

PHA 5053 – PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

Aula 9 – Equações básicas, balanço de massa e especificação de sistemas



Prof.: José Carlos Mierzwa
mierzwa@usp.br

INTRODUÇÃO

- O dimensionamento de um sistema de separação por membrana requer o conhecimento dos seguintes parâmetros:
 - Vazão a ser tratada ou produzida;
 - Características da alimentação e do produto;
 - Capacidade de produção das membranas;
 - Taxa de rejeição de contaminantes;
 - Taxa de recuperação de água ou fator de concentração.

INTRODUÇÃO

- As informações relativas à capacidade das membranas são obtidas com os fornecedores ou por meio de ensaios piloto;
- Os dados sobre a capacidade do sistema são os parâmetros de projeto definidos para cada situação;
- A partir da escolha do arranjo a ser utilizado são desenvolvidas as relações necessárias para a definição das condições de operação.

INTRODUÇÃO

- Com base nas condições de operação do sistema é possível obter as características dos principais componentes:
 - Área de membrana;
 - Número de módulos;
 - Número de vasos de pressão;
 - Vazão da bomba de alimentação.

EQUAÇÕES BÁSICAS

- Área de membrana:
 - $A_M = Q_P/q_M$
 - Q_P = vazão de permeado ou purificado ($L^3.T^{-1}$)
 - q_M = taxa de produção da membrana ($L^3.L^{-2}.T^{-1}$)
- Número de módulos:
 - $N_M = A_M/a_M$
 - a_M = área de membrana por módulo (L^2)
- Número de vasos (espiral):
 - $N_V = N_M/n$
 - n = número de módulos por vaso.

EQUAÇÕES BÁSICAS (CONT.)

- Taxa de recuperação de água:

- $Y = Q_P / Q_A$

- Q_P = vazão de permeado ($L^3.T^{-1}$)

- Q_A = vazão de alimentação ($L^3.T^{-1}$)

- Passagem de contaminantes:

- $P_C = C_P / C_A$

- C_P = concentração no permeado ($M.L^{-3}$)

- C_A = concentração na alimentação ($M.L^{-3}$)

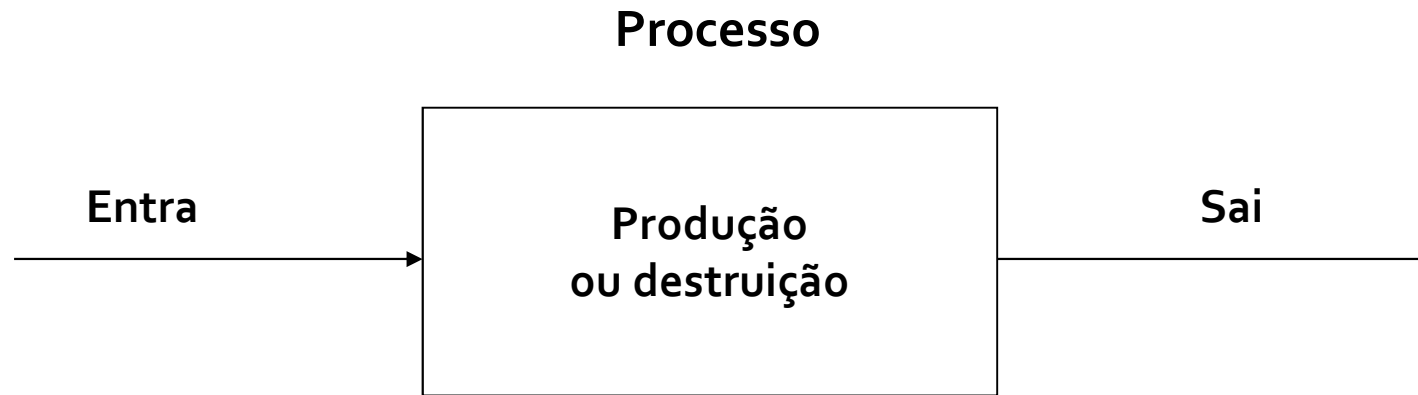
EQUAÇÕES BÁSICAS (CONT.)

- Taxa de rejeição de contaminantes:
 - $R_C = 1 - P_C \rightarrow P_C = 1 - R$
- Fator de concentração de contaminantes (F_C):
 - $F_C = C_R / C_A$
 - C_R = concentração do contaminante no rejeito ($M.L^{-3}$)
 - C_A = concentração do contaminantes na alimentação ($M.L^{-3}$)
 - $F_C = (1 - Y.P_C) / (1 - Y)$ ou
 - $F_C = [1 - Y(1 - R)] / (1 - Y)$

BALANÇO DE MASSA

- Relaciona os fluxos de alimentação e saída de um sistema com as suas respectivas concentrações;
- Em alguns sistemas deve-se considerar os fenômenos de produção e desaparecimento dos contaminantes;
- Sistemas onde ocorrem reações químicas.

BALANÇO DE MASSA (CONT.)



