



08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

DETERMINAÇÃO DA ALTURA MANOMÉTRICA DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE FLUIDOS DO REATOR TUBULAR PRESENTE NO MÓDULO DIDÁTICO DE CINÉTICA E CÁLCULO DE REATORES

Shara Katerine Moreira Jorge Leal¹ – sharaengquim@hotmail.com

Rosilanny Soares Carvalho² – rosilannysoares@hotmail.com

Daiane Antunes Pinheiro³ – daianengquimica@gmail.com

Vitor Soares³ – vitorsoaresengqui@gmail.com

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ – Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Universidade Federal de São Carlos, UFSCar – São Carlos, SP, Brasil

³ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, IFNMG – Montes Claros, MG, Brasil

Resumo. A altura manométrica indica a quantidade de energia por unidade de peso que o sistema de estudo necessita de acordo a vazão de trabalho, sendo determinante no processo de seleção de bombas. Dessa forma, o objetivo desse trabalho consiste em determinar a altura manométrica dos sistemas de escoamento de fluidos que integram o reator tubular (PFR). Para isso foram identificados os acessórios presentes nos circuitos, foram realizadas medidas de comprimento, medidas experimentais de queda de pressão e cálculos teóricos. Esses procedimentos permitiram determinar que a altura manométrica no primeiro sistema foi de 3,38 m e para o segundo sistema foi de 3,40 m.

Palavras-chave: Altura manométrica, PFR, Fluidos.

1. INTRODUÇÃO

O módulo de cinética e cálculo de reatores, presente no laboratório de Engenharia Química III do IFNMG, *Campus* Montes Claros, é constituído por duas bombas rotativas que fornecem energia ao fluido, de modo a transportá-lo por todo o processo.

Essas bombas fornecem um fluxo pulsativo de reagentes aos reatores que compõem o módulo. Esse fluxo pulsativo foi indicado pelo professor coordenador dos experimentos que ocorrem no reator tubular como uma das possíveis causas da divergência encontrada no trabalho de conclusão de curso desenvolvido no módulo por Raissa Costa de Oliveira. Indicando também a necessidade da inserção de bombas centrífugas no módulo em consequência ao fluxo uniforme de fluido fornecido pelas mesmas aos processos.

Segundo Oliveira (2016), a conversão real experimental da reação de estudo apresentou valores elevados, fato adverso ao esperado, uma vez que a conversão ideal e não ideal indicavam a ocorrência de baixas conversões. Assim, o fluxo pulsativo das bombas pode estar influenciando o regime de escoamento do fluido e conseqüentemente o contato entre os reagentes, podendo assim estar contribuindo para o alto valor de conversão experimental.

Diante disso, neste trabalho foram determinadas as alturas manométricas dos sistemas de distribuição de fluidos que constituem o PFR, para posterior seleção e instalação de bombas centrífugas para operar o módulo e assim determinar se o fluxo pulsativo contribui para o aumento da conversão. As bombas centrífugas possuem fluxo uniforme e desta forma eliminariam o efeito pulsativo gerado pelas bombas peristálticas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Vazão do sistema

A vazão volumétrica (Q), calculada pela Eq. (1), expressa a quantidade de fluido que escoo na seção transversal de um sistema por unidade de tempo.

$$Q = v \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

Onde v é a velocidade média de escoamento do fluido e D é o diâmetro da seção circular da tubulação de escoamento.

2.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional muito importante na mecânica dos fluidos, que caracteriza o comportamento global de um fluido, podendo ser calculado pela Eq. (2). O escoamento no qual as forças de inércia são “baixas” em detrimento das forças viscosas é classificado como laminar (FOX; PRITCHARD; McDONALD, 2011).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Sendo ρ e μ a massa específica e a sua viscosidade dinâmica do fluido, respectivamente.

2.3 Fator de Atrito

Segundo Souza (2014), o fator de atrito (f) para escoamentos laminares é função apenas de Re , pois durante o escoamento ocorre a formação de uma película de fluido estático junto às paredes do tubo fazendo com que o mesmo se comporte como liso independentemente de sua rugosidade, sendo calculado conforme a Eq. (3).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

Para escoamentos turbulentos, o fator de atrito é tanto função de Re como da rugosidade relativa da tubulação, podendo ser determinado pelo Diagrama de Moody.

