



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

“Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças”

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFCG-UFPE

LINGUAGEM JAVA AUXILIA METODOLOGIA DO ENSINO DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE

Tapan K Sen – tapan@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Instituto de Engenharia Mecânica

Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho

37.500.903 – Itajubá – MG

Maris Stela C Silveira – stela@unifei.edu.br

Instituto de Engenharia Mecânica

Leandro M de Moraes – leandromorais@bol.com.br

Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação

Wesley G Siqueira – wesley-unifei@uol.com.br

Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação

***Resumo:** Com a finalidade de adequar-se aos princípios de multidisciplinaridade que tanto se prega nas Universidades de hoje e também ao novo perfil do aluno que nela ingressa, novas metodologias devem ser observadas e aplicadas urgentemente. O ensino deve corresponder às expectativas destes novos alunos que, cada vez mais exigentes, chegam sedentos em aprender. Este trabalho apresenta uma metodologia realizada com os alunos do terceiro ano do curso de Engenharia de Computação, dentro da disciplina de Fenômenos de Transporte que, motivados, mostraram um maior interesse na assimilação do conteúdo apresentado. A proposta do trabalho é mostrar o desenvolvimento de um método computacional para a obtenção da potência máxima disponível para turbinas hidráulicas através da linguagem de programação Java.*

***Palavras-chave:** Metodologia, Software, Potência, Turbinas hidráulicas, Simulação.*

1. INTRODUÇÃO

A disciplina de Fenômenos de Transporte é ministrada tradicionalmente aos alunos dos Cursos de Engenharia da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Com o intuito de motivar os alunos, no caso específico os alunos do Curso de Engenharia de Computação, foram apresentados alguns problemas clássicos de Fenômenos de Transporte e proposto então a resolução dos mesmos, de forma criativa e dinâmica. A turma, dividida em grupos, partiu para o estudo e desenvolvimento dos temas propostos.

Conceitos foram aplicados e as questões propostas solucionadas através da livre escolha de linguagens computacionais para o desenvolvimento de programas.

Neste artigo será apresentado um dos trabalhos dos alunos onde um software foi desenvolvido para simular os resultados do modelo matemático para máxima potência disponível em turbinas de PCH (pequenas centrais hidrelétricas) levando-se em consideração o fator de atrito, que não é constante, e a rugosidade da canalização, que é variável em função do tempo de serviço. Este trabalho certamente veio contribuir para a formação do aluno que alerta deve estar preparado para enfrentar desafios.

2. BREVE HISTÓRICO

NEVES (1974) e DOUGLAS et all (1979) mostraram que é possível obter a máxima potência de instalação hidrelétrica quando a perda de carga é igual a um terço da queda bruta. O rendimento da canalização seria de 66,7% como transmissor de energia. Em suas publicações, a expressão da condição de máxima potência foi considerada independente do fator de atrito e o aumento da rugosidade da canalização em função do tempo de serviço foi desconsiderado.

GARCEZ (1970) demonstrou a fórmula de Bresse que leva a uma solução aproximada do diâmetro econômico que serve para o pré-dimensionamento de um conduto de recalque. No seu livro, a expressão da condição mínima do custo (diâmetro econômico) foi considerada independente do fator de atrito e o aumento da rugosidade não foi considerado.

RICCI (1981) desenvolveu o modelo para cálculo da receita líquida de central hidrelétrica e chegou a deduzir a equação do diâmetro econômico que parece com a fórmula de Bondschu, porém mais exata, e que permite calcular com facilidade o diâmetro mais conveniente. Na sua análise, as duas razões acima citadas não foram consideradas.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Modelo matemático

A aplicação da equação de Bernoulli fornece a energia por unidade de peso em instalações hidrelétricas como a ilustrada na Figura 1.

$$H_B - hp = H_e \quad (1)$$

onde :

H_B = queda bruta correspondente ao desnível dos pontos de montante e jusante;

H_e = altura efetiva que a turbina aproveita;

hp = perda de carga (perda hidráulica).

