

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Otimização de Sistema de Bombeamento de Biodiesel

Relatório Técnico de Análise de Custos

Elaborado por:

Fernanda Oliveira Santos Roza
Guilherme Rocha Ribeiro

Salvador, BA
17 de julho de 2025

Sumário

1	Introdução	2
2	Metodologia e Modelagem	2
2.1	Descrição do Problema e Escolhas de Modelagem	2
2.1.1	Escolhas Metodológicas	2
2.1.2	Parâmetros do Sistema	3
2.1.3	Cálculos e Equacionamento Completo	3
3	Resultados e Discussão	4
3.1	Resultados da Otimização	4
3.2	Análise dos Gráficos	5
4	Conclusão	6

1 Introdução

Este relatório apresenta uma análise técnico-econômica para a otimização de um sistema de transporte de biodiesel. O objetivo principal é determinar o diâmetro de tubulação que minimiza o custo total anualizado, considerando um balanço entre os custos de capital (investimento na tubulação) e os custos operacionais (consumo de energia da bomba). A metodologia empregada baseia-se em princípios fundamentais da mecânica dos fluidos e em uma análise de custos simplificada, implementada em Python para identificar o ponto dentro do intervalo que minimiza o custo da operação.

2 Metodologia e Modelagem

2.1 Descrição do Problema e Escolhas de Modelagem

O sistema em análise consiste no bombeamento de biodiesel através de uma tubulação de aço horizontal de 50 m de comprimento. Além disso, O fluido precisa vencer uma altura estática de 10 m, representando a diferença de elevação a ser superada no ponto de descarga. O problema apresetado consiste em encontrar o valor do diâmetro dentro do intervalo de 0.03 m e 0.1 m que minimiza o custo total da operação.

2.1.1 Escolhas Metodológicas

- **Análise Discreta de Diâmetros:** Em vez de uma otimização contínua, optou-se por avaliar um intervalo de diâmetros comerciais plausíveis (de 0.03 m a 0.1 m) em 100 pontos distintos.
- **Equação de Swamee-Jain:** Para o cálculo do fator de atrito, foi escolhida a equação explícita de Swamee-Jain. Esta fórmula oferece uma aproximação da equação implícita de Colebrook-White para escoamento turbulento e evita a necessidade de solucionadores iterativos, simplificando o código. Embora seja mais precisa para $Re > 4000$, sua aplicação em toda a faixa de diâmetros foi considerada uma simplificação razoável. [3]
- **Modelo de Custo:** O custo da tubulação foi modelado como uma função quadrática do diâmetro ($C \propto D^2$), representando uma aproximação onde o custo é proporcional ao volume de material. O custo de energia foi calculado com base na operação contínua da bomba ao longo de um ano (8760 horas).

2.1.2 Parâmetros do Sistema

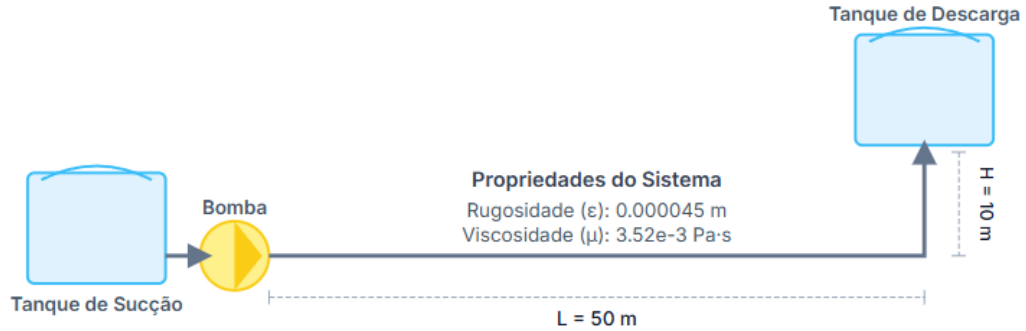


Figura 1: Diagrama esquemático do sistema de bombeamento de biodiesel.

