



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**Projeto de trocador de calor, sistema de bombeamento e
instrumentação e controle**

Amanda de Sousa Almeida

Julia Alves Goulart

Letícia Rezende Rocha

Brasília - DF

No presente trabalho de conclusão de curso serão apresentados três projetos realizados na matéria de Projeto de Engenharia Química 2, o que envolve o projeto de um trocador de calor, uma bomba e a instrumentação de controle para uma torre de destilação.

Palavras-chave: Trocador de Calor, Bomba, Instrumentação e controle.

Trocador de Calor

Para o projeto de um trocador de calor tem-se as seguintes especificações:

Fluido quente: H₂S T₁=1149 °C e T₂= 148,9 °C

mc= 4575 kg/h

Fluido frio: água t₁= 28°C e t₂= 45°C

Sabendo que o calor na entrada é de 9,362*10⁵ kcal/h e na saída é -4,593*10⁵ kcal/h temos que a variação de calor total do sistema é dada por

$$\Delta Q = -1,396 \cdot 10^6 \text{ kcal/h}$$

Com isso conseguimos calcular a vazão total de água necessária para o resfriamento, através da equação 1

$$Q = m_f \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

m_f= 82117,6 kg/h

Para o cálculo da área o primeiro passo foi encontrar o ΔT_{ml}= -444,49 por meio da equação:

$$\Delta T = \frac{(t_1 - T_2) - (t_2 - T_1)}{\ln \frac{(t_1 - T_2)}{(t_2 - T_1)}} \quad (2)$$

Para o cálculo do coeficiente global de transmissão de calor (U) tem-se a seguinte equação:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} + r_c + r_f \quad (3)$$

Como os coeficientes de transmissão de calor (h) e de deposição (r) são aproximados pela literatura, temos o seguinte

Para o fluido frio, considerou-se $hf = 5700 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a média entre os limites inferior e superior e para o fluido quente $hc = 125 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Seguindo a mesma lógica temos $rf = 0,0003 \text{ h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/kcal}$ e $rc = 0,0012 \text{ h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/kcal}$, com isso por meio da equação 2 temos $U = 103,35 \text{ Kcal / h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$

Para encontrar o F_t é necessário o cálculo dos parâmetros P e R por meio das seguintes equações:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

Portanto, $P=0,015$ e $R= 58,83$

Por meio do gráfico foi encontrado $F_t \approx 1$

Portanto através da equação 6 encontramos a área de troca de calor de $A = 30,39 \text{ m}^2$

$$Q = U * A * F_t * \Delta T_{ml} \quad (6)$$

Para definir os parâmetros mecânicos usamos critérios conservadores de acordo com o tipo de fluido e as condições operacionais.

Estabelecemos a pressão de projeto como a pressão mínima de $3,5 \text{ kg/cm}^2$ e para temperatura de projeto a maior temperatura de operação encontrada adicionando 30°C .

Com a escolha do diâmetro dos tubos usamos a padronização de $1'$ polegada para fluidos sujos, visto que o fluido quente é corrosivo, para os comprimentos e espessuras segue-se o mesmo critério.

Já o cálculo do diâmetro do casco baseia-se na geometria mínima para acomodar os 34 tubos necessários para a área de troca em espaçamentos de $1 \frac{1}{4}'$ em distribuição quadrada rotacionada. A seguir serão apresentados os dados das correntes materiais, as especificações do trocador e por último o esquema do projeto.

CORRENTES MATERIAIS		
Número de corrente	1	
Descrição	corrente de entrada de material do fluido quente de interesse	
Pressão	2,72	Kg/cm ² g
Temperatura	1149	°C
Vazão mássica	4575	Kg/h
Vazão molar	162,6	Kmol/h
Entalpia total	936,25	Gkcal/h
Fração de sólidos	0	
Fração de vapor	1	
PROPRIEDADES DA FASE LÍQUIDA		
Vazão volumétrica @P e T de operação	0,0	m ³ /h
Peso molecular	31,42	Kg/kmol
Densidade	335,1	Kg/m ³
Viscosidade	1,626e-003	cP
Condutividade térmica	0,1225	W/m·K
Calor específico	0,7707	kJ/kg·°C
Tensão superficial	0,0	dinas/cm
PROPRIEDADES DA FASE VAPOR/GÁS		
Vazão volumétrica @P e T de operação	6,454	m ³ /h
Peso molecular	28,14	Kg/kmol
Densidade	0,6349	Kg/m ³
Viscosidade	4,509e-002	cP
Condutividade térmica	7,960e-002	W/m·K
Calor específico	1,295	kJ/kg·°C
Fator de compressibilidade		
COMPOSIÇÃO		
Componente	Fração molar	Fração mássica
H₂S	0,0635	0,0769
SO₂	0,0318	0,0723
H₂O	0,2124	0,1360
S	0,1770	0,2017
N₂	0,5153	0,5130