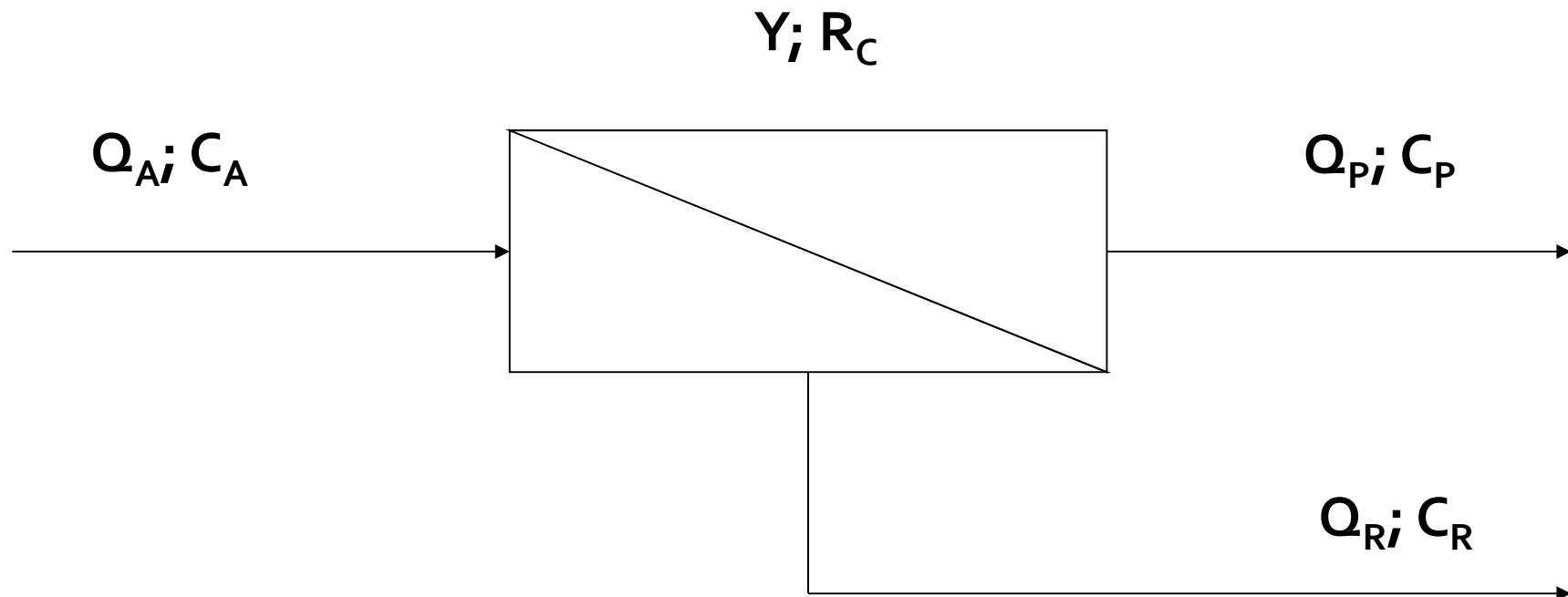
- Lei da Conservação de Massa;
- Equação básica de balanço:
$$\text{Entra} - \text{Sai} + \text{Produção} - \text{Destruição} = \text{acúmulo}$$

BALANÇO DE MASSA (CONT.)

- Para sistemas de separação por membranas não há produção nem destruição de contaminantes;
- Em regime estacionário também não há acúmulo de matéria no sistema;

Entra no sistema = Sai do sistema

DIAGRAMA BÁSICO PARA BALANÇO DE MASSA



RELAÇÕES OBTIDAS PELO BALANÇO DE MASSA

- Vazões (massa específica não varia):

$$\begin{array}{ccccccc} \diamond & Q_A & = & Q_P & + & Q_R \\ & \text{(entrada)} & & & & \text{(saída)} \end{array}$$

- Para os contaminantes:

$$\begin{array}{ccccccc} \diamond & Q_A \cdot C_A & = & Q_P \cdot C_P & + & Q_R \cdot C_R \\ & \text{(entrada)} & & & & \text{(saída)} \end{array}$$

RELAÇÕES DERIVADAS – EQUAÇÕES BÁSICAS E BALANÇO DE MASSA

- Fator de redução de volume:

- $FRV = Q_A / Q_R$

- $Q_R = Q_A - Q_P$ (1)

- $Q_P = Y \cdot Q_A$ (2)

- (2) em (1)

- $Q_R = Q_A - Y \cdot Q_A \rightarrow Q_R = Q_A \cdot (1 - Y)$

- $FRV = Q_A / [Q_A \cdot (1 - Y)]$

- $FRV = 1 / (1 - Y)$

RELAÇÕES DERIVADAS – EQUAÇÕES BÁSICAS E BALANÇO DE MASSA (CONT.)

- Fator de concentração de contaminantes:
 - $(F_C = C_R / C_A)$
- Desenvolver uma expressão que relacione C_R com a taxa de recuperação de água e rejeição de contaminantes;
- Balanço de massa para contaminantes:
 - $Q_A \cdot C_A = Q_P \cdot C_P + Q_R \cdot C_R$
 - $C_R = (Q_A \cdot C_A - Q_P \cdot C_P) / Q_R$

RELAÇÕES DERIVADAS – EQUAÇÕES BÁSICAS E BALANÇO DE MASSA (CONT.)