Os parâmetros físicos e econômicos utilizados como base para os cálculos estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros Físicos e Econômicos do Sistema

Parâmetro	Símbolo	Valor
Densidade do Biodiesel SoyAB	ρ	880 kg/m^3
Viscosidade Dinâmica	μ	$3.52 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Vazão Volumétrica	Q	$0.00333 \text{ m}^3/\text{s}$
Comprimento da Tubulação	L	50 m
Rugosidade Absoluta	ϵ	$4.5 \times 10^{-5} \text{ m}$
Altura Estática	$H_{\text{estática}}$	10 m
Eficiência da Bomba	η	70%
Custo da Energia	-	$0.70 \text{ R\$/kWh}$
Valor / metro	-	$300 \text{ R\$/m}^2$

2.1.3 Cálculos e Equacionamento Completo

Para cada diâmetro D no intervalo analisado, os seguintes cálculos foram realizados sequencialmente. O detalhamento das formulas pode ser encontrado em [2]:

1. **Velocidade do Escoamento (v):** Calculada a partir da vazão e da área da seção transversal ($A = \pi D^2/4$).

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

2. **Número de Reynolds (Re):** Para determinar o regime de escoamento.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

3. **Fator de Atrito (f):** Utilizando a equação de Swamee-Jain.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)\right]^2}$$

4. **Perda de Carga por Atrito (h_f):** Calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

5. **Altura Manométrica Total (H):** A altura total que a bomba precisa fornecer.

$$H = H_{\text{estatica}} + h_f$$

6. **Potência da Bomba (P):** A potência real consumida pela bomba.

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}$$

7. **Custo Anual Total (C_{total}):** Soma dos custos de capital e operacionais.

$$C_{\text{total}}(D) = \underbrace{(3000 \cdot D^2 \cdot L)}_{\text{Custo Tubulação}} + \underbrace{\left(\frac{P(D)}{1000} \cdot 8760 \cdot 0.70 \right)}_{\text{Custo Energia Anual}}$$

3 Resultados e Discussão

3.1 Resultados da Otimização

O diâmetro que minimiza o custo total anual foi encontrado em 0.0922 m para o tubo de aço comercial, que apresenta o valor de $\epsilon = 4.5 \times 10^{-5}$ m. Os resultados detalhados para este ponto estão descritos na Tabela

Tabela 2: Resultados

Parâmetro	Valor
Diâmetro ótimo	0.0922 m
Perda de carga (h_f)	0.2110 m
Potência da bomba (P)	419.34 W
Custo da tubulação	R\$ 127.57
Custo energético anual	R\$ 2571.39
Custo Total Anual Mínimo	R\$ 2698.96

3.2 Análise dos Gráficos

Figura 2: Curva de custo total anual em função do diâmetro da tubulação.