2.4 Perda de Carga

Segundo Brunetti (2008), há dois tipos de perdas de carga, a perda de carga distribuída (h_d), e a perda de carga singular (h_s). A perda de carga distribuída ocorre ao longo de tubos retos, de seção constante em consequência ao atrito das próprias partículas do fluido, sendo calculada pela Eq. (4). Onde L é o comprimento da tubulação e g a aceleração da gravidade.

$$h_d = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

Já a perda de carga singular, também conhecida como local, é definida como a perda de energia por unidade de peso que ocorre nos acessórios, tais como válvulas, curvas e retenções, sendo calculada pela Eq. (5).

$$h_s = K \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Sendo K o coeficiente de carga. Os valores de K geralmente são tabelados, conforme disposto na Tabela 1.

Tabela 1- Coeficiente de carga.

Peça	K
Entrada normal de canalização	0,5
Alargamento*	0,3
Estreitamento*	0,15
Curva de 90°	0,4
Tê (escoamento de desvio)	1,3
Tê (escoamento de linha)	0,6
Curva de 45°	0,2
Curva de 22,5°	0,1
Curva de retorno 180°	2,2
Cotovelo de 90°	0,9

Fonte: Adaptado de MACINTYRE*, 1997; NETTO *et al.*, 1998.

2.5 Equação de Bernoulli modificada para situações com bombas

Conforme Livi (2010), para escoamentos incompressíveis e completamente desenvolvidos no interior de dutos em que haja a atuação de uma bomba no sistema, a equação de Bernoulli pode ser utilizada, considerando outros termos relacionados à potência da bomba e à perda de carga total. Assim, a carga transferida da bomba para o escoamento entre duas seções pode ser determinada pela Eq. (6).

$$H_m = \left[\left(Z_2 + \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho g} \right) - \left(Z_1 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho g} \right) \right] + h_t \quad (6)$$

Em que Z_2 e Z_1 são, respectivamente, as alturas nos pontos de referência 1 e 2, v_1 e v_2 as velocidades do fluido, P_1 e P_2 as pressões estáticas, h_t a perda de carga total e H_m a altura manométrica do sistema.

3. METODOLOGIA

Todos os experimentos foram realizados no módulo didático de cinética e cálculo de reatores do Laboratório de Engenharia Química III do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – IFNMG, *Campus* Montes Claros. Conforme esquematizado na Figura 1 e na Figura 2, o módulo é constituído por dois reatores, por um PFR e por três reatores de mistura perfeita em série. Em relação ao PFR, o mesmo é integrado por dois sistemas de distribuição de reagentes, uma vez que, as reações que ocorrem em seu interior envolvem dois reagentes.

Cada sistema já alterado e esquematizado para receber a bomba centrífuga é formado respectivamente por um tanque de armazenamento de reagente (A), um tê (B), uma válvula de fechamento de linha (C), uma bomba centrífuga (D), uma rotâmetro (E), uma válvula de fechamento de linha (F) localizada na traseira do módulo, um tê (G) localizado na traseira do módulo, uma válvula direcional (H), um reator PFR (I) e pelo tanque de armazenamento dos produtos reacionais (K) como elemento final de cada circuito. A conexão das bombas a entrada do PFR é realizada por tubos de uretano e do reator ao tanque de armazenamento dos produtos reacionais essa conexão é realizada por um único tubo de uretano e posteriormente por um único tubo de policloreto de polivinila (PVC).

Assim, se a bomba D_1 estiver em funcionamento, um dos reagentes percorrerá o sistema 1 passando respectivamente pelos elementos A_1 , B_1 , C_1 , D_1 , E_1 , F_1 , G_1 , H_1 , I e K. Com a bomba D_2 em funcionamento, o segundo reagente percorrerá o sistema 2 passando respectivamente pelos elementos A_2 , B_2 , C_2 , D_2 , E_2 , F_2 , G_2 , H_2 , I e K.

Inicialmente foram determinadas as características importantes dos sistemas 1 e 2. Dessa forma, foi determinado por meio da utilização de uma trena, o comprimento total da tubulação de uretano e da tubulação de PVC que constituem os sistemas, o diâmetro do reservatório A_1 (D_{r1}), o diâmetro do reservatório A_2 (D_{r2}), a altura da saída do reservatório A_1 (H_{PFR-1}) até a entrada do reator tubular e a altura da saída do reservatório A_2 (H_{PFR-2}) até a entrada do reator tubular. E com o auxílio de um paquímetro digital o diâmetro interno dessas mesmas tubulações. Também foram identificados os tipos e a quantidade de acessórios presentes em cada circuito.