CORRENTES MATERIAIS		
Número de corrente	2	
Descrição	Corrente de saída de material do fluído quente de interesse	
Pressão	1,654	Kg/cm ² g
Temperatura	148,9	°C
Vazão mássica	4575	Kg/h
Vazão molar	162,6	Kmol/h
Entalpia total	459,34	Gkcal/h
Fração de sólidos	0	
Fração de vapor	0,08058	
PROPRIEDADES DA FASE LÍQUIDA		
Vazão volumétrica @P e T de operação	0,5670	m ³ /h
Peso molecular	30,87	Kg/kmol
Densidade	1817	Kg/m ³
Viscosidade	7,570e+004	cP
Condutividade térmica	0,1403	W/m·K
Calor específico	1,086	kJ/kg·°C
Tensão superficial	57,37	dinas/cm
PROPRIEDADES DA FASE VAPOR/GÁS		
Vazão volumétrica @P e T de operação	5,887	m ³ /h
Peso molecular	27,48	Kg/kmol
Densidade	1,296	Kg/m ³
Viscosidade	2,023e-002	cP
Condutividade térmica	3,056e-002	W/m·K
Calor específico	1,152	kJ/kg·°C
Fator de compressibilidade		
COMPOSIÇÃO		
Componente	Fração molar	Fração mássica
H ₂ S	0,0635	0,0769
SO ₂	0,0318	0,0723
H ₂ O	0,2124	0,1360
S	0,1770	0,2017
N ₂	0,5153	0,5130

ESPECIFICAÇÕES TROCADORES DE CALOR						
Número do equipamento	E-100					
Descrição	Condensador para S elementar					
Tipo de trocador (casco-tubo, placas, tubos concêntricos)	Casco-tubo					
Para casco-tubo, definir o tipo TEMA	BEM					
Disposição (horizontal/vertical)	horizontal					
Circulação (forçada, termosifão...)	forçada					
Número de carcaças estimadas	Em série ou paralelo?	1			-	
CARACTERÍSTICAS DOS FLUÍDOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO						
Lado	CASCO/TUBO			TUBO/TUBO		
	EXTERIOR/FLUÍDO FRIO DO TROCADOR DE PLACAS			INTERIOR/FLUÍDO QUENTE DO TROCADOR DE PLACAS		
	Entrada	Saída		Entrada	Saída	
Vazão total	82117,65		Kg/h	4575		Kg/h
Fração de vapor/gás	0	0		1,0	0,8058	
Vazão de vapor/gás	0	0		4575	3600	
Vazão de líquido	82117,65	82117,65	Kg/h	0,0	974,5	Kg/h
Temperatura	28,0	45,0	°C	1149,0	148,9	°C
Pressão			Kg/cm² g	2,668	1,654	Kg/cm² g
Perda de pressão permitida			Kg/cm²	0,7		Kg/cm²
Coeficiente individual de transmissão de calor	5700		Kcal / h m² °C	125		Kcal / h m² °C
Fator de deposição	0,0003		h m² °C/ kcal	0,0012		h m² °C/ kcal
Coeficiente global de transmissão de calor			103,35			Kcal / h m² °C
ΔT _{ml}			444,49			°C
F _T		1				
Calor trocado			1396000			Kcal/h
CONDIÇÕES DE PROJETO MECÂNICO						
Pressão de projeto	3,5			Kg/cm² g		
Temperatura de projeto	1179			°C		
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TROCADOR						
Área de troca de calor	30,39			m²		
Diâmetro dos tubos	1			polegadas		
Comprimento dos tubos	20			pés		
Espessura dos tubos	12			BWG		
Espaçamento entre centro dos tubos	$1\frac{1}{4}$			polegada		
Tipo de disposição dos tubos (triangulares, triangular rotada, quadrangular, rômbica)	quadrada					
Diâmetro do casco	12			polegadas		