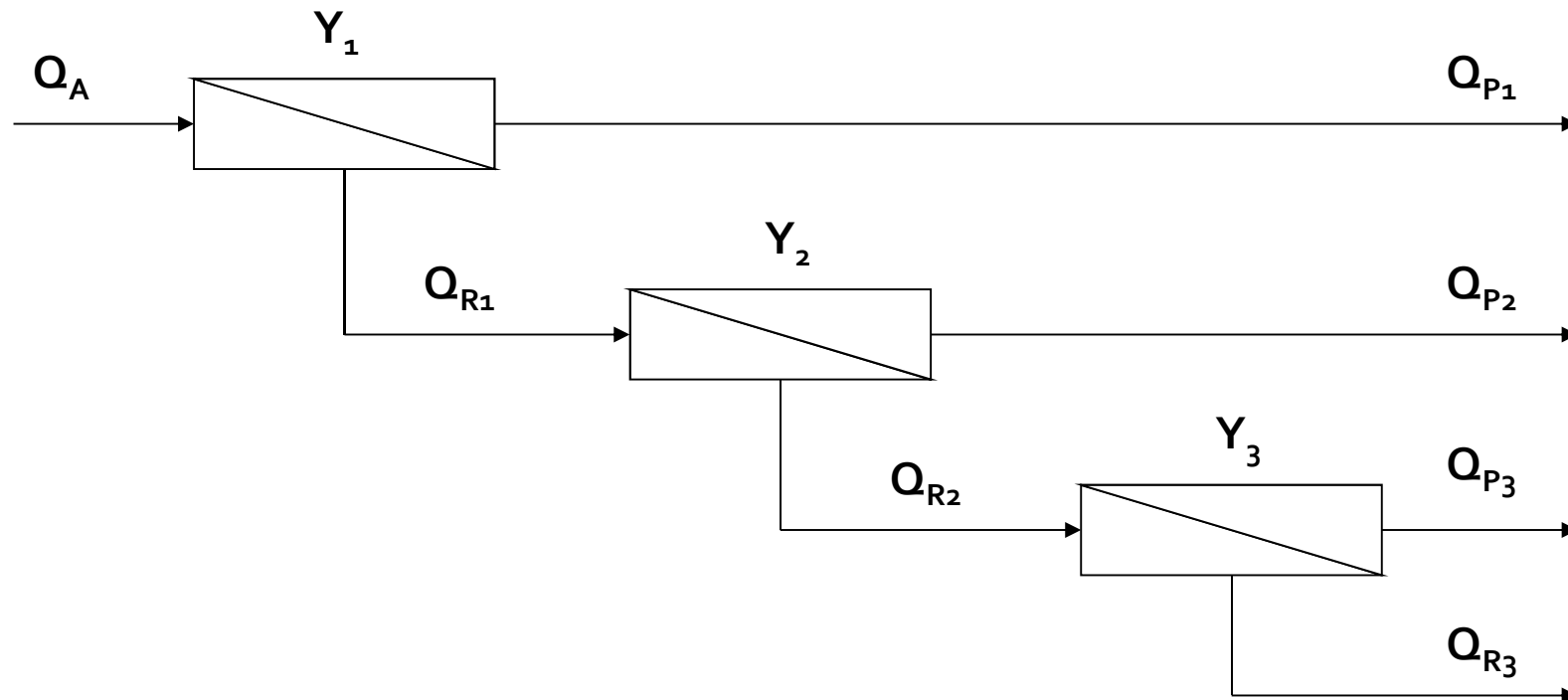
- $Q_P = Q_A \cdot Y$
- $Q_R = Q_A \cdot (1 - Y)$
- $C_R = (C_A - Y \cdot C_P) / (1 - Y)$
- $F_C = (C_A - Y \cdot C_P) / [(1 - Y) \cdot C_A]$

$$F_C = \frac{C_A}{(1 - Y) \cdot C_A} - \frac{Y \cdot C_P}{(1 - Y) \cdot C_A}$$

$$\frac{C_P}{C_A} = P_C = 1 - R_C$$

$$F_C = \frac{1 - Y \cdot (1 - R_C)}{(1 - Y)}$$

CÁLCULO DA TAXA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA PARA MEMBRANAS EM SÉRIE



CÁLCULO DA TAXA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA PARA MEMBRANAS EM SÉRIE (CONT.)

