final da coroa interna, das LC e dos TC. Concluído o traçado final na PV, medem-se LG_j , rG_j , e os ângulos θ_j e ζ_j , para então calcular os ângulos relativos β_j de cada LC.

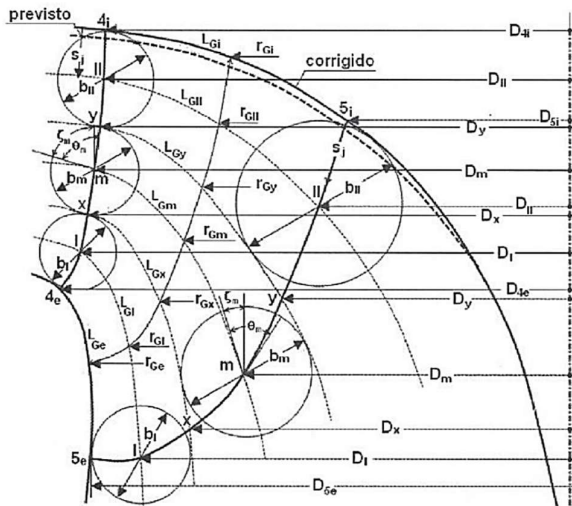


Figura 2.- Traçado final típico do canal meridional no PV.

Com β_j calculados, calculam-se então seus correspondentes na projeção horizontal (PH), β_{hj} , os quais determinam a projeção das LC na PH e as LC em verdadeira grandeza. Para tanto, segue-se o roteiro da Figura 3.

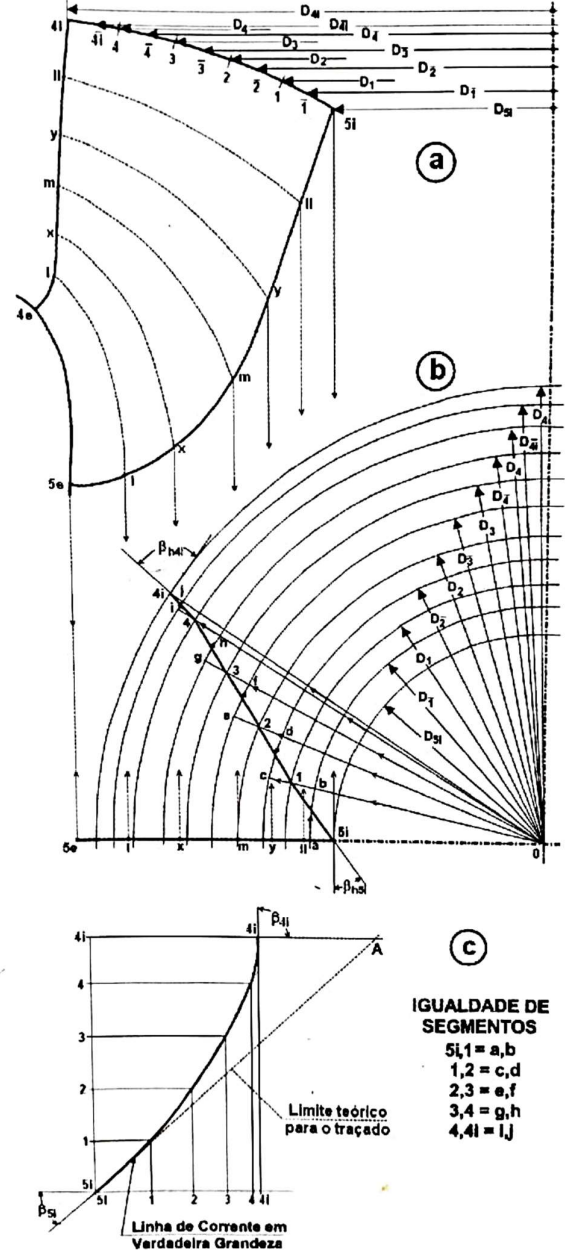


Figura 3.- (a) Divisão das LC no PV. (b) PH das LC. (c) Obtenção da verdadeira grandeza das LC.