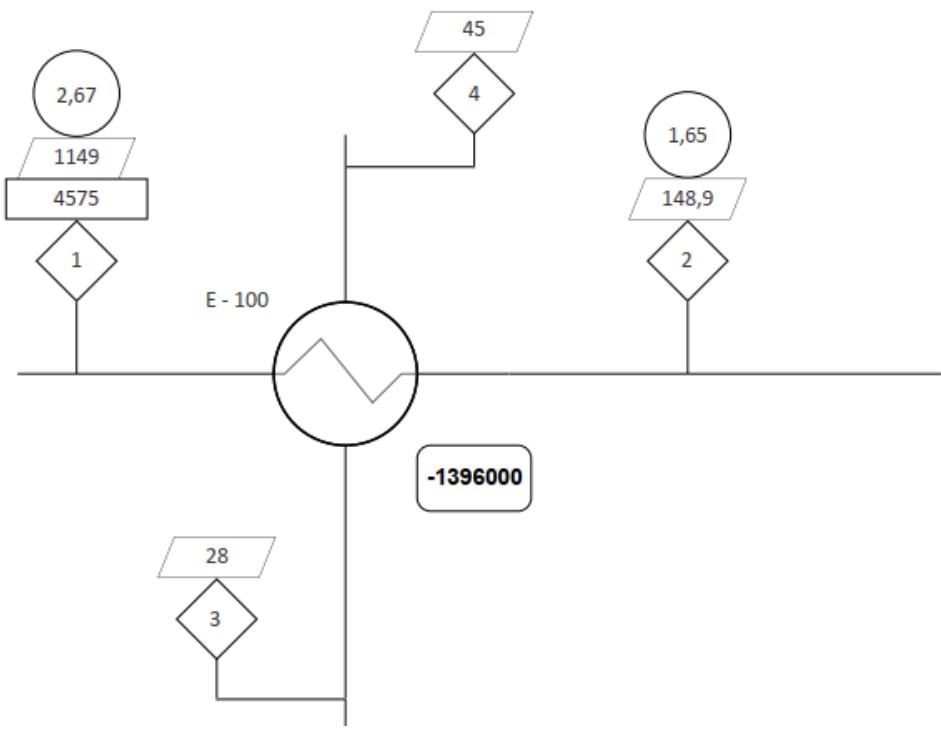


Figura 1: Projeto esquemático do trocador de calor

Projeto Bomba

Para o projeto da bomba a ser utilizada utilizamos o seguinte algoritmo para a memória de cálculo.