Para a determinação da perda de carga experimental no interior do PFR, da válvula direcional e do rotâmetro foram introduzidas tomadas de pressão em um ponto anterior e posterior em cada um desses equipamentos. Tubos de diâmetro compatível às entradas das tomadas de pressão foram ligados em uma extremidade á tomada e na outra extremidade ao manômetro de tubo em U, cujo fluido manométrico era o mercúrio.

As Equações (4) e (5) foram utilizadas para a determinação da perda de carga distribuída e localizada em cada sistema, respectivamente.

A altura manométrica foi determinada para os sistemas 1 e 2 a partir da equação de Bernoulli modificada aplicada entre a saída do reservatório de armazenamento de reagente e a entrada do PFR.

Todos os dados foram determinados para a vazão máxima de operação, que é de $1,67 \cdot 10^{-5}$ m³/s no interior do reator tubular. As propriedades dos reagentes de trabalho por apresentarem alta diluição foram consideradas semelhantes a da água. A temperatura em que ocorreram os experimentos foi a temperatura média de operação do módulo, que foi de 25°C.

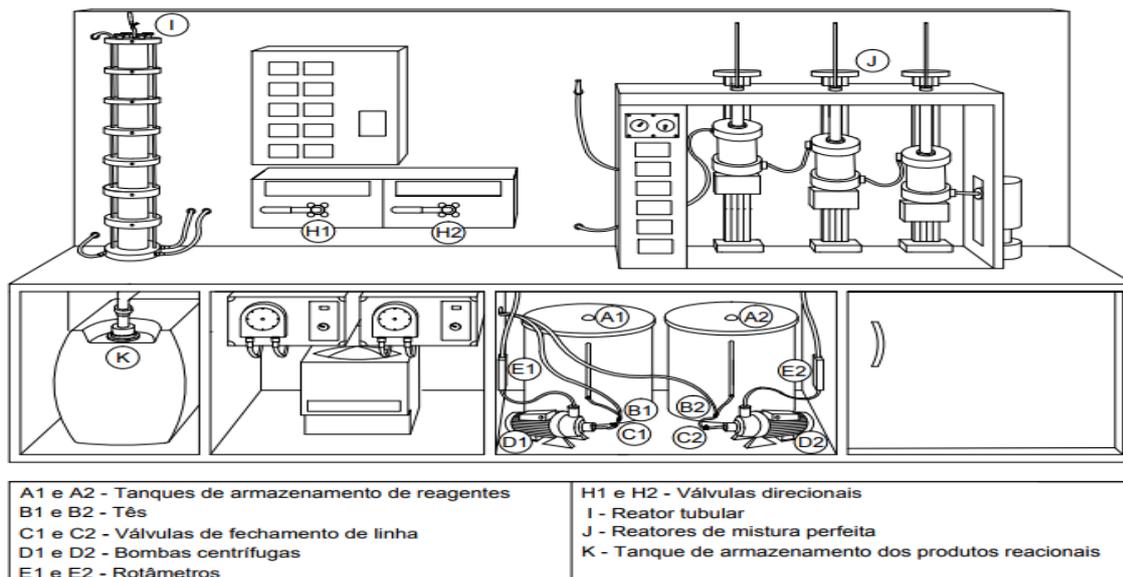


Figura 1- Esquema da parte frontal do módulo didático de cinética e cálculo de reatores.

