UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE OPERAÇÕES E PROJETOS INDUSTRIAIS

Determinação de um Simulador de uma Unidade de Transferência

Nome: *Pedro Henrique de Farias Machado*

Disciplina: *Aplicações Computacionais em Engenharia de Processos*
Professores: *André Hemerly e André Nahes*
Data: *02 de Janeiro de 2023*

Proposta

Desenvolver um programa capaz de determinar a vazão que pode ser transferida entre dois tanques atmosféricos, assumindo que os seguintes dados serão fornecidos pelo usuário:

- Altura de líquido nos tanques
- Massa específica e viscosidade do fluido
- Diâmetro interno, comprimento e rugosidade da linha
- Quantidade e tipo dos acidentes presentes
- Curva da bomba

O resultado deve conter:

- Vazão de líquido transportado
- Gráfico apresentando a curva da bomba, a curva do sistema e o ponto de operação

Modelagem

Tomando a equação de Bernoulli modificada entre dois pontos localizados na superfície dos tanques:

$$H_s = \left(\frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho g}\right) - \left(\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho g}\right) + H_T \tag{1}$$

Assumindo então que o volume de ambos os tanques é muito maior que o volume transportado, de forma que não há velocidade significativa de movimentação do nível dos tanques, e que ambos estão a mesma pressão, já que são atmosféricos, nossa equação se resume aos seguintes termos:

$$H_s = (h_2 - h_2) + H_T \tag{2}$$

Onde o termo H_T refere-se às perdas de carga durante o trajeto de um tanque ao outro, podendo ser descrito da seguinte forma:

$$H_T = \frac{f(L + L_c)Q^2}{2\pi^2 D^5 g} \tag{3}$$

O fator de atrito f por sua vez pode ser determinado a partir de diferentes equações a depender do regime do fluxo (laminar ou turbulento) e do tubo ser liso ou não. Para isso, usaremos as 3 equações a seguir:

- Laminar (Re < 2100):
$$f = \frac{64}{Re} \tag{4}$$
- Turbulento (Re > 2100) e tubo liso (ϵ = 0):
$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \tag{5}$$
- Turbulento (Re > 2100) e tubo rugoso (ϵ > 0). Nesse caso o cálculo do fator de atrito será feito iterativamente, tomando como chute inicial o valor de 0.1:
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log_{10}\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{6}$$

Como os valores de h_1 (altura de líquido no tanque sucção), h_2 (altura de líquido no tanque de descarga), L (comprimento da linha), L_c (comprimento equivalente associado a perdas por acessórios), D (diâmetro interno da linha), ϵ (rugosidade da linha), além de μ e ρ (para o cálculo de Re) serão dados de entrada, temos todas as informações necessárias para descrever a curva do nosso sistema (H_s *vs.* Q).

Sabendo que os pontos relativos a curva da bomba serão dados de entrada, podemos fazer um ajuste polinomial, de forma que tenhamos a curva da bomba no seguinte formato, assumindo um comportamento quadrático:

$$H_b = aQ^2 + bQ + c \tag{7}$$

Munidos da descrição das curvas do sistema e da bomba, sabemos que o ponto de operação se dá exatamente pelo encontro das duas, de forma que a vazão de operação será tal que:

$$H_s(Q_{op}) - H_b(Q_{op}) = 0 \tag{8}$$

Sendo assim, podemos definir a seguinte função objetivo, que resolveremos iterativamente até que seu valor se aproxime de zero:

$$f_{obj}(Q) = H_s(Q) - H_b(Q) \tag{9}$$

Como é esperado que as curvas se cruzem, usaremos o valor médio das vazões de especificação da bomba como chute inicial.

Resultados

Os resultados foram obtidos para um problema teste, gerado a partir de um exemplo dado em aula durante a disciplina de *Fenômenos de Transferência I*. O enunciado modificado é o que segue:

Água é bombeada de um reservatório até uma caixa d'água no topo de um edifício, mediante uma bomba centrífuga. A diferença de elevação entre as duas superfícies da água é de 40 m. A caixa d'água tem um respiro para a atmosfera e o nível da água é constante. O sistema de dutos, do reservatório até a bomba é constituído por 120 m de tubo de aço série 40 de 6 in, 5 joelhos de 90° e duas válvulas gaveta completamente abertas. A água está a 25°C, sendo a massa específica e a viscosidade dinâmica da água nessa temperatura aproximadamente igual a 1000 kg/m^3 e 0.001 $Pa \cdot s$, respectivamente. Calcule a vazão de operação do sistema e faça um gráfico contendo a curva do sistema, a curva da bomba e o ponto de operação. Assuma que o sistema de bombeamento é composto por uma bomba *BC-21 2 x 1.1/2* com diâmetro de rotor de 149 *mm* e que a rugosidade da linha é de 0.46.