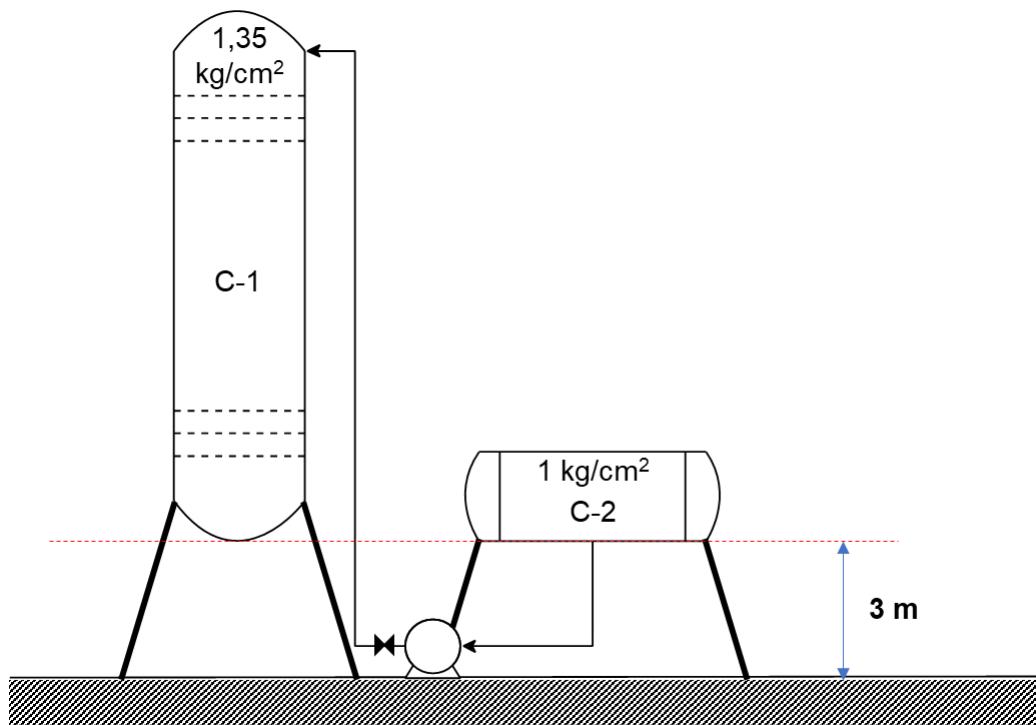


Figura 2. Esquema do sistema de bombeamento do refluxo

Para o projeto da bomba inicia-se calculando as pressões na aspiração e na impulsão. Para isso temos:

Aspiração

Inicialmente para a aspiração temos o diâmetro (D) e o cumprimento (L) do vaso pulmão C_2 , $D = 1m$ $L = 5m$. Nele a pressão é dada por $P_r = 1kg/cm^2$ e o fluído apresenta uma densidade de $\rho = 616,5kg/m^3$. A altura de cota de suspensão do vaso é de $H = 3m$.

Para o cálculo da pressão total na aspiração temos:

$$Pa = Pr + P_L + P_{cota} - \Delta Pa$$

Para a perda de carga na aspiração temos que $\Delta Pa = 0,5 kg/cm^2/km$ de tubo e o comprimento do tubo é dado por $L = 1,3 * H$, então:

$$\Delta Pa = 0,5 * 3,9 * 10^{-3}$$

$$\Delta Pa = 1,95 * 10^{-3} kg/cm^2$$

Para o cálculo da pressão da diferença de cota em que $h=3m$ temos:

$$P_{cota} = \frac{616,5 * 9,8 * 3}{98067} = 0,185 kg/cm^2 g$$

Para o cálculo da pressão do nível de líquido assume-se o nível pela metade do vaso, portanto $h_L = 3,5m$

$$P_L = \frac{616,5 * 9,8 * 3,5}{98067} = 0,216 kg/cm^2 g$$

Portanto tem-se que:

$$Pa = 1 + 0,216 + 0,185 - 0,00195$$

$$Pa = 1,399 kg/cm^2 g$$

Como $Pa < 3,5$ assume-se $Pr=3,5$ e calcula-se a pressão máxima de aspiração

$$Pa_{max} = Pr + P_L + P_{cota} - \Delta Pa$$

E para tanto, assume-se o nível de líquido total, portanto $h_L = 4m$

$$P_L = \frac{616,5 * 9,8 * 4}{98067} = 0,246 kg/cm^2 g$$

$$Pa_{max} = 3,5 + 0,246 + 0,185 - 0,00195$$

$$Pa_{max} = 3,929 kg/cm^2 g$$

Impulsão

Para a impulsão temos o diâmetro (D) e a altura total (L) da torre de destilação C_1 , $D = 1,6m$ $L = 12,3m$. Nela a pressão é dada por $P_r = 1,35 kg/cm^2$ e o fluído apresenta uma densidade de $\rho = 616,5 kg/m^3$.

