



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 $\Delta T_{ml} = -444,49$ 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 $h_f = 5700 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo a média entre os limites inferior e superior e para o fluido quente $h_c = 125 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Seguindo a mesma lógica temos $r_f = 0,0003 \text{ h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/kcal}$ e $r_c = 0,0012 \text{ h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/kcal}$, 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:

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

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

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 $A = 30,39 \text{ m}^2$

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

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 fluido 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
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

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 EXTERIOR/FLUÍDO FRIO DO TROCADOR DE PLACAS			TUBO/TUBO 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/cm ² g	2,668	1,654	Kg/cm ² g
Perda de pressão permitida			Kg/cm ²	0,7		Kg/cm ²
Coefficiente individual de transmissão de calor	5700		Kcal / h m ² °C	125		Kcal / h m ² °C
Fator de deposição	0,0003		h m ² °C/ kcal	0,0012		h m ² °C/ kcal
Coefficiente global de transmissão de calor			103,35			Kcal / h m ² °C
ΔT_{ml}			444,49			°C
F_T			1			
Calor trocado			1396000			Kcal/h
CONDIÇÕES DE PROJETO MECÂNICO						
Pressão de projeto			3,5			Kg/cm ² g
Temperatura de projeto			1179			°C
CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TROCADOR						
Área de troca de calor			30,39			m ²
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 (triangulas, triangular rotada, quadrangular, rômbrica)			quadrada			
Diâmetro do casco			12			polegadas

