



## **TURBINA FRANCIS PARA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA**

---

Projeto final para a disciplina Sistemas Térmicos e Fluídicos (SEM0571).

---

Docentes:

Prof. Cristiano Bigonha Tibiriçá & Prof. Paulo Seleglim Junior

Equipe:

Pedro Otávio Malagutti      NUSP: 11382067

Calvin Suzuki      NUSP: 11232420

Guilherme Soares Silvestre      NUSP: 11299832

Henrique Eiji Hamano      NUSP: 11232389

Caio Brandolim Rovetta      NUSP: 11232156

Mateus Henrique Correa      NUSP: 11372591

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Análise Econométrica</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Análise técnica</b>	<b>5</b>
3.1	Determinando parâmetros . . . . .	5
3.2	Modelando a turbina . . . . .	6
3.3	Modelando as perdas . . . . .	6
3.4	Maximizando a função da eficiência . . . . .	8
3.5	Análise comparativa . . . . .	8
3.6	Análise dimensional . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>10</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>11</b>

# 1 Introdução

Usinas hidrelétricas respondem pela maior parte da geração energética do Brasil, de modo que a otimização do rendimento dessas plantas é fundamental para manter a estabilidade da rede, preservando os níveis de água dos reservatórios, e diminuindo o custo de operação. No presente trabalho, busca-se fazer uma análise multidimensional dos parâmetros de projeto de uma turbina Francis, desde a econometria por trás da implementação nessa escala até a modelagem do funcionamento e dimensionamento de parâmetros gerais da turbina, visando otimizar o rendimento energético mecânico. Serão avaliados também os impactos de parâmetros críticos na eficiência do sistema, direcionando as escolhas do projeto.

## 2 Análise Econométrica

Para a análise econométrica, analisou-se os parâmetros de *CAPEX* (*CAPital EXpenditure*), *OPEX* (*OPERational EXpenditure*), depreciação, *payback*, VPL (Valor Presente Líquido) e TIR (Taxa Interna de Retorno). Além disso, também levaram-se em consideração custos da turbina e gerador, e tarifa de transmissão de energia. Para estimar os parâmetros financeiros, de início, calculou-se o tempo e custo do projeto de uma turbina. Para tal cálculo, estimou-se valores considerando dimensões da turbina Francis. Vale ressaltar que a estimativa de tempo das etapas foi realizada para, posteriormente, ser utilizada na estimativa de custo.

Parâmetro	Tempo (meses)	Custo (R\$)
Projeto	6	16,3 mi
Manufatura	4	56,7 mi
Total	10	73 mi

Figura 2.1: Tempos e custos estimados por etapas

Divisão	Custo (R\$)
Engenheiros	1,5 mi
Licenças de <i>softwares</i>	1 mi
Escritório	300 mil
Laboratórios	1,5 mi
Testes	7 mi
Impostos	5 mi

Figura 2.2: Custos da etapa de projeto

Com as estimativas de custo e tempo realizadas, fez-se um gráfico de custo e lucro por mês para estimar os parâmetros financeiros citados anteriormente.

Neste gráfico, observa-se que no primeiro mês do projeto há um custo elevado devido às licenças de softwares, após isso há uma redução no custo por dois meses. Com isso, há um aumento de custo devido aos testes, seguidos pelo início da manufatura e, conseqüentemente, compra de matéria-prima, usinagem e etc. Por fim, no período de manufatura ainda há grandes

Divisão	Custo (R\$)
Matéria-prima	9,7 mi
Logística	12 mi
Usinagem	13 mi
Mão de obra	3 mi
Outros	3 mi
Impostos	16 mi