Finalmente, com o traçado na PV obtêm-se as coordenadas x,y dos pontos $5i, 1, \dots, 4i$, de todas LC $4i-5i, \dots, 5e-5i$, e, com o traçado na PH, obtêm-se as coordenadas z dos pontos correspondentes no PV, resultando, portanto, nas coordenadas finais da superfície média da pá. A coroa e a cinta são geradas pelo sólido de revolução descrito pelas LC $4i-5i$ e $4e-5e$, respectivamente. Adotando pás de espessura constante, e , esta pode ser calculada pela Eq. (18).

$$e = 0,009 b_m \sqrt{H} \quad (18)$$

RESULTADOS

A espessura calculada foi de aproximadamente 6 mm, que pode ser aproximada para dimensões comerciais de chapas, como 1/4 de polegada. Com os pontos coordenados da superfície média da pá e, realizando uma suavização elíptica nos bordos de ataque e fuga, foi obtida a geometria final da pá. Finalmente, utilizando *softwares CAD* e, considerando as restrições e condições geométricas originais da instalação, foi gerado o modelo final do rotor, ilustrado pela Figura 4.

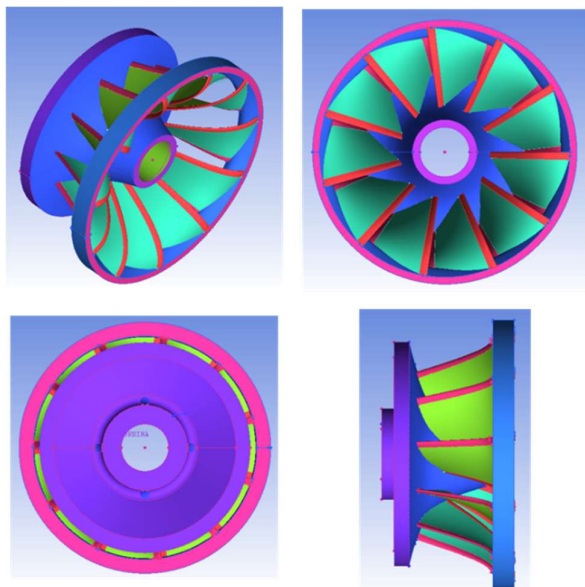


Figura 4.- Rotor final em diferentes vistas.

O diâmetro dos furos de compensação do empuxo axial foi mantido igual ao original, assim como a folga dos labirintos e o diâmetro do eixo. Com isso e, mediante pequenos ajustes, foi possível adequar o rotor projetado aos componentes originais do sistema diretor, tais como as tampas superior e inferior, pás diretrizes do distribuidor, cubo e eixo, conforme a montagem ilustrada pelo desenho em corte na Figura 5.

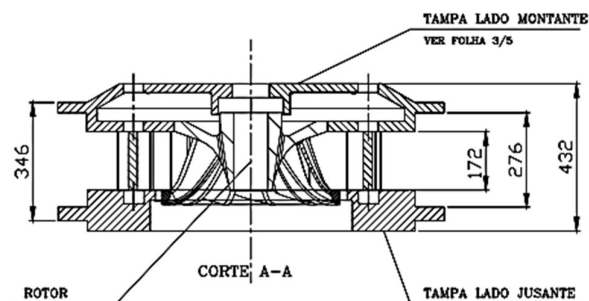


Figura 5.- Montagem em corte Rotor-Sistema diretor.

Finalmente, a potência de eixo máxima estimada foi de aproximadamente 230 kW com um rendimento de superior a 85% no ponto de projeto.

CONCLUSÕES

O reprojeto do rotor foi considerado bem-sucedido, tendo em vista sua adequabilidade aos componentes originais da instalação e similaridade ao rotor original. Ademais, a geração elétrica máxima da instalação original era de aproximadamente 200 kW, o que significa, adotando um rendimento para o gerador elétrico de aproximadamente 90%, um incremento de aproximadamente 5% na geração final, ou seja, 210 kW. O novo rotor encontra-se em processo de fabricação, restando as etapas de acabamento e montagem, conforme ilustrado pela Figura 6.



Figura 6.- Estágio de fabricação atual do novo rotor.

Por fim, a metodologia empregada demonstrou-se flexível a adaptações geométricas e totalmente parametrizável, o que sugere para estudos futuros a implementação de códigos para geração automática de geometrias e, consequentemente, análises de fluidodinâmica computacional (CFD) e procedimentos de otimização.

REFERÊNCIAS

- Bovet M (1970). Le Distributeur de la Turbine Hydraulique A. Réaction Étude de L'Aube Directrice. École Polytechnique. Lausanne, Suisse.
- Mataix C (1975). Turbomáquinas Hidráulicas. Ed. Içai. Madri, Espanha.
- Henry P. (1992). Turbomachines Hydrauliques. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Laussane, Suisse.
- Souza Z. (2011). Projeto de máquinas de fluxo: tomo III, Turbinas hidráulicas com rotores tipo Francis. Ed. Interciência. Rio de Janeiro, Brasil.