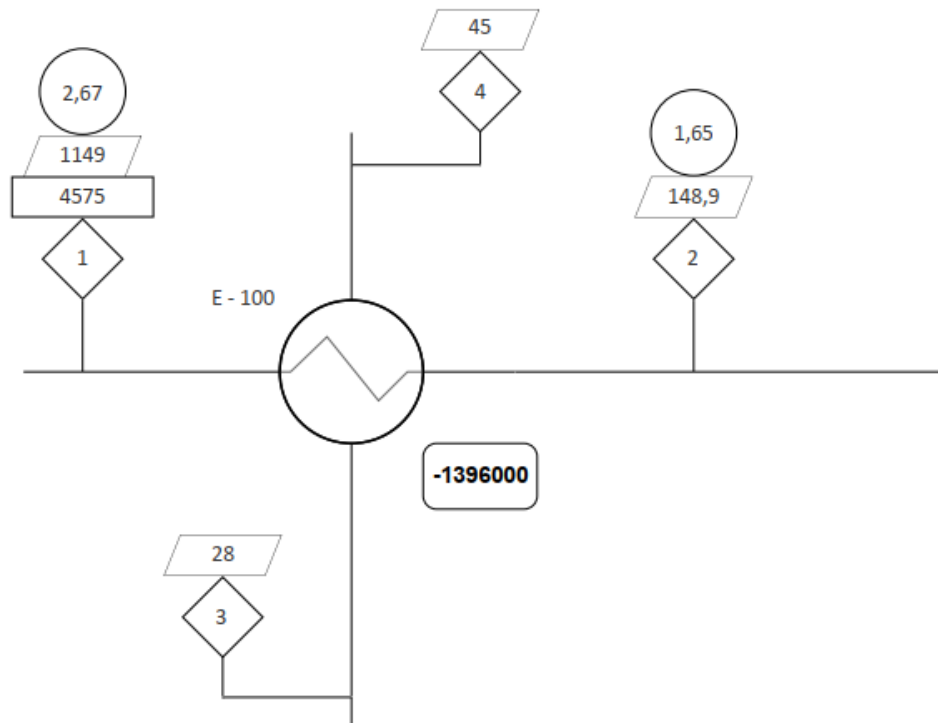


Figura 1: Projeto esquemático do trocador de calor

Projeto Bomba

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

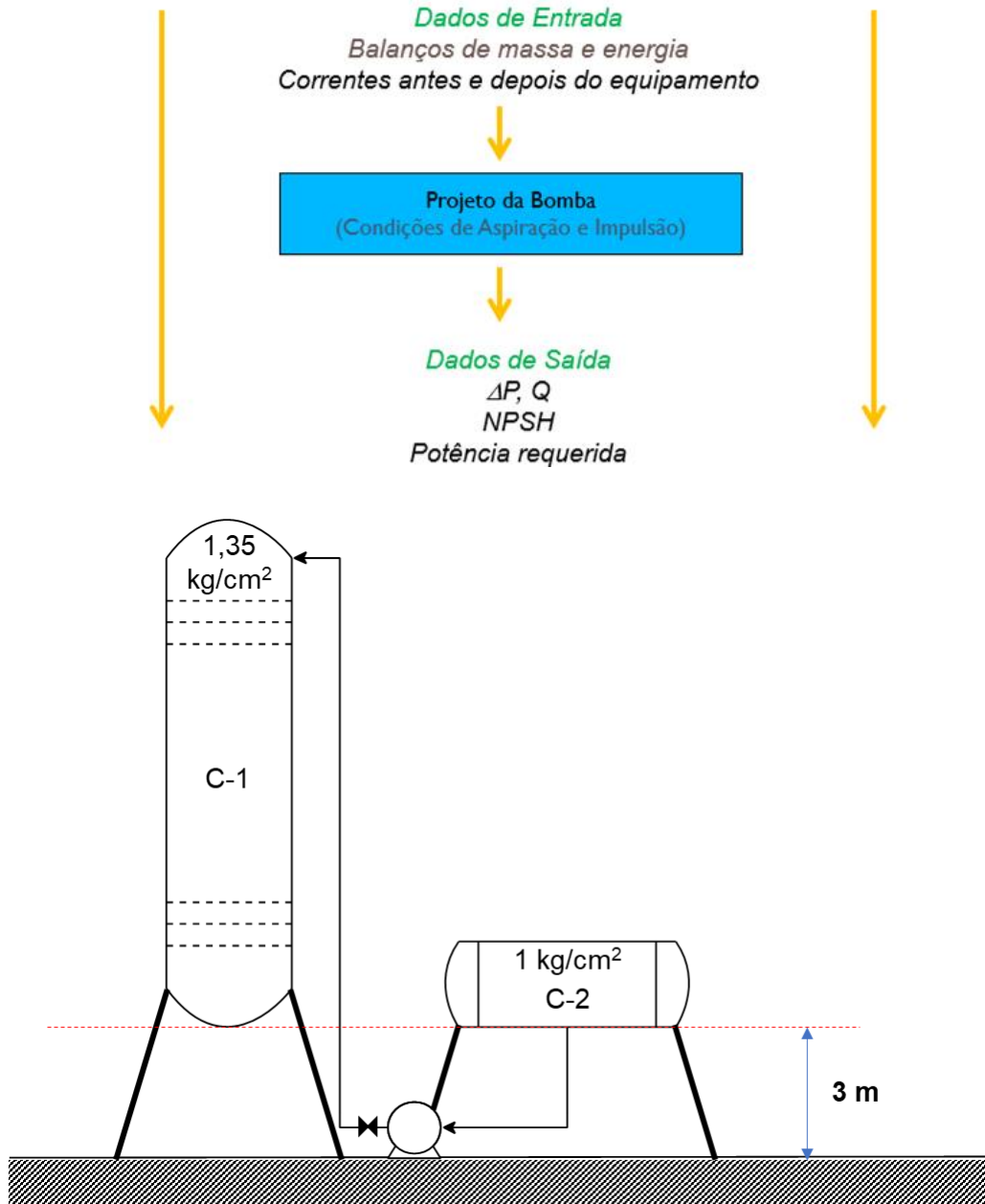


Figura 2. Esquema do sistema de bombeamento do refluxo

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 comprimento (L) do vaso pulmão C_2 , $D = 1m$ $L = 5m$. Nele a pressão é dada por $P_r = 1kg/cm^2$ e o fluido 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 $P_r = 1,35kg/cm^2$ e o fluido apresenta uma densidade de $\rho = 616,5kg/m^3$.

Para o cálculo da pressão total na impulsão temos:

$$P_i = P_r + P_{cota} + \Delta P_{valvula} + \Delta P_i$$

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

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

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

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

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

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

Portanto tem-se que:

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

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

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

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

$$\Delta P = P_i - P_a$$

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

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

$$P_{i_{max}} = P_{a_{max}} + \Delta P_{max}$$

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

Portanto, temos a pressão de projeto de $\Delta P = 1,189 \text{ kg/cm}^2$, 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. $NPSH = (P_{\text{aspiração}} - P_{\text{vapor}}) \cdot \rho / 10 = (1,399 - 1,033) \cdot 616,5 / 10 = 22,55$

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

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

$$W_a = 15,72 \cdot 1,189 / 27,4 = 0,682 \text{ CV} = 0,509 \text{ kW}$$

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

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

Portanto temos uma potência absorvida de $W_a = 0,509 \text{ kW}$, potência hidráulica de $W_h = 169,67 \text{ kW}$ e potência real consumida de $W_c = 19961,18 \text{ kW}$, 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 FLUIDOS E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO				
PARTE DA BOMBA	Aspiração		Impulsão	
Vazão volumétrica de operação	13,1			m ³ /h
Pressão	1	kg/cm ² g	1,35	kg/cm ² g
Temperatura	80,588	°C	80,588	°C
Densidade	616,5	kg/m ³	616,5	kg/m ³
Viscosidade		cP		cP
Pressão de vapor	1,03323	kg/cm ² g	1,03323	kg/cm ² 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			kg/cm ² 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	<i>1,189</i>	kg/cm ²
Pressão máxima na aspiração	<i>3,929</i>	kg/cm ² g
Pressão máxima na impulsão	<i>5,1172</i>	
Diâmetro da tubulação aspiração/impulsão	-	-
		polegadas