Para o cálculo da pressão total na impulsão temos:

$$Pi = Pr + P_{cota} + \Delta P_{valvula} + \Delta Pi$$

Para a perda de carga na impulsão temos que $\Delta Pi = 2\text{kg}/\text{cm}^2/\text{km de tubo}$ e o comprimento do tubo é dado por $L = 1,3 * H$, então:

$$\Delta Pi = 2 * 15,99 * 10^{-3}$$

$$\Delta Pi = 3,198 * 10^{-2}\text{kg}/\text{cm}^2$$

Para o cálculo da pressão total na torre tem-se que $h=12,3\text{m}$, portanto:

$$P_{cota} = \frac{616,5 * 9,8 * 12,3}{98067} = 0,758\text{kg}/\text{cm}^2\text{g}$$

Tem-se ainda que $\Delta P_{valvula} = 0,25\text{kg}/\text{cm}^2$

Portanto tem-se que:

$$Pi = 1,35 + 0,758 + 0,25 + 0,03198$$

$$Pi = 2,389\text{ kg}/\text{cm}^2\text{g}$$

Para calcular a impulsão máxima é necessária a máxima diferença de pressão entre a impulsão e aspiração que é dada por:

$$\Delta P_{max} = 1,2 * \Delta P \text{ também chamada de } \Delta P \text{ de shut-off}$$

$$\Delta P = Pi - Pa$$

$$\Delta P = 2,389 - 1,398 = 0,991\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$\Delta P_{max} = 1,2 * 1 = 1,189\text{kg}/\text{cm}^2$$

$$Pi_{max} = Pa_{max} + \Delta P_{max}$$

$$Pi_{max} = 3,928 + 1,1892 = 5,1172\text{kg}/\text{cm}^2$$

Portanto, temos a pressão de projeto de $\Delta P = 1,189\text{kg}/\text{cm}^2$, que pode ser transformado em altura diferencial:

$$H = \Delta P * \frac{1}{\rho} * 10 = 19,29\text{m}$$

Para o cálculo da vazão de projeto assume-se que $Q_{normal} = 13,1\text{m}^3/\text{h}$, portanto a vazão mínima é dada por $Q_{min} = 0,6 * Q_{normal} = 7,86\text{m}^3/\text{h}$, sendo assim, a vazão de projeto é $Q_{proj} = 1,2 * Q_{normal} = 15,72\text{m}^3/\text{h}$

Para segurança do projeto é preciso calcular o NPSH requerido e este deve ser maior que o disponível informado pelo fabricante. Pois, a partir deste ponto a pressão de aspiração de

operação do projeto não será menor que a pressão de vapor do líquido e assim não ocorrerá cavitação no interior. O NPSH de operação é calculado da seguinte maneira. $NPSH = (\text{Paspiração} - \text{Pvapor}) * p/10 = (1,399 - 1,033) * 616,5/10 = 22,55$

Para o cálculo da potência utilizaremos a vazão e diferencial de pressão de projeto. Para tanto,

$$W_a = Q * \Delta P / 27,4$$

$$W_a = 15,72 * 1,189 / 27,4 = 0,682 CV = 0,509 kW$$

$$W_h = \frac{W_a}{\eta_h} * 100 = \frac{0,509}{0,3} * 100 = 169,67 kW$$

$$W_c = \frac{W_h}{\eta_m} * 100 = \frac{169,67}{0,85} * 100 = 19961,18 kW$$

Portanto temos uma potência absorvida de $W_a = 0,509 kW$, potência hidráulica de $W_h = 169,67 kW$ e potência real consumida de $W_c = 19961,18 kW$, que é a potência para o projeto da bomba. A seguir serão apresentados os dados das especificações da bomba, as correntes materiais, e o esquema de bombeamento.

ESPECIFICAÇÕES BOMBAS				
Identificação do equipamento operação / reserva	Operação		Reserva	
Descrição	bomba para o refluxo torre C1			
Número de bombas operação / reserva	01a		01b	
Tipo de bomba (centrífuga, volumétrica alternativa, volumétrica rotativa)	Centrífuga			
Funcionamento (contínuo ou descontínuo / série ou paralelo)	Contínuo		Contínuo	
CARACTERÍSTICAS DOS FLUÍDOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO				
PARTE DA BOMBA		Aspiração	Impulsão	
Vazão volumétrica de operação		13,1		m^3/h
Pressão	1	$\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ g}$	1,35	$\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ g}$
Temperatura	80,588	$^\circ\text{C}$	80,588	$^\circ\text{C}$
Densidade	616,5	kg/m^3	616,5	kg/m^3
Viscosidade		cP		cP
Pressão de vapor	1,03323	$\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ g}$	1,03323	$\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ g}$
CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DA BOMBA				
Vazão de projeto (110 ou 120% da vazão de operação)	15,72		m^3/h	
Vazão mínima de processo (60% da vazão de operação)	7,86			
Pressão na aspiração na vazão de projeto	1,399		$\text{kg}/\text{cm}^2 \text{ g}$	
Pressão na impulsão na vazão de projeto	2,389			
Pressão diferencial	0,991		kg/cm^2	
Altura diferencial	19,29		m	
NPSH disponível	22,55		m	