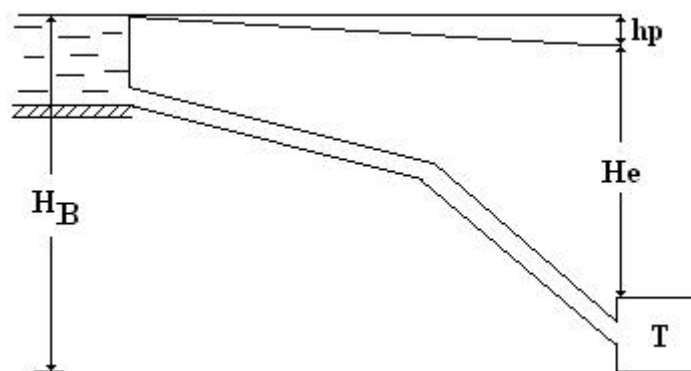


Figura 1 – Instalação Hidrelétrica

A potência recebida ou teórica gerada pela turbina é:

$$N = g \cdot Q \cdot H_e = g \cdot Q \cdot (H_B - hp) [kW] \quad (2)$$

onde:

N = potência disponível em turbina (recebida pela turbina);

g = aceleração da gravidade;

Q = vazão volumétrica (descarga hídrica) pela tubulação.

Com a equação da perda de carga de Darcy-Weisbach, de acordo com STREETER e WYLIE (1982), e a equação da continuidade, a equação (2) pode ser escrita como:

$$N = g \cdot Q \cdot \left(H_B - \frac{8 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot f \right) [kW] \quad (3)$$

onde:

L = comprimento da canalização;

D = diâmetro da canalização;

f = fator de atrito.

Esta é a equação fundamental para a potência disponível em turbinas hidráulicas. A condição de máxima potência pode ser determinada através da relação apresentada a seguir:

$$\frac{dN}{dQ} = 0 \therefore \frac{dN}{dQ} = \frac{d}{dQ} \left[g \cdot Q \cdot H_B - \frac{8 \cdot Q^3 \cdot L}{\pi^2 \cdot D^5} \cdot f \right] = 0 \quad (4)$$

Se o fator de atrito, f , for independente de Q , de acordo com GARCEZ (1970), NEVES (1974), DOUGLAS et all (1979) e RICCI (1981), chega-se à seguinte expressão:

$$H_B = 3 \cdot \left[\frac{8 \cdot Q^2 \cdot L \cdot f}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \right] = 3 \cdot hp \quad (5)$$

Portanto, a máxima potência é obtida quando a perda de carga for igual a um terço da queda bruta.

Mas o fator de atrito não é independente de Q , pois sabe-se que:

$$f = f\left(RE, \frac{\varepsilon}{D} \right) = f\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D \cdot \nu}, \frac{\varepsilon}{D} \right) \quad (6)$$

onde:

RE = número de Reynolds;

ε = rugosidade absoluta da canalização;

ν = viscosidade cinemática d'água.

STREETER e WYLIE (1982) mencionam que, conforme Swamee e Jain, a equação do fator de atrito explícita para f , dentro das restrições impostas, é:

$$f = \frac{1,325}{\left[\text{Ln} \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{RE^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \begin{array}{l} 10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2} \\ 5000 \leq RE \leq 10^8 \end{array} \quad (7)$$

A equação (7) fornece um valor de f que difere menos de 1% daquele dado pela equação de Colebrook-White, que é a base para o diagrama de Moody e portanto pode ser escrita como:

$$f = \frac{1,325}{\left[\text{Ln} \left(\frac{\varepsilon}{3,7} \cdot D^{-1} + 5,74 \cdot \left(\frac{\pi \cdot v \cdot D}{4} \right)^{0,9} \cdot Q^{-0,9} \right) \right]^2} = \frac{1,325}{\left[\text{Ln}(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \right]^2} \quad (8)$$

onde: $k_1 = \frac{\varepsilon}{3,7} \cdot D^{-1}$

$$k_2 = 5,74 \cdot \left(\frac{\pi \cdot v \cdot D}{4} \right)^{0,9}$$

Levando equação (8) na equação (3) obtém-se a potência disponível em turbina:

$$N = g \cdot \left\{ H_B \cdot Q - \frac{10,6 \cdot L \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5 \cdot \left[\text{Ln}(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \right]^2} \right\} [kW] \quad (9)$$

A equação (9) é a equação genérica para a potência disponível em turbinas de PCH. Analisando esta equação, pode-se dizer que, quando a vazão volumétrica for mínima, isto é, nula, a altura efetiva é a máxima, mas a turbina não recebe potência, o que pode ser visualizado na Figura 2. Quando a vazão volumétrica for máxima, a altura efetiva é a mínima, a potência não será transmitida. Para os valores intermediários de Q , ambos Q e H_e terão valores positivos e a potência será transmitida. No entanto, deve existir um valor de Q para que a potência seja máxima.