$$Y_1 = Q_{P1} / Q_A$$

$$Q_{R1} = Q_A \cdot (1 - Y_1)$$

$$Y_2 = Q_{P2} / Q_{R1}$$

$$Q_{R2} = Q_{R1} \cdot (1 - Y_2)$$

$$Y_3 = Q_{P3} / Q_{R2}$$

$$Q_{R3} = Q_{R2} \cdot (1 - Y_3)$$

$$Q_{Rn} = Q_A \cdot \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$$

$$Q_{PT} = Q_A - Q_{Rn}$$

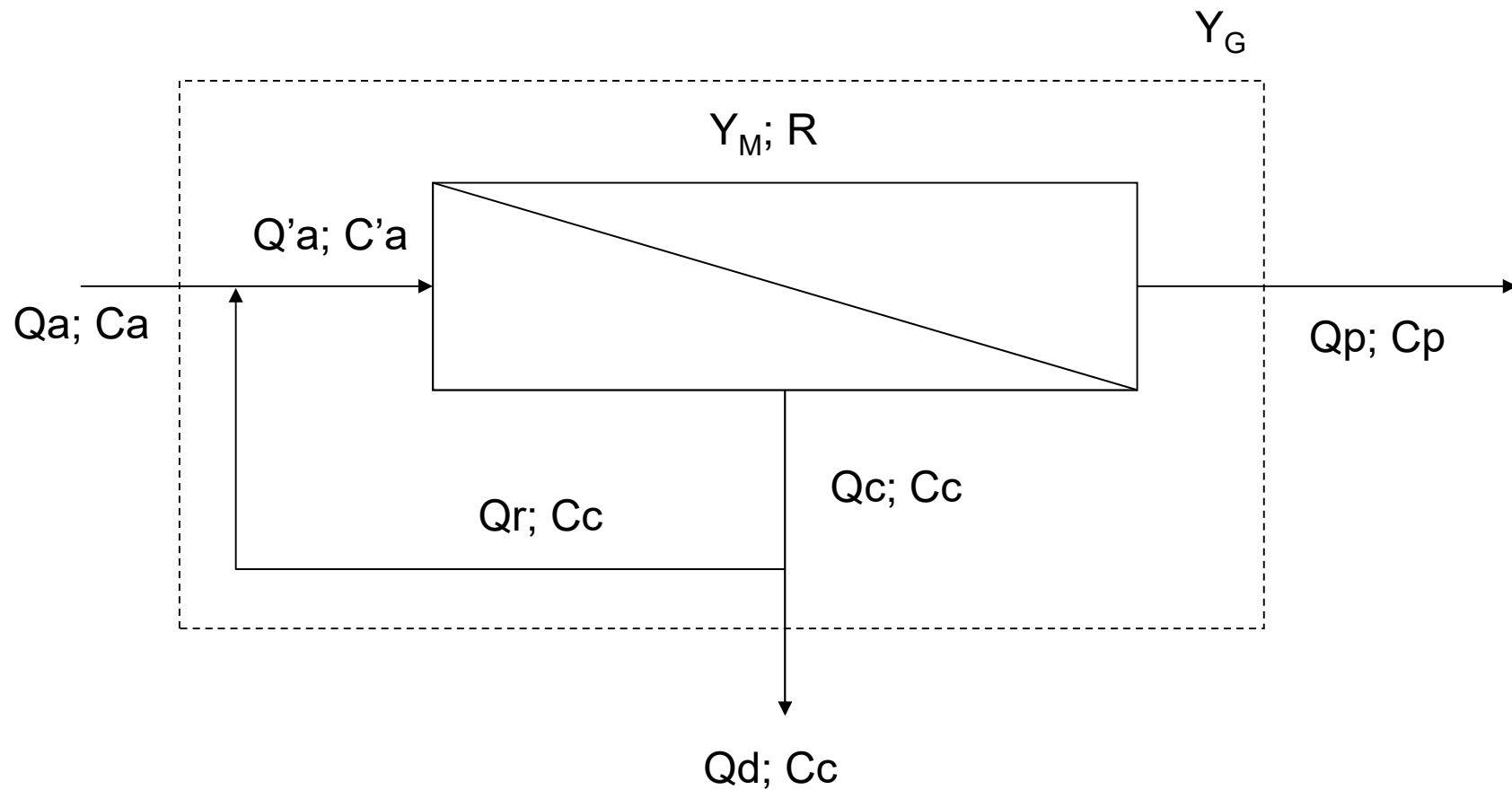
$$Y_G = \frac{Q_{PT}}{Q_A}$$

$$Y_G = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i)$$

Para Y_i constante:

$$Y_G = 1 - (1 - Y)^n$$

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS COM RECIRCULAÇÃO



$$Q_p = Y_G \cdot Q_A$$

$$Q'_A = \frac{Q_p}{Y_M}$$

$$Q'_A = \frac{Y_G}{Y_M} \cdot Q_A$$

$$Q_R = Q'_A - Q_A$$

$$Q_C = Q'_A \cdot (1 - Y_M)$$

$$Q_R = Q_A \cdot \left(\frac{Y_G}{Y_M} - 1 \right)$$

$$Q_C = Q_A \cdot \left(\frac{Y_G}{Y_M} - Y_G \right)$$

$$Q_D = Q_A \cdot (1 - Y_G)$$

BALANÇO DE CONTAMINANTES

$$Q_A \cdot C_A = Q_p \cdot C_p + Q_D \cdot C_D \quad (1)$$

$$Q_P = Y_G \cdot Q_A \quad (2)$$

$$Q_D = Q_A \cdot (1 - Y_G) \quad (3)$$

$$C_D = C_C \quad (4)$$

$$\frac{C_P}{C'_A} = 1 - R \quad (5)$$

$$F_C = \frac{C_C}{C'_A} = \frac{1 - Y_M \cdot (1 - R)}{1 - Y_M} \quad (6)$$

$$Q_A.C_A = Q_A.Y_G.C_p + Q_A.(1-Y_G).C_C \quad (2 \text{ e } 3 \text{ em } 1) \quad (7)$$