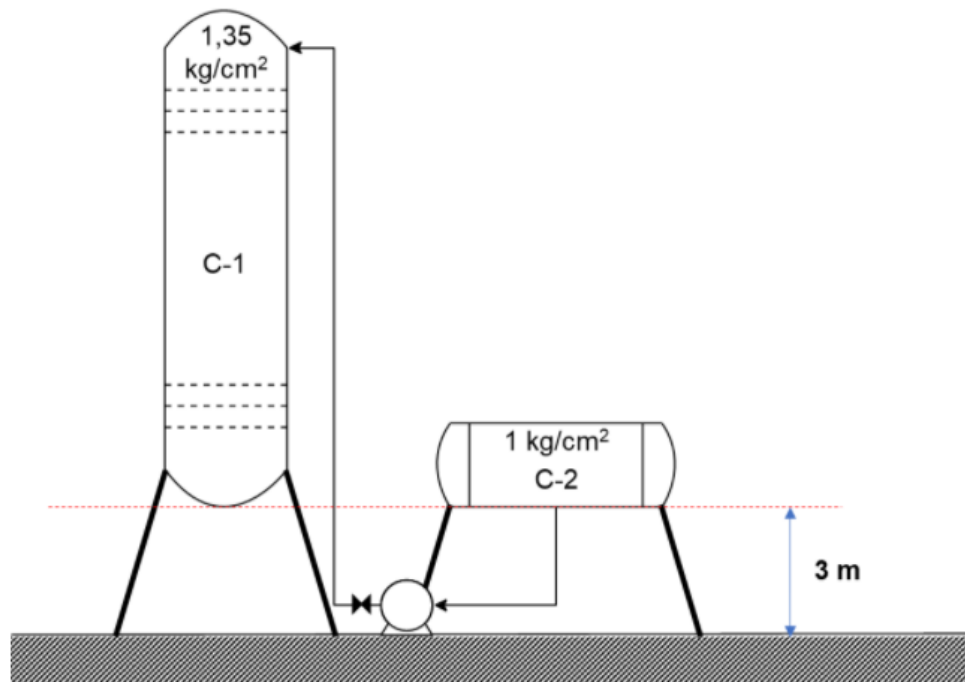
CONDIÇÕES DE PROJETO MECÂNICO

Pressão de projeto	<i>5,1172</i>	Kg/cm ² g
Temperatura de projeto	<i>110,558</i>	°C

CARACTERÍSTICAS DE ACIONAMENTO

Potência elétrica a vazão de projeto	<i>19961,18</i>	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.