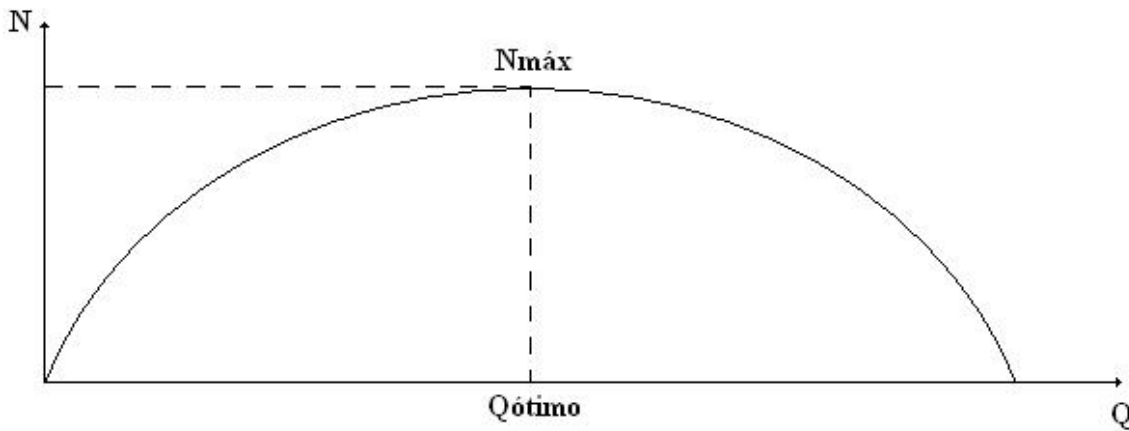


Figura 2 – Comportamento da equação (9)

Para uma instalação cujo sistema adutor tem um dado diâmetro D , a condição da máxima potência pode ser determinada substituindo a equação (7) na equação (4), como pode ser visto na equação (10).

$$\frac{dN}{dQ} = \frac{d}{dQ} \left[g \cdot \left\{ H_B \cdot Q - \frac{10,6 \cdot L \cdot Q^3}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5 \cdot \left[\text{Ln}(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \right]^2} \right\} \right] = 0 \quad (10)$$

Diferenciando em relação a Q e resolvendo para H_B , obtém-se a condição de máxima potência disponível em turbinas de PCH:

$$H_B = 3 \cdot \frac{10,6 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5 \cdot [Ln(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9})]^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{0,6 \cdot k_2 \cdot Q^{-0,9}}{(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \cdot Ln(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9})} \right\} \quad (11)$$

Levando a equação (11) na equação (9) tem-se a máxima potência disponível em turbinas de PCH:

$$N_{m\acute{a}x} = g \cdot Q \cdot h_p \cdot \left\{ 2 + \frac{1,8 \cdot k_2 \cdot Q^{-0,9}}{(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \cdot Ln(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9})} \right\} [kW] \quad (12)$$

onde: $h_p = \frac{10,6 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5 \cdot [Ln(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9})]^2}$, k_1 e k_2 já definidos na equação (8)

A rugosidade absoluta, ε , em função de tempo, de acordo com GARCEZ (1970), é dada pela equação:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha \cdot T \quad (13)$$

onde: ε_0 = rugosidade absoluta da canalização nova;

α = taxa média de aumento da rugosidade ao ano = 0,8 mm/ano;

T = tempo de serviço [ano].

O rendimento de transmissão, isto é, rendimento da canalização como transportadora de energia, η_c , conforme DOUGLAS et all (1979), é dado pela equação:

$$\eta_c = 1 - \frac{h_p}{H_B} \quad (14)$$

Levando o valor de h_p e a equação (11) na equação (14) pode-se obter o rendimento ótimo da canalização:

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{3} \cdot \left\{ 1 + \frac{0,6 \cdot k_2 \cdot Q^{-0,9}}{(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9}) \cdot Ln(k_1 + k_2 \cdot Q^{-0,9})} \right\}^{-1} \quad (15)$$

3.2 Software de simulação

O software foi desenvolvido em Java por ser uma linguagem de programação altamente portátil para qualquer sistema operacional e por possuir documentação de fácil acesso e gratuito.

A interface do software permite ao usuário entrar com os dados necessários aos cálculos:

- Queda bruta (HB) em metros;
- Diâmetro da canalização (D) em metros;
- Taxa média de aumento da rugosidade (a) em milímetros por ano;
- Comprimento da canalização (L) em metros;
- Rugosidade da canalização nova (Eo) em milímetros;
- Gravidade local (g) em metros por segundo ao quadrado.