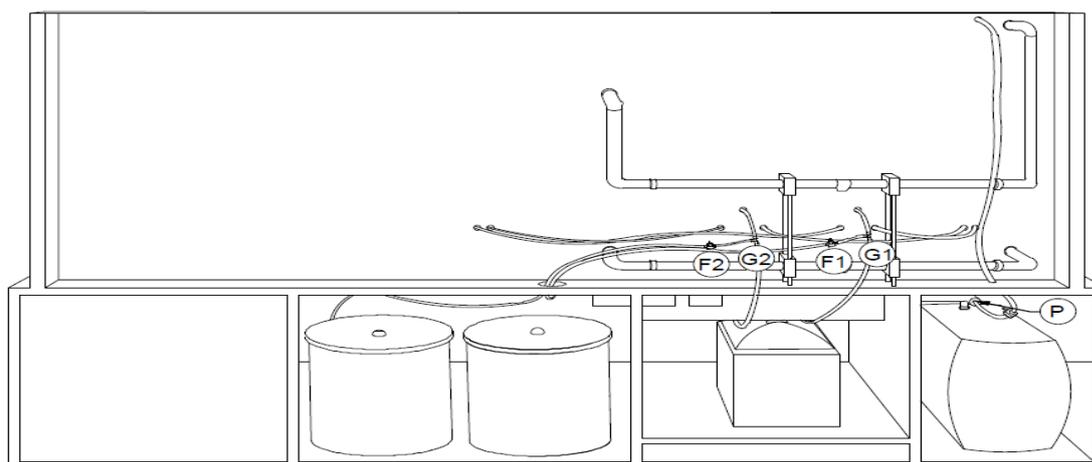


Figura 2 – Esquema da parte traseira do módulo didático de cinética e cálculo de reatores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Obtenção de características importantes do sistema

Para a posterior quantificação da perda de carga distribuída, foi determinado por meio da utilização de uma trena, o comprimento total da tubulação de uretano e da tubulação de PVC para os sistemas 1 e 2, que estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Comprimento total de tubo dos sistemas

Local	Comprimento (m)	
	Sistema 1	Sistema 2
Tubulação de uretano na sucção	0,45	0,45
Tubulação de uretano no recalque	4,41	4,76
Tubulação de PVC no recalque	0,34	0,34

Outras medidas de comprimento importantes na determinação de velocidade, pressão e altura estão expressas na Tabela 3.

Tabela 3 – Diâmetros dos reservatórios, diâmetros das tubulações e alturas até os reatores considerando os pontos de referência

$D_{R1}(m)$	$D_{R2}(m)$	$D_{T1}(m)$	$D_{T2}(m)$	$H_{PFR-1}(m)$	$H_{PFR-2}(m)$
0,39	0,39	$0,07 \cdot 10^{-1}$	0,02	1,00	1,00

O tipo e a quantidade de acessórios presentes ao longo dos sistemas no recalque e na sucção foram expressos, respectivamente, nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Tipo e quantidade de acessórios presentes na sucção dos sistemas

Tipo de acessórios	Quantidade de acessórios	
	Sistema 1	Sistema 2
Na sucção		
Entrada normal de canalização	1	1
Válvula de fechamento de linha	1	1
Tê (escoamento de linha)	1	1
Curva de 45°	1	1
Alargamento	1	1

Tabela 5 – Tipo e quantidade de acessórios presentes no recalque dos sistemas

Tipo de acessórios	Quantidade de acessórios	
	Sistema 1	Sistema 2
No recalque		
Estreitamento	1	1
Curva de 90°	2	2
Válvula de fechamento de linha	2	2
Tê (escoamento de desvio)	1	1
Tê (escoamento de linha)	2	2
Curva de 45°	2	2
Válvula direcional	1	1
Curva de 22,5°	3	3
Curva de retorno de 180°	0	0
Alargamento	1	1
Joelho	1	1

4.2 Determinação experimental da perda de carga

A introdução das tomadas de pressão ocorreu perpendicular e superficialmente às paredes dos tubos, de modo a quantificar apenas a pressão estática em cada ponto. A leitura feita no manômetro expressa a altura em metros na coluna de mercúrio que a bomba precisa elevar para superar as perdas por atrito nos equipamentos. Assim, a leitura realizada no manômetro foi convertida para metros na coluna de água, por meio da Eq. (7). Onde ρ_m é a densidade do mercúrio, h_m a perda de carga em metros na coluna de mercúrio e h a perda de carga em metros na coluna de água.

$$h = \frac{(\rho_m - \rho) h_m}{\rho} \quad (7)$$

Assim, a perda de carga expressa em metros na coluna de água foi de 0,27 m para o rotâmetro, de 1,51 m para o reator tubular e de 0,11 m para a válvula direcional. As perdas nesses equipamentos foram determinadas experimentalmente, pois não foram encontrados coeficientes de carga tabelados para tais equipamentos. É importante salientar que para os cálculos realizados ao longo do trabalho, todas as propriedades do mercúrio foram extraídas do Cençel e Ghajar (2012) e as propriedades da água do Himmelblau (2007).