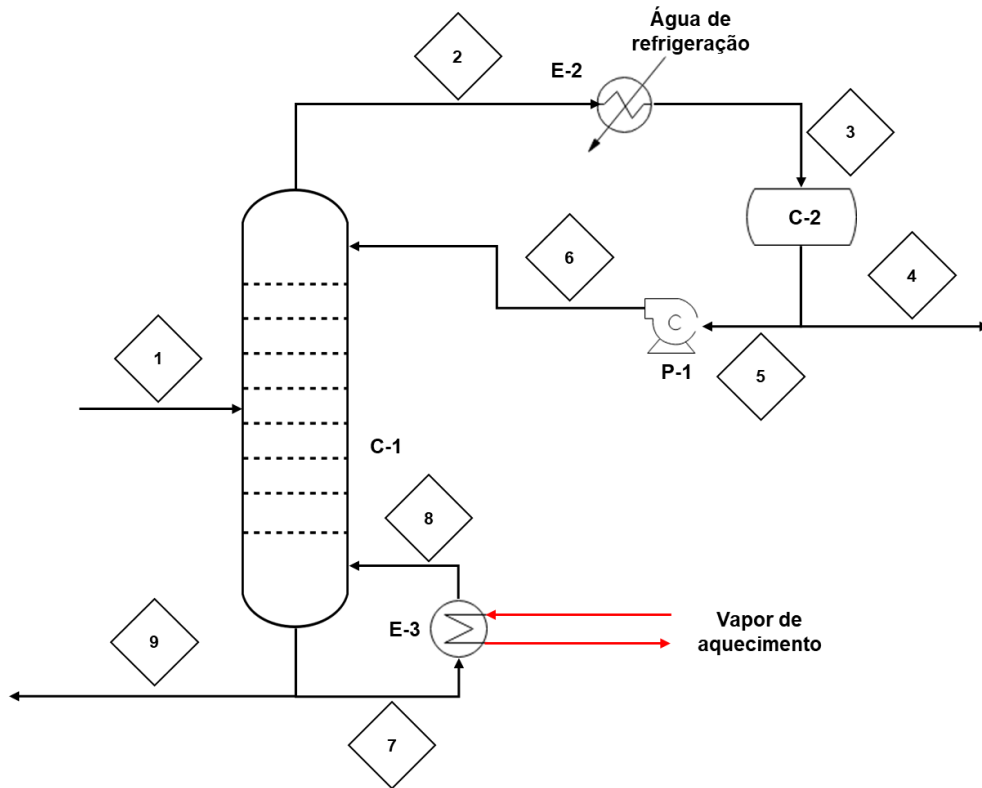


Figura 3. Esquema do sistema de bombeamento do refluxo

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	
TI-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/cm ² 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.

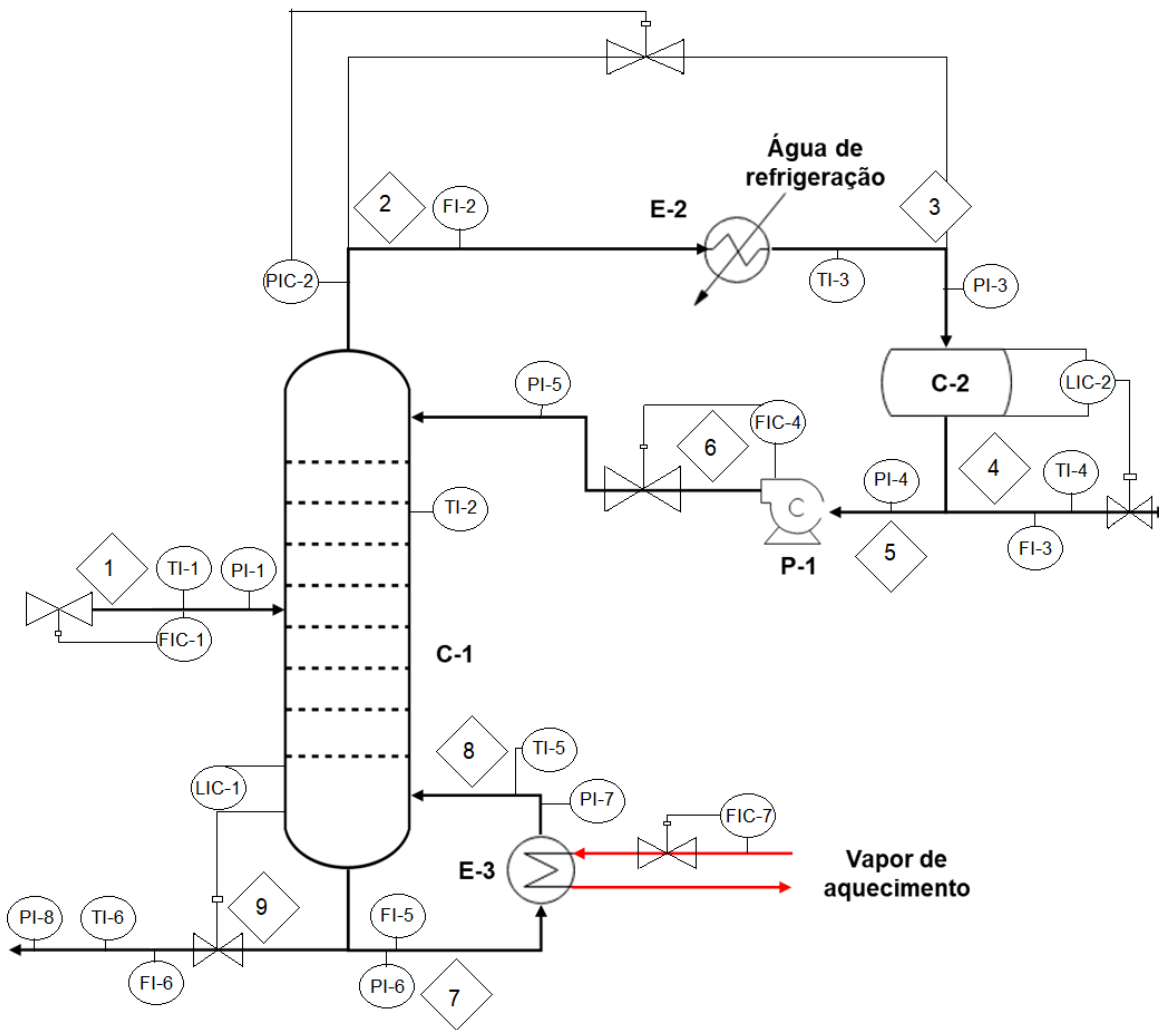


Figura 4. Esquema do sistema de bombeamento com Instrumentação e controle