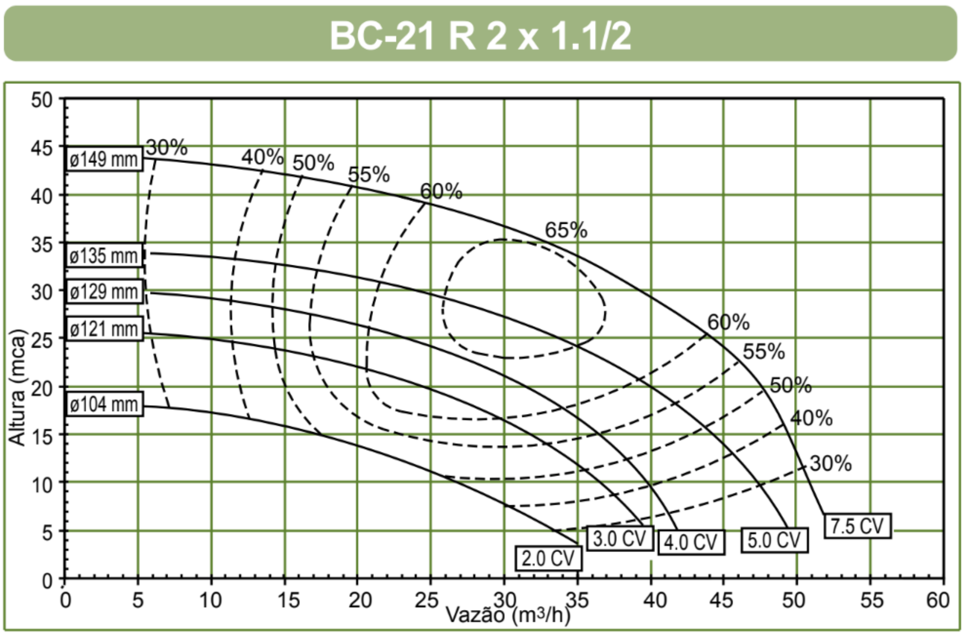

Figura 1: Curva da bomba BC-21 2 x 1.1/2 com diferentes diâmetros de rotor.

Os resultado gerado pelo programa desenvolvido foi:

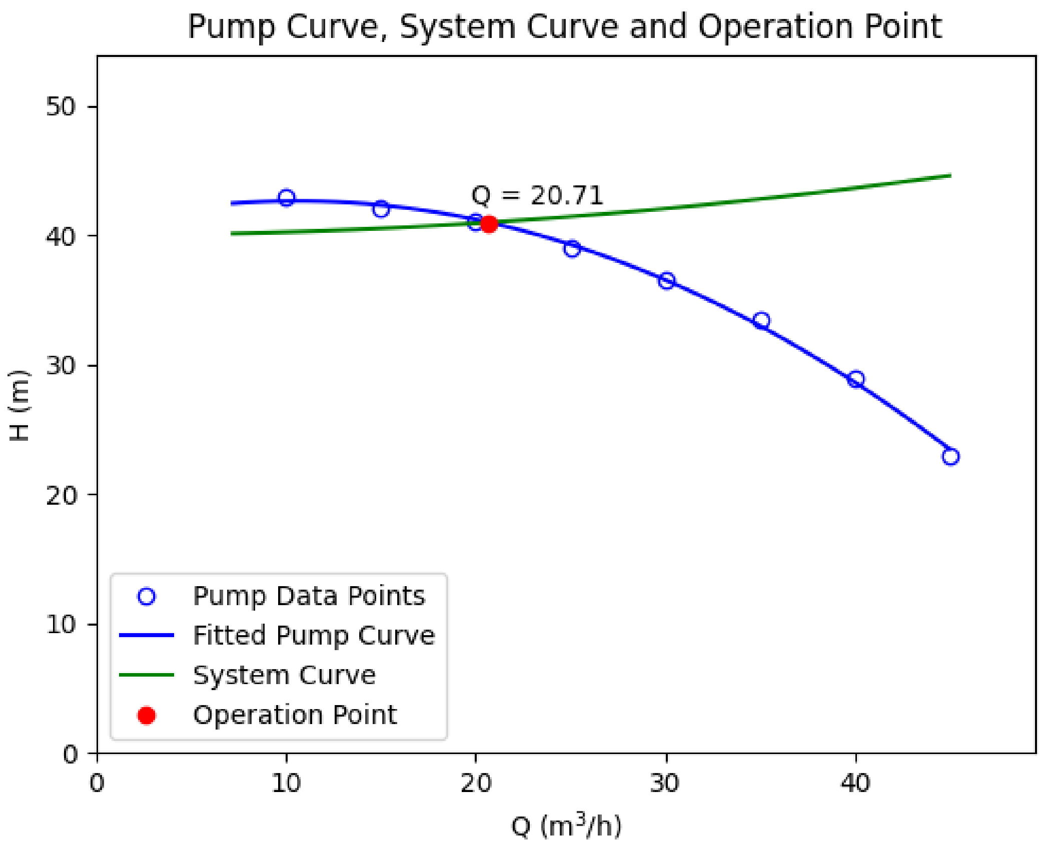

Figura 2: Resultado gerado pelo programa.

Validação

A validação das funções de avaliação do input foram feitas aplicando-as a diversos inputs diferentes, como pode ser visto abaixo do trecho *__name__* == "*__main__*" do arquivo *src/input_validator.py*.

Para os cálculos, a validação foi feita apenas observando os valores atualizados a cada iteração (fator de atrito, por ser função de Q, e o próprio Q) , além do resultado final. Foi assumido que os valores estavam corretos quando eram fisicamente razoáveis, como é o caso do exemplo apresentado acima, em que tanto a curva do sistema como o ponto de operação apresentaram valores consoantes com a realidade.