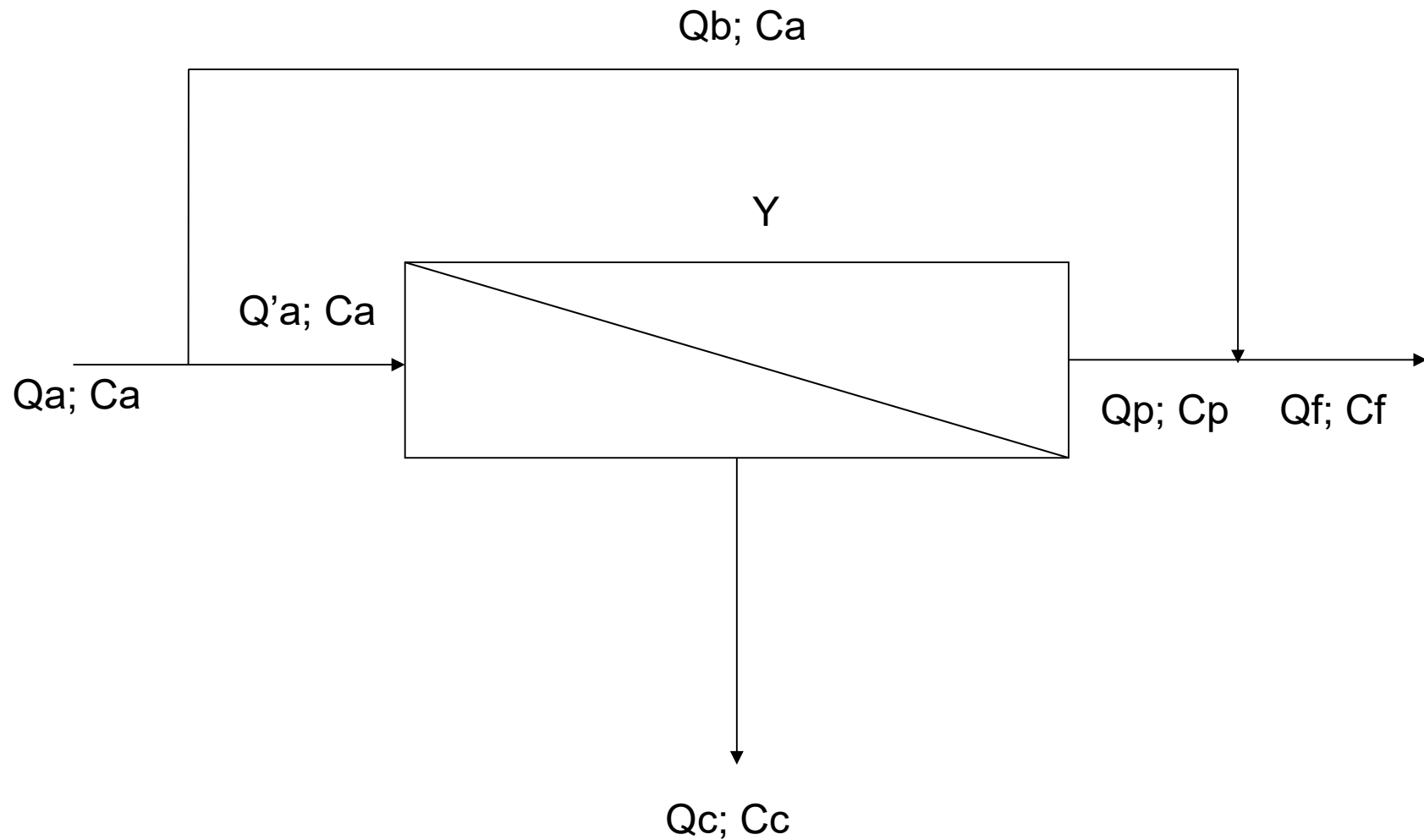
$$C_A = \frac{C_p}{(1-R)} \quad (8)$$

$$C_C = \frac{C_p}{(1-R)} \cdot \frac{[1-Y_M.(1-R)]}{(1-Y_M)} \quad (8 \text{ em } 6) \quad (9)$$

$$C_A = C_p.Y_G + C_p \cdot \frac{(1-Y_G)}{(1-R)} \cdot \frac{[1-Y_M.(1-R)]}{(1-Y_M)} \quad (9 \text{ em } 7) \quad (10)$$

$$C_A = C_p \cdot \left[Y_G + \frac{(1-Y_G)}{(1-R)} \cdot \frac{[1-Y_M.(1-R)]}{(1-Y_M)} \right] \quad (11)$$