Máxima pressão diferencial a impulsão fechada	1,189	kg/cm ²
Pressão máxima na aspiração	3,929	
Pressão máxima na impulsão	5,1172	kg/cm ² g
Diâmetro da tubulação aspiração/impulsão	-	polegadas
CONDIÇÕES DE PROJETO MECÂNICO		
Pressão de projeto	5,1172	Kg/cm ² g
Temperatura de projeto	110,558	°C
CARACTERÍSTICAS DE AÇÃOAMENTO		
Potência elétrica a vazão de projeto	19961,18	kW
ESQUEMA DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO		

CORRENTES MATERIAIS		
Número de corrente	Corrente de material entrada da bomba	
Descrição		
Pressão	1,033	Kg/cm ² g
Temperatura	80,59	°C
Vazão mássica	8082,72	Kg/h
Vazão molar	87,01	Kmol/h
Entalpia total	1,895	GJ/h
Fração de sólidos	0	
Fração de vapor	0	
PROPRIEDADES DA FASE LÍQUIDA		
Vazão volumétrica @P e T de operação	15,72	m ³ /h
Peso molecular	92,88	Kg/kmol
Densidade	616,51	Kg/m ³
Viscosidade		cP
Condutividade térmica	0,104402	W/m·K
Calor específico		kJ/kg·°C
Tensão superficial		dinas/cm
Fator de compressibilidade		
COMPOSIÇÃO		
Componente	Fração molar	Fração mássica
n-hexano	0,534	
n-heptano	0,453	
n-octano	0,013	

CORRENTES MATERIAIS		
Número de corrente	Corrente de material saída da bomba	
Descrição	corrente de operação da bomba centrífuga	
Pressão	1,033	Kg/cm ² g
Temperatura	80,59	°C
Vazão mássica	8082,72	Kg/h
Vazão molar	87,01	Kmol/h
Entalpia total	1,895	GJ/h
Fração de sólidos	0	
Fração de vapor	0	
PROPRIEDADES DA FASE LÍQUIDA		
Vazão volumétrica @P e T de operação	15,72	m ³ /h
Peso molecular	92,89	Kg/kmol
Densidade	616,51	Kg/m ³
Viscosidade		cP
Condutividade térmica	0,104402	W/m·K
Calor específico		kJ/kg·°C
Tensão superficial		dinas/cm
COMPOSIÇÃO		
Componente	Fração molar	Fração mássica
n-hexano	0,534	
n-heptano	0,453	
n-octano	0,013	

Projeto Instrumentação e controle

A partir do projeto abaixo (figura 3) será proposta a instrumentação necessária para o controle do funcionamento da torre de destilação que tem por objetivo extrair uma corrente enriquecida em n-octano pelo fundo da torre, enquanto pelo topo, obter-se um destilado líquido rico em n-hexano.