4.3 Cálculo da perda de carga

A perda de carga distribuída foi determinada por meio da Equação (4), já h_s foi calculada pela Eq. (5). A perda de carga distribuída é função de algumas variáveis, entre elas do coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito foi determinado pelo diagrama de Moody, que é função apenas do número de Reynolds para tubos lisos, instrumento desse trabalho. Para a determinação do número de Reynolds foi utilizada a Eq. (2). Para isso, foi obtida a velocidade média de escoamento do fluido no interior dos tubos a partir da Eq. (1). Os valores obtidos para v , Re e f estão expressos na Tabela 6. É importante resaltar que para uma reação com vazão $1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ no interior do reator, metade da vazão é fornecida pela bomba 1 e a outra metade pela bomba 2. Desta forma, o fluido que escoar no interior do tubo de uretano possuirá valores de v , Re e f distintos em um ponto anterior e posterior ao reator.

Tabela 6 – Valores de v , Re e f

Variáveis	Tubo de uretano anterior ao reator	Tubo de uretano posterior ao reator	Tubo de PV posterior ao reator
v (m/s)	0,24	0,48	$0,73 \cdot 10^{-1}$
Re	1785,64	3571,28	1388,58
f	$0,36 \cdot 10^{-1}$	$0,40 \cdot 10^{-1}$	$0,46 \cdot 10^{-1}$

A perda de carga nos sistema 1 e 2 foi dividida em três trechos: a perda de carga no tubo de uretano anterior ao PFR, a perda de carga no tubo de uretano posterior ao PFR e a perda de carga no tubo de PVC. Salienta-se que a perda de carga foi dividida em dois trechos no tubo de uretano, consequência da diferença de velocidade do fluido em cada trecho. Os valores totais obtidos de h_d e h_s ao longo de todo o sistema estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores totais de h_d e h_s

Sistema	h_d (m)	h_s (m)
1	0,16	0,04
2	0,17	0,04

A perda de carga localizada em cada um dos acessórios descritos nas Tabelas 4 e 5, foi calculada tomando o cuidado em utilizar a velocidade do fluido naquele ponto específico. O coeficiente de carga usado para cada um dos acessórios presentes no módulo está expresso na Tabela 1.

4.4 Determinação da altura manométrica

Para o cálculo da altura manométrica de cada sistema a equação de Bernoulli modificada foi aplicada entre os pontos de sucção (S) e recalque (R) do líquido, indicados na Fig. 3. Conforme demonstrado pela Equação (6), para a determinação da altura manométrica é necessário a obtenção da diferença de pressão, da variação de velocidade, da diferença de nível (Z_R) entre os pontos e da perda de carga total. A diferença da pressão (ΔP) entre os pontos de sucção e recalque foi obtida por meio da Eq. (8).

$$\Delta P = \rho g(H_R - H_S) \quad (8)$$

Em que H_S é a altura da coluna de fluido acima do ponto de sucção e H_R é a altura da coluna de fluido acima do ponto de recalque. O valor de H_R foi de 0,71 m e de H_S de 0,42 m, para os dois sistemas, uma vez que os pontos de referência foram os mesmos. Assim a diferença de pressão obtida para ambos os sistemas foi de 2826,67 Pa. Já a diferença de nível foi de 1,00 m, também para os dois sistemas. Já o termo referente à diferença de velocidade foi desconsiderado, uma vez que a sua contribuição em H_m é mínima, em consequência a baixa vazão de trabalho. A perda de carga total em cada sistema foi obtida pela soma de h_d , de h_s e das perdas de carga experimentais.