Figura 2.3: Custos da etapa de manufatura

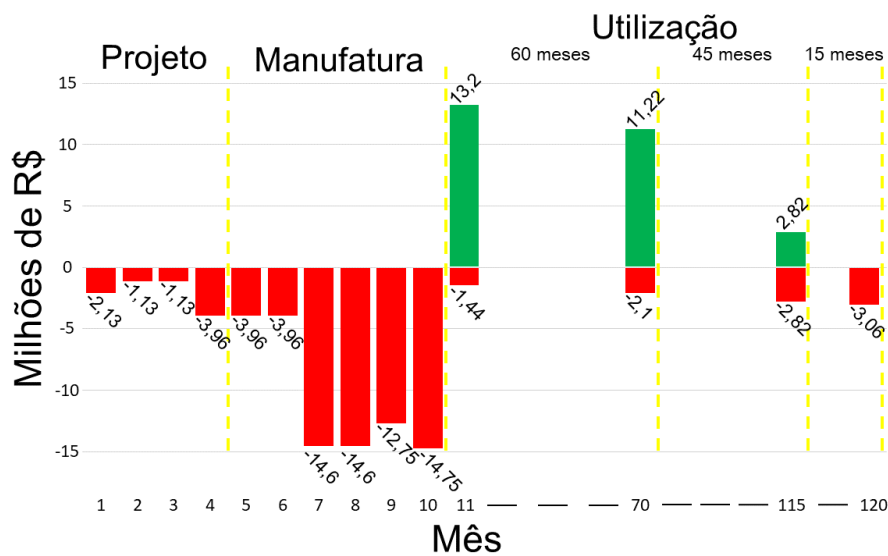


Figura 2.4: Custos e lucros ao longo do tempo

custos como logística de transporte da turbina até o local. Com a instalação da turbina, há um lucro que progressivamente decai por conta da redução de eficiência devido ao desgaste. Após 105 meses, o lucro se torna equivalente aos custos de operação. Dessa forma, após esse tempo de uso, a turbina gerará apenas prejuízo. Com o gráfico de custos e lucros por tempo, foi possível realizar os cálculos dos parâmetros financeiros. Para isso, foram feitas estimativas, assim, para o custo da turbina e gerador levou-se em consideração a proporção de custo e potência entre a turbina e gerador utilizados na hidrelétrica de Itaipu e os utilizados neste projeto, já a tarifa de transmissão de energia foi estimada considerando as médias de venda de energia em leilões, enquanto o *CAPEX*, *OPEX* e *payback* foram obtidos ao observar o gráfico anterior. Por fim, para a depreciação, VPL e TIR foram utilizadas as seguintes equações:

$$Depreciacao = \frac{1}{Vidautil} 100\%$$

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1 + TMA)^j} - Investimento\ inicial$$

, sendo FC o fluxo de caixa, TMA a taxa mínima de atratividade e j o período de cada fluxo de caixa.

$$TIR = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t}$$

, sendo FC o fluxo de caixa e t o tempo de análise.

Parâmetro	Valor
Custo da turbina (R\$)	73.000.000,00
Valor de venda de energia (R\$/MWh)	200
Depreciação (% a.a)	11,42
<u>Payback</u> (M)	98
VPL (R\$)	257.950.029,03
TIR (%)	23

Figura 2.5: Parâmetros financeiros

## 3 Análise técnica

### 3.1 Determinando parâmetros

Para modelar a turbina respeitando os parâmetros fornecidos, consideramos 100 m de desnível fixo e, uma potência nominal de 100 MW. Com base em uma pesquisa de turbinas com características de desempenho semelhantes, optamos por situar a turbina na situação descrita em (3.1), onde a barragem é vertical, possuindo um tubo que leva a água à turbina relativamente curto.

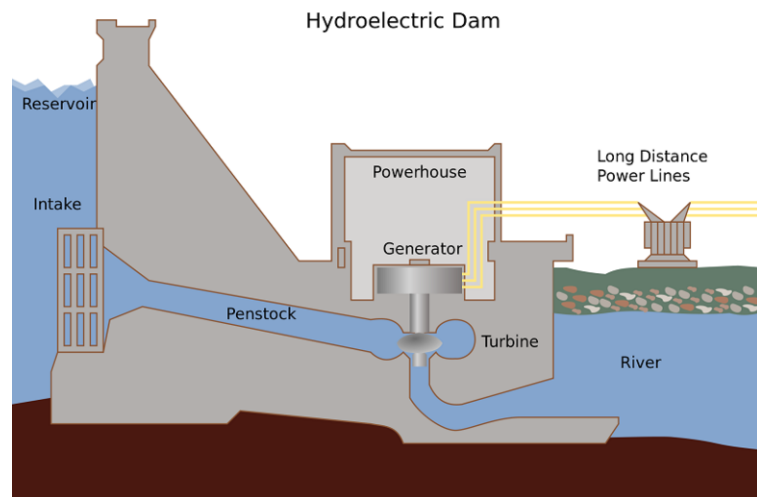


Figura 3.1: Esquema do projeto

A partir desse esquema é possível equacionar o balanço de energia de uma linha de fluxo, partindo de um ponto na superfície do reservatório (ponto 1), com velocidade desprezível até um ponto na superfície do rio (ponto 2) também com velocidade desprezível. Ambos os pontos estão sujeitos à pressão atmosférica.