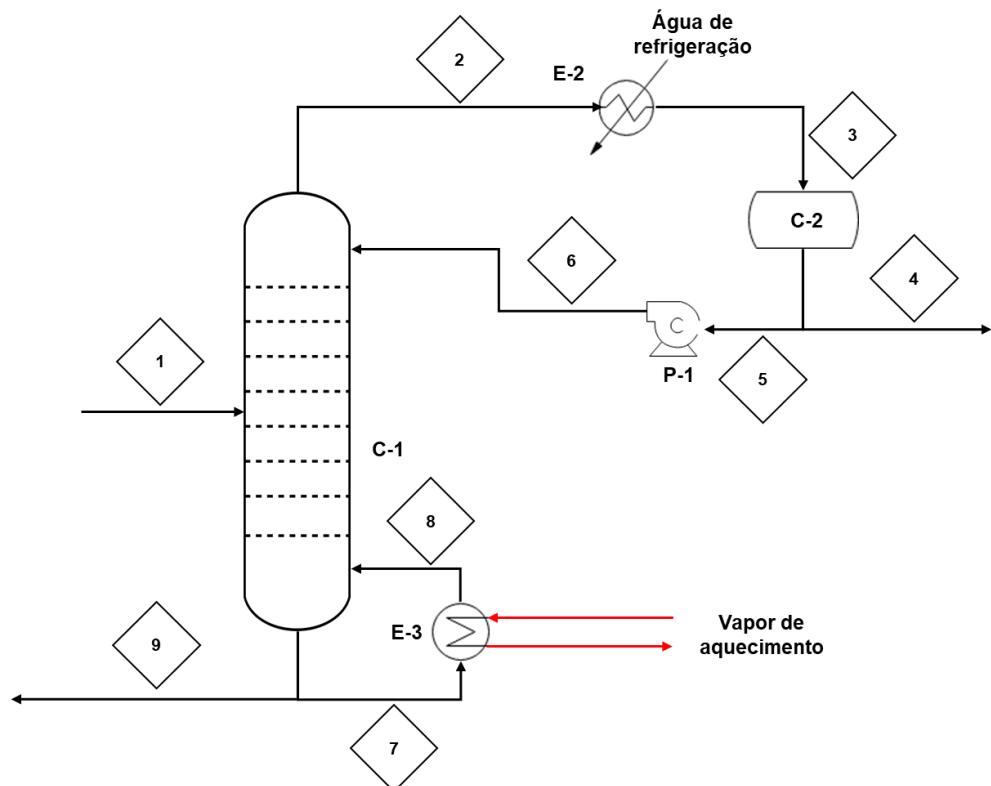


Figura 3. Esquema do sistema de bombeamento do refluxo

Para a instrumentação foram projetadas as seguintes especificações:

ESPECIFICAÇÕES INSTRUMENTOS DE VAZÃO			
Identificação	Localização (núm. da tubulação)	Fase (L, G ou M)	Vazão normal / kg/h
FIC-1	1	L	
FI-2	2	V	
FI-3	4	L	
FIC-4	6	L	
FI-5	7	L	
FI-6	9	L	
FIC-7	Vapor de aquecimento	V	

ESPECIFICAÇÕES INSTRUMENTOS DE NÍVEL			
Identificação	Localização (núm. do vaso)	Tipo de interfase (L-L ou L-V/G)	Nível normal / mm

LIC-1	C-1	L-V	
LIC-2	C-2	L-V	

ESPECIFICAÇÕES INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA			
Identificação	Localização (núm. da tubulação ou vaso)	Fase (L, G ou M)	Temperatura normal / °C
TI-1	1	L	
TI-2	C-1	M	
TI-3	3	V	
T1-4	4	L	
TI-5	8	V	
TI-6	9	L	

ESPECIFICAÇÕES INSTRUMENTOS DE PRESSÃO			
Identificação	Localização (núm. da tubulação ou vaso)	Fase (L, G ou M)	Pressão normal / kg/cm² g
PI-1	1	L	
PIC-2	2	V	
PI-3	3	V	
PI-4	5	L	
PI-5	6	L	
PI-6	7	L	
PI-7	8	V	
PI-8	9	L	

ESPECIFICAÇÕES LAÇOS DE CONTROLE			
Identificação no diagrama mecânico	Localização (núm. da tubulação ou vaso)	Descrição da ação	Elementos vinculados (medidor, controle, acionador e válvula de controle)
FIC-1	1	Controle da vazão de entrada à torre de destilação fracionada	Medidor de vazão Controlador de vazão Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle
PIC-2	2	Controle de pressão da torre de destilação fracionada	Medidor de pressão Controlador de pressão Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle
FIC-4	6	Controle da vazão de saída da bomba e entrada de refluxo na torre	Medidor de vazão Controlador de vazão Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle
FIC-7	Vapor de aquecimento	Controle da Vazão na corrente de vapor de aquecimento para entrada do refluxo no fundo da torre	Medidor de vazão Controlador de vazão Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle
LIC-1	C-1	Controle de nível no fundo da torre de destilação	Medidor de nível Controlador de nível Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle
LIC-2	C-2	Controle de nível no vaso C-2	Medidor de nível Controlador de nível Transdutor elétrico/pneumático Válvula de controle

Com as especificações apresentadas o projeto resultante é apresentado na figura 4.