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS COM DESVIO



$$Q_p + Q_b = Q_f$$

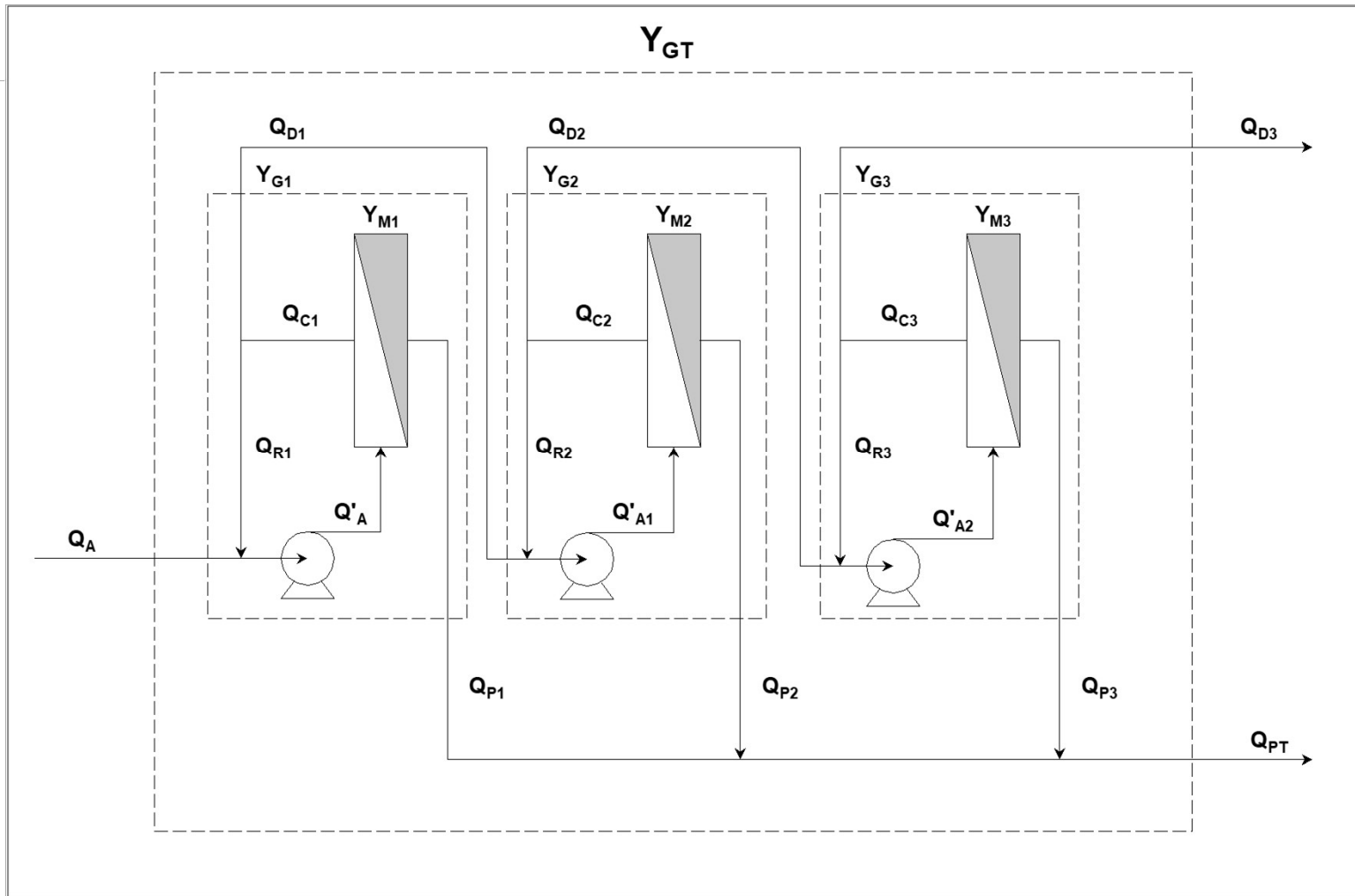
$$Q_b = Q_f - Q_p$$

$$Q_p \cdot C_p + Q_b \cdot C_a = Q_f \cdot C_f$$

$$\frac{C_p}{C_a} = 1 - \frac{\% \text{ Rejeição}}{100}$$

$$Q_p = \frac{Q_f \cdot (C_a - C_f)}{C_a \cdot \% \text{ Rejeição}} \cdot 100$$

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS



$$Q_A = Q_{Dn} + Q_{PT}$$

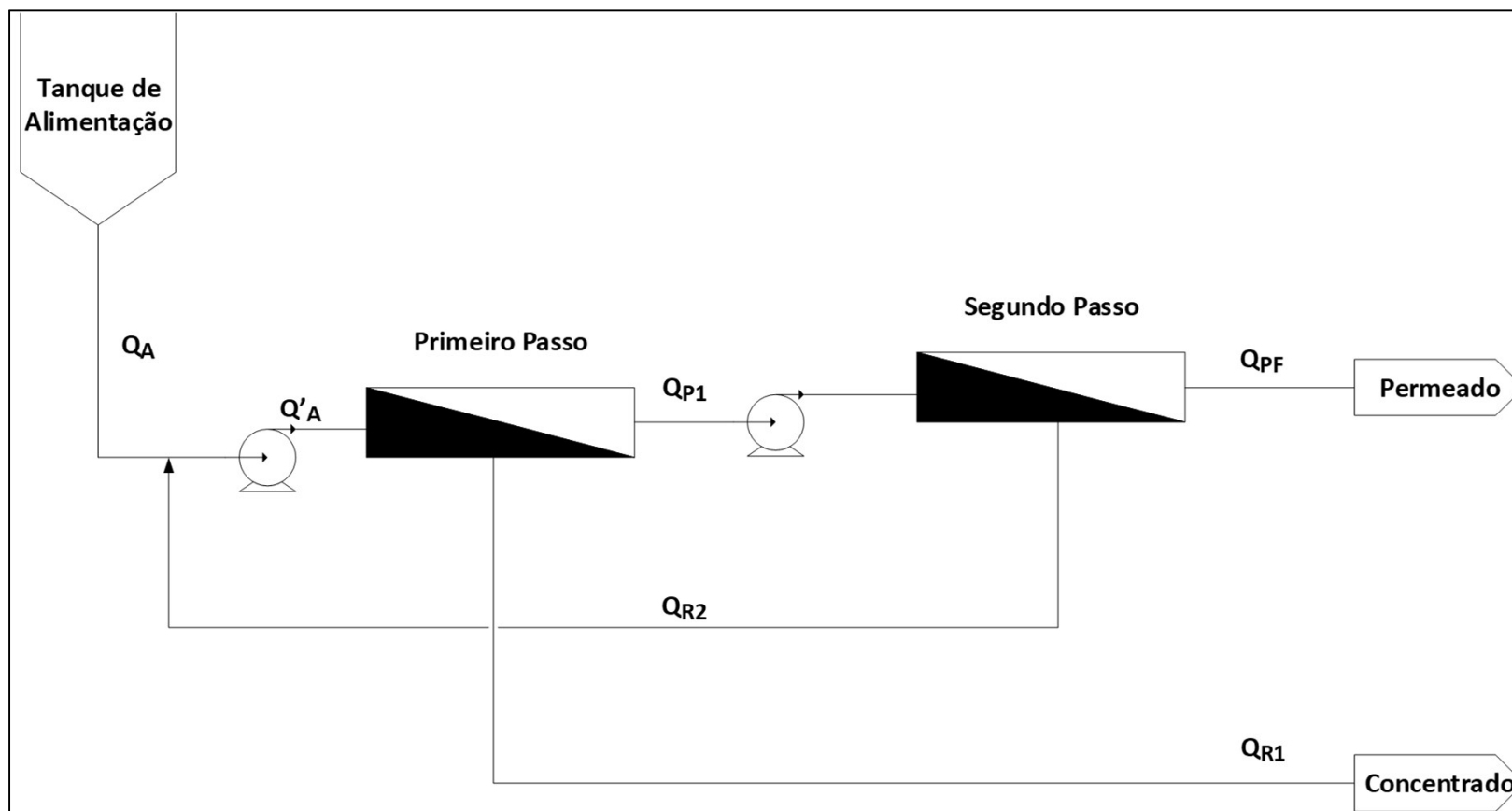
$$Q_{PT} = Q_A \cdot Y_{GT}$$

$$Q_{Dn} = Q_A \cdot (1 - Y_{GT})$$

$$Q_{Dn} = Q_A \cdot \prod_{i=1}^n (1 - Y_{Gi})$$

$$Y_{GT} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_{Gi})$$

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS DE DUPLO PASSO



$$Q_A = Q_{PF} + Q_{R1}$$

$$Q_{PF} = Q_A \cdot Y_G$$

$$Q_{R1} = Q_A \cdot (1 - Y_G)$$

$$Y_G = \frac{Y_1 \cdot Y_2}{1 - Y_1 \cdot (1 - Y_2)}$$

ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA

- Com base nos dados utilizados no balanço de massa e resultados obtidos e feita a especificação do sistema;
- Na especificação devem ser apresentadas as seguintes informações:
 - Capacidade do sistema;
 - Regime de operação;
 - Tipo de membrana utilizada;

ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA (CONT.)