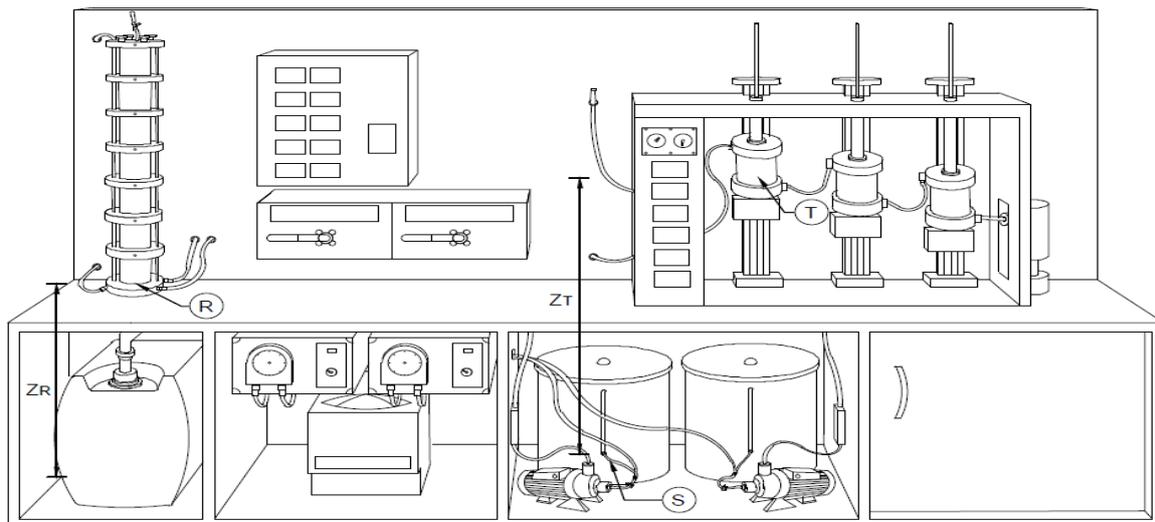


Figura 3 – Esquema da parte frontal do módulo com a indicação dos pontos de sucção (S) e recalque (R).

5. CONCLUSÃO

Os valores de H_m obtidos indicam a quantidade de energia por unidade de peso que os sistemas de estudo necessitam de acordo a vazão de trabalho. Esses valores foram calculados levando em consideração a energia já existente na linha de sucção e a energia necessária na linha de descarga do fluido. Assim, a partir dos dados de perda de carga total, de diferença de pressão e diferença de nível, foi possível determinar H_m , que para o sistema 1 foi de 3,38 m e para o sistema 2 foi de 3,40 m. O valor semelhante da altura manométrica entre os sistema já era esperado, uma vez que os dois apresentam os mesmos elementos responsáveis pela perda

de carga e a mesma vazão de operação. A maior altura manométrica do sistema 2 ocorre em consequência da maior perda de carga distribuída desse sistema.

REFERENCIAS

- BRUNETTI, Franco. Mecânica dos fluidos. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 431 p.
- CENÇEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. Mecânica dos fluidos: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012. 816 p.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; McDONALD, A. T.. Introdução à mecânica dos fluidos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 710 p.
- HIMMELBLAU, D.M.. Engenharia Química Princípios e Cálculos. 7 ed.. Rio de Janeiro. Guanabara Dois. 2007. 846 p.
- LIVI, Celso Pohlmann. Fundamentos de fenômenos de transporte: Um texto para cursos básicos. Rio de Janeiro: Ltc, 2010. 206 p.
- MACINTRYRE, Archibald Joseph. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1997. 782 p.
- NETTO, Azevedo et al. Manual de hidráulica. 8. ed. São Paulo: Edgard Bucher Ltda, 1998. 342 p.
- OLIVEIRA, Raissa Costa de. “Estudo da não-idealidade de reatores tubulares a partir da determinação de suas distribuições de tempos de residência e validação dos resultados”. 2016. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, Montes Claros, 2016.
- SOUZA, Pedro Henrique AI. “Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos”. 2014 68 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DETERMINATION OF THE MANOMETRIC HEIGHT OF THE FLUID DISTRIBUTION SYSTEMS OF THE TUBULAR REACTOR PRESENT IN THE DYNAMIC MODULE OF KINETICS AND CALCULATION OF REACTORS

Abstract. The manometric height indicates the amount of energy per unit of weight that the study system needs according to the working flow, being determinant in the process of selection of pumps. Thus, the objective of this work is to determine the manometric height of the fluid flow systems that integrate the tubular reactor (PFR). For this, the accessories present in the circuits were identified, measurements of length, experimental measures of pressure drop and theoretical calculations were performed. These procedures allowed to determine that the manometric height in the first system was 3,38 m and for the second system was 3,40 m.

Keywords: Manometric height, PFR, Fluids.