O software disponibiliza de dois tipos de respostas diferentes: uma tabela e um gráfico. A tabela mostra os resultados para cada ano (T) de 0 (zero) a 10 anos para seguintes variáveis:

- $N_{máx}$ – Potência máxima disponível em [kW] segundo a equação (9);
- $Q_{ót}$ – Vazão ótima em [m³/s];
- RE – Número de Reynolds;
- f – Fator de atrito;
- E – Rugosidade da canalização em [m];
- h_p – perda de carga em [m];
- η_c – Rendimento ótimo da canalização em [%];
- $N_{máx}$ – Potencia máxima disponível em [kW] segundo a equação (12).

No software, as variáveis E , E_o , η_c e HB representam, respectivamente, as variáveis ε , ε_o , η_c e H_B no modelo matemático. O valor utilizado para viscosidade cinemática da água foi igual a $\nu = 1 \times 10^{-6}$ [m²/s].

A Figura 3 ilustra a interface do software com o usuário, disponibilizando uma área de entrada de dados, uma tabela de saída, um botão para calcular valores da tabela, a partir dos dados de entrada já digitados, um botão para plotar o gráfico Potência *versus* Vazão ($N \times Q$) e um menu que contém as mesmas funcionalidades dos botões, além da opção para sair do programa.

Para calcular todos os valores da tabela foi necessário inicialmente o valor da vazão ótima ($Q_{ótimo}$) que é determinada pela derivada da potência (N) da equação (9) com relação à vazão (Q), visualizada na equação (10). O algoritmo que resolve esta derivada foi iterativo igualando a equação (10) a uma variável temporária e variando a vazão Q até que esta derivada fosse bem próxima a zero. A partir daí tendo $Q_{ótimo}$ e com ele em mãos, calculam-se todas as outras variáveis da tabela, mostradas na tabela da Figura 4.

O gráfico representa o comportamento da potência disponível (N) com a variação da vazão (Q) na canalização para T (tempo de serviço em anos) variando de 0 (zero) a 10. O gráfico também mostra os pontos onde ocorre a vazão ótima ($Q_{ótimo}$) e, conseqüentemente, onde ocorre a potência máxima disponível para turbinas hidráulicas.

Potencia Máxima Disponível em Turbinas de PCH

Janela

Dados de Entrada / Tabela e Gráfico da máxima potência disponível

Queda bruta (HB) - [m]		Comprimento da canalização (L) - [m]	
Diâmetro da canalização (D) - [m]		Rugosidade da canalização nova (Eo) - [mm]	
Taxa média de aumento da rugosidade (a) - [mm/ano]		Gravidade local (g) - [m/s ²]	

Calcular Tabela

T/[ano]	N _{máx} Eq. 9	Q _{ót} /[m ³ /s]	RE	f	E/[m]	h _p /[m]	nc/[%]	N _{máx} Eq. 12
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Plotar Gráfico

Figura 3 – Tela inicial do software

4. RESULTADOS

4.1 Dados de Entrada

Para um exemplo típico, o primeiro conjunto de equações (equação (9), equação (12) e equação (15)) e o segundo conjunto de equações (equação (11), equação (12) e equação (15)) foram resolvidos através do software desenvolvido para o trabalho. A metodologia utilizada no desenvolvimento do software, bem como os resultados obtidos, serão apresentados neste tópico.

Os dados de entrada do software, necessários para a geração da tabela e do gráfico, são:

- Queda bruta: $H_B = 30$ [m];
- Comprimento da canalização: $L = 800$ [m];
- Diâmetro da canalização: $D = 1$ [m];
- Rugosidade média (tubos de chapa de aço soldada, novos, sem revestimento) da canalização nova: $E_0 = 0,00007$ [m];
- Taxa média de aumento da rugosidade: $\alpha = 0,8$ [mm/ano];
- Aceleração da gravidade : $g = 9,81$ [m/s²].

4.2 Metodologia de Solução

Com estes dados de entrada, a equação (12) não pode ser resolvida sozinha para $N_{máx}$, pois esta equação representa o ponto máximo ($N_{máx}$, $Q_{ótimo}$). Para se resolver $N_{máx}$ pela equação (12) deve-se saber o valor de $Q_{ótimo}$. Isto pode facilmente ser determinado pela derivada da equação (9), mostrada na equação (10).