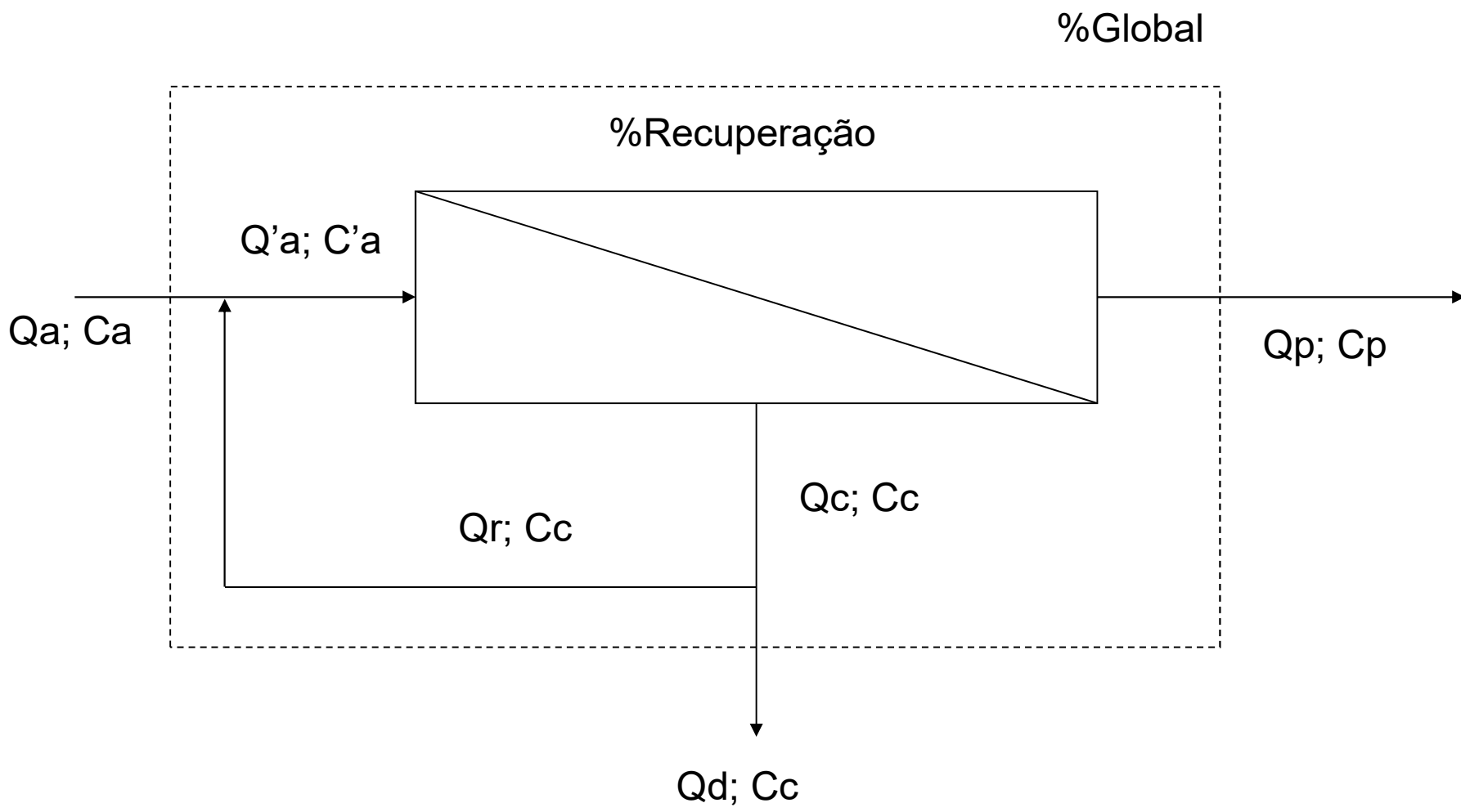
- Características da membrana:
 - Tipo;
 - Taxa de produção;
 - Limites operacionais;
- Área total de membrana;
- Configuração do sistema:
 - Passagem única;
 - Recirculação de concentrado;
 - Duplo passo;
 - Sistema com desvio;
 - Múltiplos estágios.

ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA (CONT.)

- Parâmetros operacionais:
 - Pressão de operação;
 - Capacidade da bomba de alimentação;
 - Vazão de recirculação e desvio.
- Requisitos de instrumentação e controle;
- Subsistemas de pré-tratamento e limpeza química.

EXERCÍCIO

- Dimensionar um sistema de ultrafiltração (membranas enroladas em espiral) para tratar $100 \text{ m}^3/\text{h}$ de efluente, de maneira que a vazão de concentrado descartado seja $1/10$ da alimentação. Utilizar os seguintes dados:
 - Sistema operando com recirculação de concentrado;
 - Número máximo de membranas em série = 4;
 - Taxa de produção 20 L/h.m^2 ;
 - Recuperação de água por membrana = 10 %
 - Área de membrana por módulo = 32 m^2 ;
 - Apresentar um fluxograma do processo com todas as correntes envolvidas.



RESOLUÇÃO:

- Vazão afluyente (Q_A) = 100 m³/h;
- $Q_D = Q_A / 10 = 10 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_A = Q_P + Q_D$
- $Q_P = 100 - 10 = 90 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Y_G = Q_P / Q_A = 90 / 100 = 0,9 \text{ (90\%)}$
- $Y_M = 1 - (1 - Y_{\text{membrana}})^n = 0,344$

RESOLUÇÃO:

- Vazão de alimentação das membranas (Q'_A):

- $Q'_A = Y_G \cdot Q_A / Y_M = 100 \cdot 0,9 / 0,344$

- $Q'_A = 261,63 \text{ m}_3/\text{h}$

- Vazão de recirculação (Q_R)

- $Q_R = Q'_A - Q_A = 261,63 - 100$

- $Q_R = 161,63 \text{ m}^3/\text{h}$

RESOLUÇÃO:

- Área de membrana:
 - $A_M = Q_P / q_M$
 - $A_M = 90.000 / 20 = 4.500 \text{ m}^2$
- Número de membranas:
 - $N_M = A_M / a$
 - $N_M = 4.500 / 32 = 140,6 \rightarrow 141$ membranas
- Número de vasos de pressão:
 - $N_V = N_M / n = 141 / 4 = 35,2 \rightarrow 36$ vasos
- Verificar as condições hidráulicas.

ATIVIDADE

- Um laboratório necessita produzir água para a realização de análises e ensaios. Foi proposta a utilização de um sistema de duplo passo. Dimensione um sistema para atender aos seguintes requisitos:
 - Concentração de SDT na alimentação = 100 mg/L;
 - Taxa de rejeição de sais: 1º passo 98% e 2º passo 99%
 - Vazão de permeado (2º passo) = 1500 L/h;
 - Recuperação de água em cada passo:
 - Primeiro = 70%;
 - Segundo = 40%.
 - Todo o concentrado do segundo passo é recirculado para o primeiro passo;
- Apresente as principais características do sistema e correntes envolvidas.