Utilizando a equação da energia para relacionar os parâmetros de carga hidráulica, carga da turbina e perdas generalizadas

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + gh_t + gh_l$$

Onde  $h_t$  representa a carga entregue pela turbina e,  $h_l$  a perda de carga agregada do sistema.

Assumindo as hipóteses descritas acima, ficamos com

$$(h_1 - h_2) = h_t + h_l$$

### 3.2 Modelando a turbina

De acordo com (HIBBELER, 2014) podemos modelar de forma satisfatória a carga convertida pela turbina

$$h_t = \frac{U_2^2}{g} - \frac{U_2 Q \cot(\beta_2)}{2\pi r_2 b g} - \frac{U_1 V_{t1}}{g}$$

Sendo  $U_1 = \omega r_1$  e  $U_2 = \omega r_2$  e

$$V_{t1} = k V_{r1} = \frac{kQ}{2\pi r_1 b}$$

Onde  $Q$  é a vazão,  $b$  a altura da turbina,  $r_1$  é o raio interno das pás da turbina e  $r_2$  o externo  $k$  representando a parcela da vazão que possui velocidade tangencial à entrada da turbina, assumindo valores constantes entre 0 e 1 (levando em consideração a operação em uma condição estacionária) nesse caso será travado em 0, 1. Por fim,  $\beta_2$  indica o ângulo entre a velocidade relativa de saída do fluido com a velocidade tangencial da pá, nesse caso será travado em 75°.

### 3.3 Modelando as perdas

Utilizando-se da Lei de Poiseuille,

$$\Delta P = \frac{f}{2} \left( \frac{L}{D} \right) \rho V^2$$



onde  $V$  é a velocidade média entre a entrada e a saída da turbina, em que ambas são dadas em termos da vazão.

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{4Q}{\pi d_1^2}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{4Q}{\pi d_2^2}$$

Logo

$$V = \frac{2Q}{\pi} \left( \frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right)$$

A partir dessa relação é possível obter uma aproximação razoável para todas as perdas envolvidas desde a entrada da barragem até a saída para o rio.

Para tanto, será tomada como parâmetro uma turbina da planta hidroelétrica de Furnas, cujas condições de operação nominal são, 90m de desnível, 150MW de potência mecânica e uma vazão de aproximadamente 190m<sup>3</sup>/s. O fator de atrito encontrado para os parâmetros fornecidos, a partir do diagrama de Moody foi  $f = 0,008$ .

Substituindo essas informações na equação da energia (em termos de potência específica)

$$hg = \frac{\dot{W}}{\dot{m}} + \frac{f}{2\rho} \left( \frac{L}{D} \right) \rho V^2$$

Isolando o termo  $\left( \frac{L}{D} \right)$  é obtida uma relação que pode ser utilizada como parâmetro para a perda de carga do sistema a ser projetado, salvo as semelhanças que compartilha com a referência adotada.

$$\left( \frac{L}{D} \right) \approx 180$$

### 3.4 Maximizando a função da eficiência

Tratando se do rendimento da turbina na conversão da energia mecânica da água em potência de eixo, temos:

$$\eta = \frac{100 \times 10^6}{\rho g Q h}$$

A vazão  $Q$  é função implícita de  $d1, d2, r1, r2, w$  e  $b$ .

Foi utilizada a função *fmincon* do Matlab, para encontrar o mínimo do inverso da função da eficiência mostrada acima, maximizando-a, através da manipulação dos seis parâmetros que definem a vazão, sem deixar de respeitar as seguintes restrições:

- $h_t \rho g Q = 100 \times 10^6$
- $r1 < r2$
- A equação da energia deve ser conservada

Seguem os resultados dos parâmetros otimizados:

$$d1 = 7,3m \quad d2 = 7,3m \quad r1 = 4,2m \quad r2 = 8,37m \quad \omega = 35,23rpm \quad b = 2,74m$$

Gerando uma vazão de  $Q = 115,2m^3/s$  e uma eficiência de 83,

### 3.5 Análise comparativa

Tomando novamente uma turbina de furnas como referência, cujos dados são:

$$d1 = 5,2m \quad d2 = 4,5m \quad Q = 190m^3/s \quad \omega = 150rpm \quad \dot{W} = 152MW$$

Ficam evidentes determinadas semelhanças entre o modelo e a turbina real, dado que os diâmetros de entrada e saída estão próximos, e a vazão aparece maior nesse caso, juntamente com a velocidade, condizendo com a potência significativamente maior da referência tomada.