O comportamento genérico de qualquer instalação pela equação (9) é que a máxima potência ($N_{máx}$) e a vazão volumétrica ótima ($Q_{ótimo}$) diminuem em função do tempo (T) como é mostrado na Figura 4.

4.3 Resultados

Os resultados, em forma de tabela e gráfico, conforme Figura 4 e Figura 5, respectivamente, mostram que a máxima potência disponível é obtida quando a perda de carga é aproximadamente igual a um terço da queda bruta. Porém, na prática, não é econômico fazê-las operar dessa maneira. Adota-se, conforme GARCEZ (1970), a perda de carga de 2% para as pequenas quedas brutas. Portanto uma equação, apropriada exata matematicamente do diâmetro econômico, deve ser desenvolvida de sorte que a vazão ótima em função do tempo de serviço possa ser calculada e então a máxima potência, disponível ou gerada em função do tempo de serviço, pode ser prevista o que poderia ser uma sugestão de outro trabalho.

Quanto a um conduto de recalque que envolve bombeamento d'água com a equação (7) pode ser desenvolvida uma expressão nova, porém mais exata, para o diâmetro econômico, e seria a equação modificada de Bresse.

Se o objetivo de instalações de PCHs for utilizar a disponibilidade de máxima potência, a vazão deve ser controlada por meio de comportas, vertedores e/ou válvulas bem projetadas. A vida útil das instalações nas condições de disponibilidade máxima pode ser determinada pela equação (9) ou pela equação (12).

Potencia Máxima Disponível em Turbinas de PCH

Janela

Dados de Entrada / Tabela e Gráfico da máxima potência disponível

Queda bruta (HB) - [m]	30	Comprimento da canalização (L) - [m]	800
Diametro do canalização (D) - [m]	1	Rugosidade da canalização nova (Eo) - [mm]	7.0E-5
Taxa média de aumento da rugosidade (a) - [mm/ano]	8.0E-4	Gravidade local (g) - [m/s²]	9.81

Calcular Tabela

T / [ano]	Nmáx Eq. 9	Qót / [m³/s]	RE	f	E / [m]	hp / [m]	nc / [s]	Nmáx Eq. 12
0	703,147 [kW]	3,608	4,567E6	1,178E-2	7E-5	10,135	6,622E1	703,161 [kW]
1	551,901 [kW]	2,816	3,564E6	1,912E-2	8,7E-4	10,022	6,659E1	551,921 [kW]
2	509,553 [kW]	2,599	3,289E6	2,243E-2	1,67E-3	10,014	6,662E1	509,575 [kW]
3	483,936 [kW]	2,468	3,123E6	2,487E-2	2,47E-3	10,010	6,663E1	483,950 [kW]
4	465,511 [kW]	2,374	3,004E6	2,687E-2	3,27E-3	10,008	6,664E1	465,534 [kW]
5	451,111 [kW]	2,300	2,911E6	2,862E-2	4,07E-3	10,007	6,664E1	451,134 [kW]
6	439,290 [kW]	2,240	2,835E6	3,018E-2	4,87E-3	10,006	6,665E1	439,304 [kW]
7	429,262 [kW]	2,189	2,77E6	3,16E-2	5,67E-3	10,006	6,665E1	429,274 [kW]
8	420,554 [kW]	2,144	2,714E6	3,293E-2	6,47E-3	10,005	6,665E1	420,570 [kW]
9	412,858 [kW]	2,105	2,664E6	3,417E-2	7,27E-3	10,005	6,665E1	412,871 [kW]
10	405,964 [kW]	2,070	2,619E6	3,534E-2	8,07E-3	10,005	6,665E1	405,988 [kW]

Plotar Gráfico

Figura 4 – Tabela contendo os resultados obtidos.