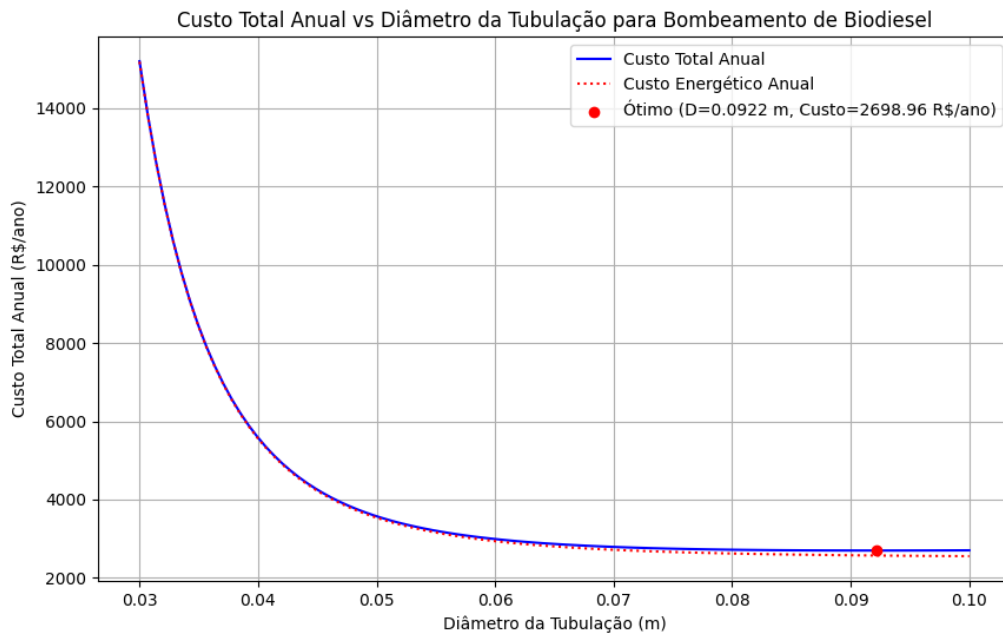


Figura 3: Cálculo da potência necessária em função do diâmetro da tubulação.

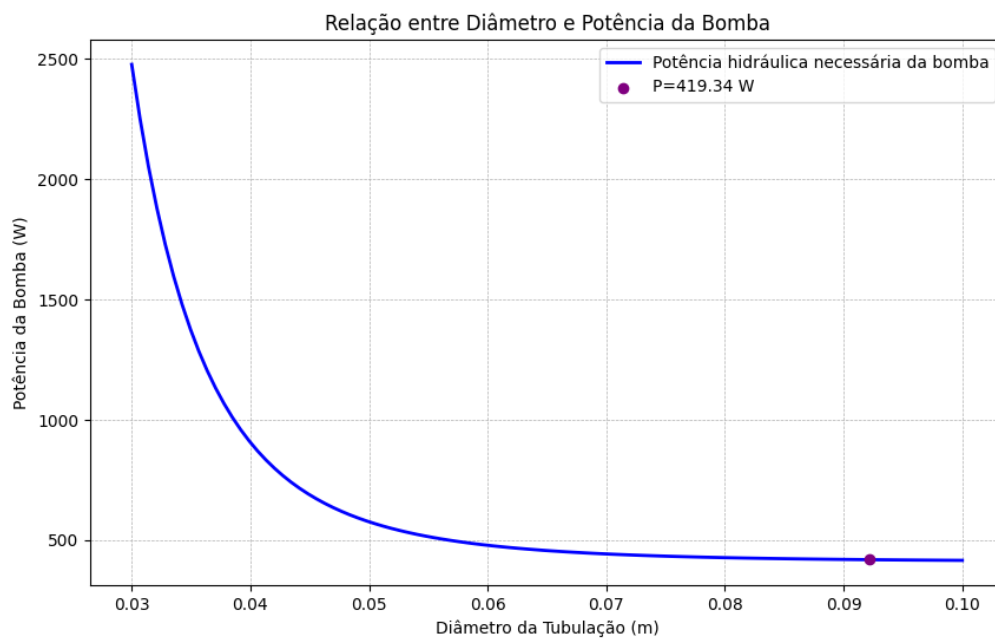
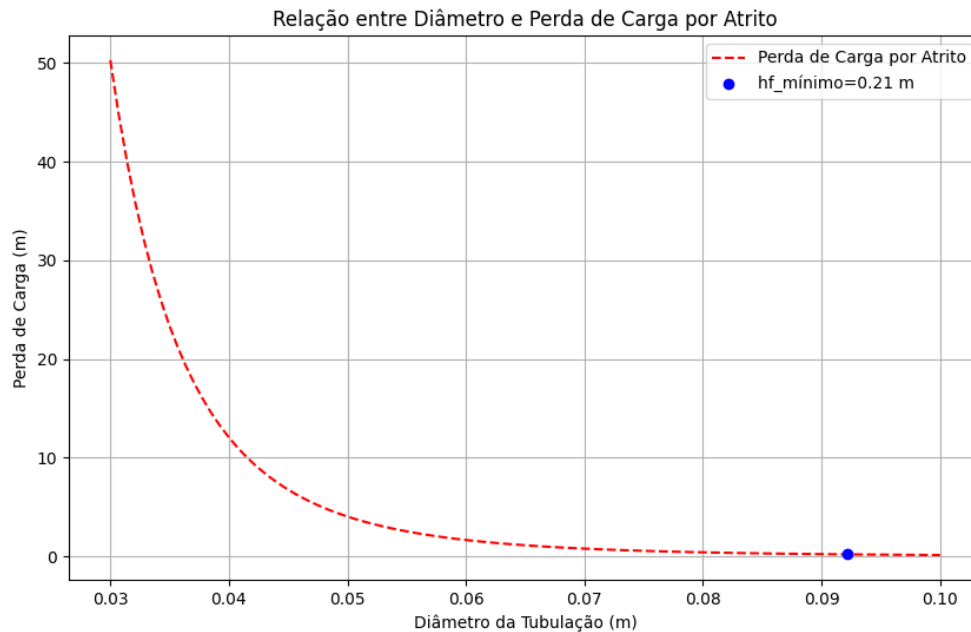