### 3.6 Análise dimensional

Será aplicada uma variação de +50% e -50% em cada parâmetro, enquanto os outros serão travados, em cada caso o valor da eficiência foi levado à zero se as restrições de projeto não forem atendidas (condicional no código) para facilitar a visualização, gerando os gráficos parâmetro x eficiência a seguir:

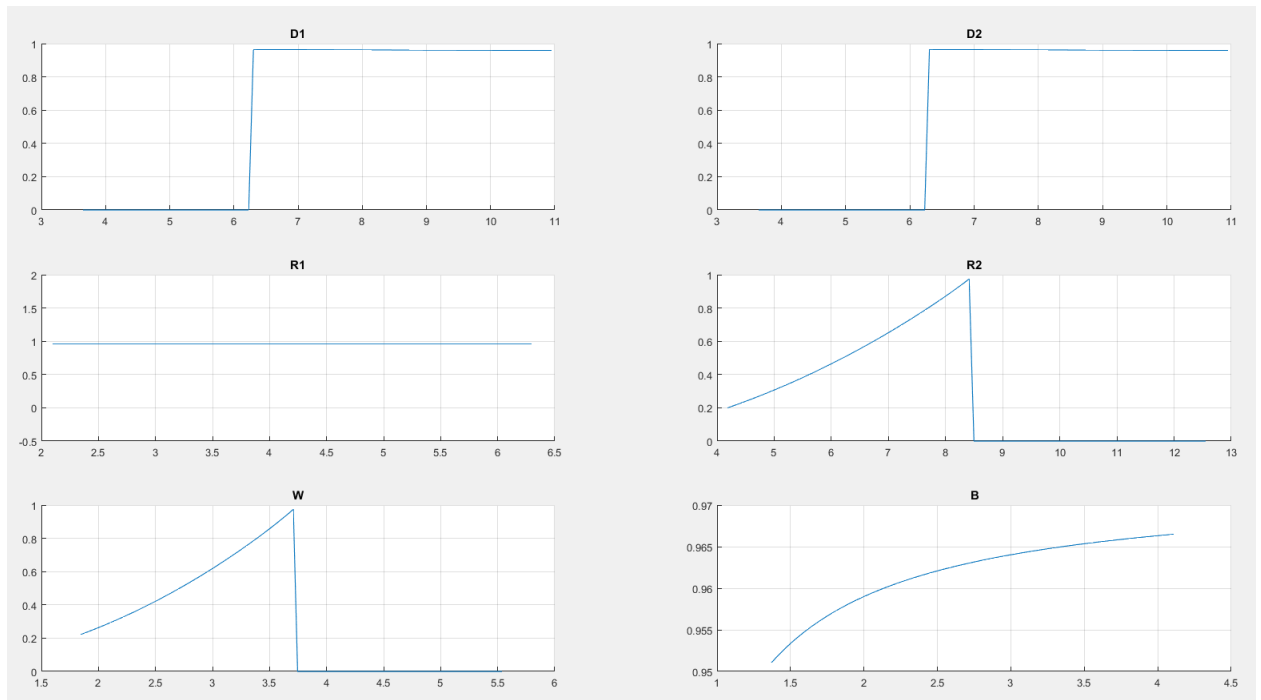


Figura 3.2: Esquema do projeto

Em todos os gráficos, o ponto central é o escolhido pela otimização. Pode-se observar que o ponto central é aquele que maximiza a eficiência em todas as ocasiões,

## **4 Conclusão**

A partir do desenvolvimento do trabalho, conclui-se que é possível modelar de forma satisfatória, para o mérito de uma primeira análise, uma turbina Francis, em parâmetros gerais, respeitando parâmetros de projeto.

## Referências bibliográficas

HIBBELER, R. C. **Fluid Mechanics**. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2014.