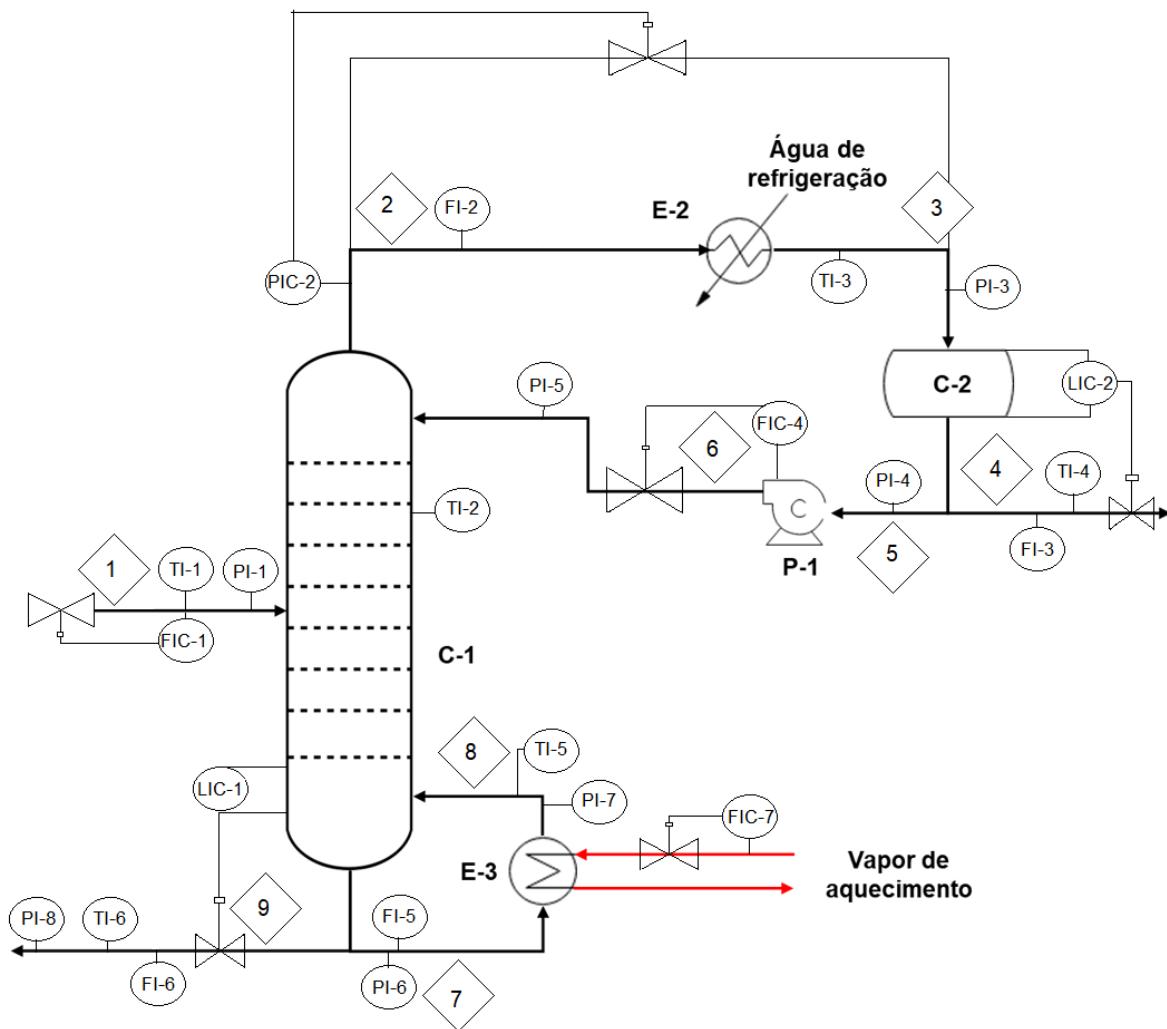


Figura 4. Esquema do sistema de bombeamento com Instrumentação e controle