Figura 4: Cálculo da resistência do escoamento em função do diâmetro da tubulação.



A análise gráfica, permite a identificação dos seguintes pontos

- **Diâmetros próximos de 0.03 m:** Nesta faixa, o custo total é máximo. Visto que, diâmetros menores implicam em velocidades de escoamento muito mais altas. Como a perda de carga por atrito é proporcional ao quadrado da velocidade ($h_f \propto v^2$), ela aumenta drasticamente, exigindo uma potência de bombeamento que torna o custo inviável para operações com diâmetros próximos e essa faixa do intervalo.
- **Diâmetro ideal de 0.0922 m** Ponto encontrado onde é minimizada o custo, potência necessária e o valor do atrito do fluido com a tubulação
- **Diâmetros na faixa superior (>0.0922 m):** Acima do ótimo, o custo da tubulação cresce quadraticamente ($R\$ 300 \cdot D^2$)

4 Conclusão

O estudo demonstrou com sucesso a existência de um diâmetro ótimo que minimiza o custo total anualizado de um sistema de bombeamento. A análise das curvas de custo revela que o ponto ótimo, encontrado em **0.0922 m** minimiza o custo total da operação.

No ponto ótimo, o custo energético anual (R\$ 2.571.39) representa aproximadamente 95.2% do custo total anual (R\$ 2.698.96), enquanto o custo da tubulação (R\$ 127,57) corresponde aos 4.8% restantes. Isso evidencia que, para este sistema, o gasto operacional com energia é o fator mais impactante no custo total a longo prazo. Portanto, a abordagem quantitativa de otimização é essencial para garantir não apenas a viabilidade econômica, mas também a eficiência energética do projeto.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- **Análise de Custo de Vida Útil (LCCA):** Incluir custos de manutenção, depreciação e o valor do dinheiro no tempo.
- **Perdas de Carga Localizadas:** Adicionar ao cálculo as perdas de carga devido a acessórios como válvulas e curvas.
- **Curva da Bomba:** Integrar a curva característica da bomba (Altura vs. Vazão) para garantir que o ponto de operação seja viável.
- **Análise de Sensibilidade:** Avaliar como o diâmetro ótimo varia com mudanças nos parâmetros de entrada.

Referências

- [1] Maria Jorge Pratas, Samuel V. D. Freitas, et al; Biodiesel Density: Experimental Measurements and Prediction Models, Energy Fuels, 2011.
- [2] Jukka Kiijärvi, Darcy Friction Factor Formulae in Turbulent Pipe Flow, 2011, Cap 2.
- [3] Swamee, P., Jain, A., Explicit equations for pipe-flow problems, Journal of the Hydraulics Division (ASCE), 102 (5), 1976, pp. 657–664.
- [4] Haaland, S., Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent flow. Transactions of ASME, Journal of Fluids Engineering, 103, 1983, pp. 89–90.