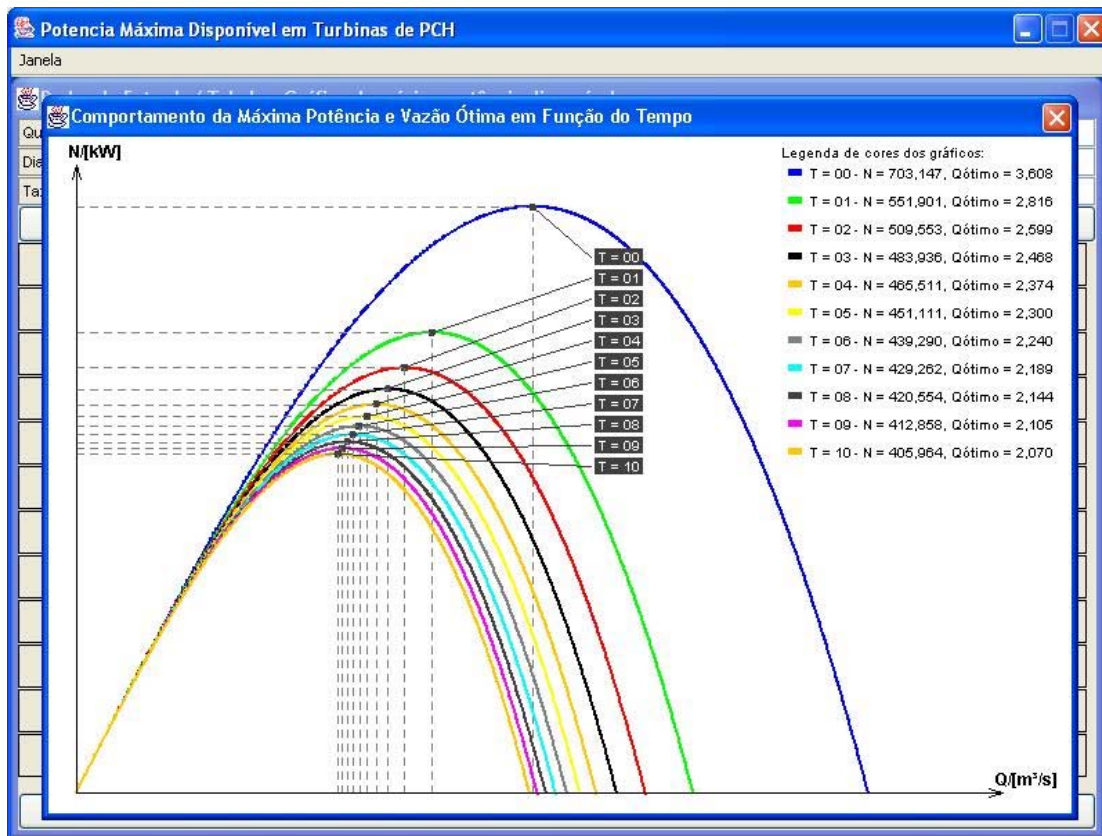


Figura 5 – Gráfico Potência versus Vazão

5. CONCLUSÕES

Esta proposta de trabalho foi motivadora para os alunos, do Curso de Engenharia de Computação, que puderam aplicar os conceitos computacionais, adquiridos ao longo do curso, na disciplina Fenômenos de Transporte tornando-a mais atrativa. Esta disciplina, ofertada no terceiro ano, faz parte da grade curricular e muitas vezes é encarada pelos alunos como uma disciplina distante da realidade profissional do engenheiro de computação. Mudar esta mentalidade e fazê-los enxergar os desafios a que serão submetidos, foi realmente um ponto positivo deste trabalho. A turma amadurecida entendeu que processos industriais precisam ser monitorados, automatizados e metodologias desenvolvidas independentemente de problemas específicos da área de atuação.

6. BIBLIOGRAFIA

DOUGLAS, J. F. ; GASIOREK, J. M. ; SWAFFIELD, J. A. **Fluid Mechanics**. London: Pitman Publishing Limited, 1979.

GARCEZ, L. N. **Elementos da Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher Ltda., 1970.

NEVES, E. T. **Curso de Hidráulica**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1974.

RICCI, J. B. **Pesquisa do Diâmetro Econômico de Tubulações a Plena Secção com Vistas em Especial a Tubulações Adutoras de Centrais Hidrelétricas** - Parte 1: Revista EFEI Pesquisa. Itajubá, 1981, v. 7, n. 2, p. 05-10.

STREETER, V. L. ; WYLIE, E. B. **Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1982.

JAVA LANGUAGE AIDS TEACHING METHODOLOGY IN TRANSPORT PHENOMENON

Abstract: *The multidiscipline principles of teaching in the Universities must pay attention and correspond to the new profile of student. Therefore, new methodologies must be observed and applied urgently in order to fulfil the strong education-desire of students. This paper shows a methodology realized with the third year's students of Computer Engineering within the discipline Transport Phenomenon. The principal theme of this paper is to develop a computational method in order to obtain the maximum available power in hydraulic turbines through Java language.*

Key-words: *Methodology, Software, Power, Hydraulic Turbine, Simulation.*