PHA 3418 – TECNOLOGIA DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES

AULA 11 – 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 ($M.L^{-3}$)

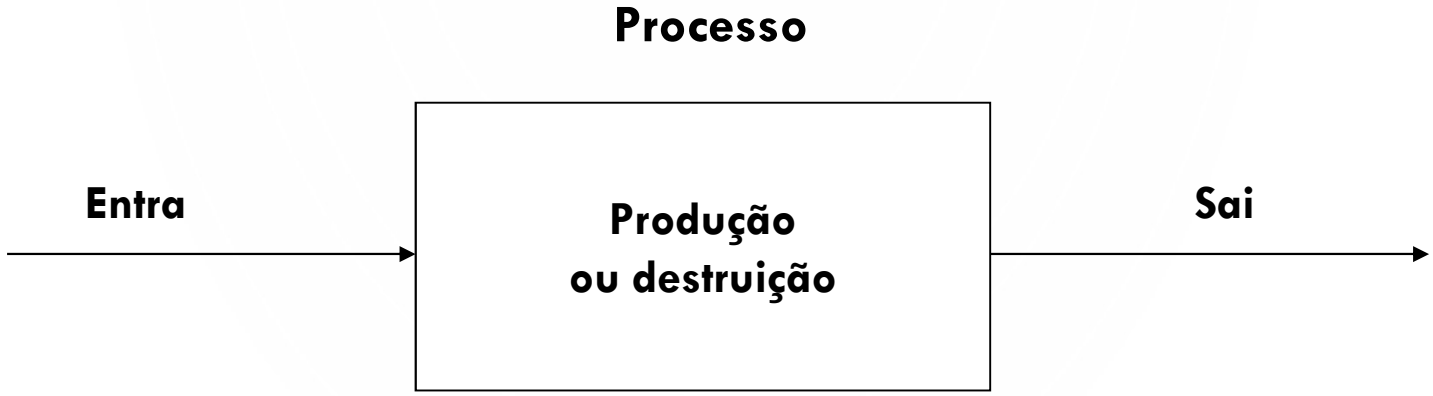
EQUAÇÕES BÁSICAS (CONT.)

- TAXA DE REJEIÇÃO DE CONTAMINANTES:
  - $R_C = 1 - P_C$ ➔ $P_C = 1 - R$
- 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:

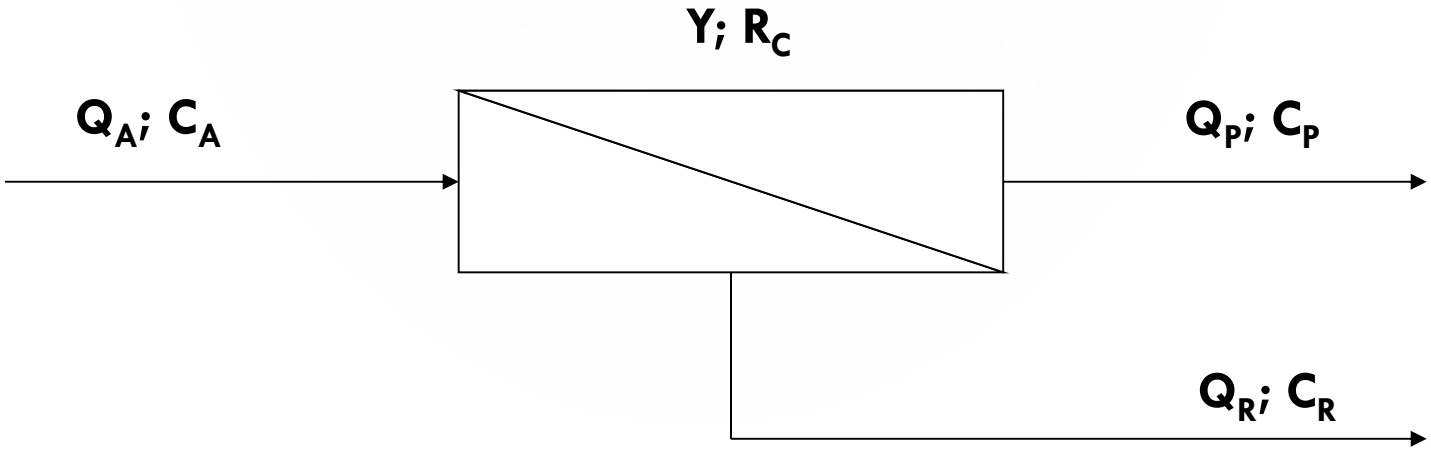
ENTRA – SAI + PRODUÇÃO – DESTRUIÇÃO = ACÚMULO

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 (DENSIDADE CONSTANTE):
  - $Q_A = Q_P + Q_R$

    (ENTRADA) (SAÍDA)
- PARA OS CONTAMINANTES:
  - $Q_A.C_A = Q_P.C_P + Q_R.C_R$

    (ENTRADA) (SAÍDA)

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:
  - $Q_A.C_A = Q_P.C_P + Q_R.C_R$
  - $C_R = (Q_A.C_A – Q_P.C_P) / Q_R$

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

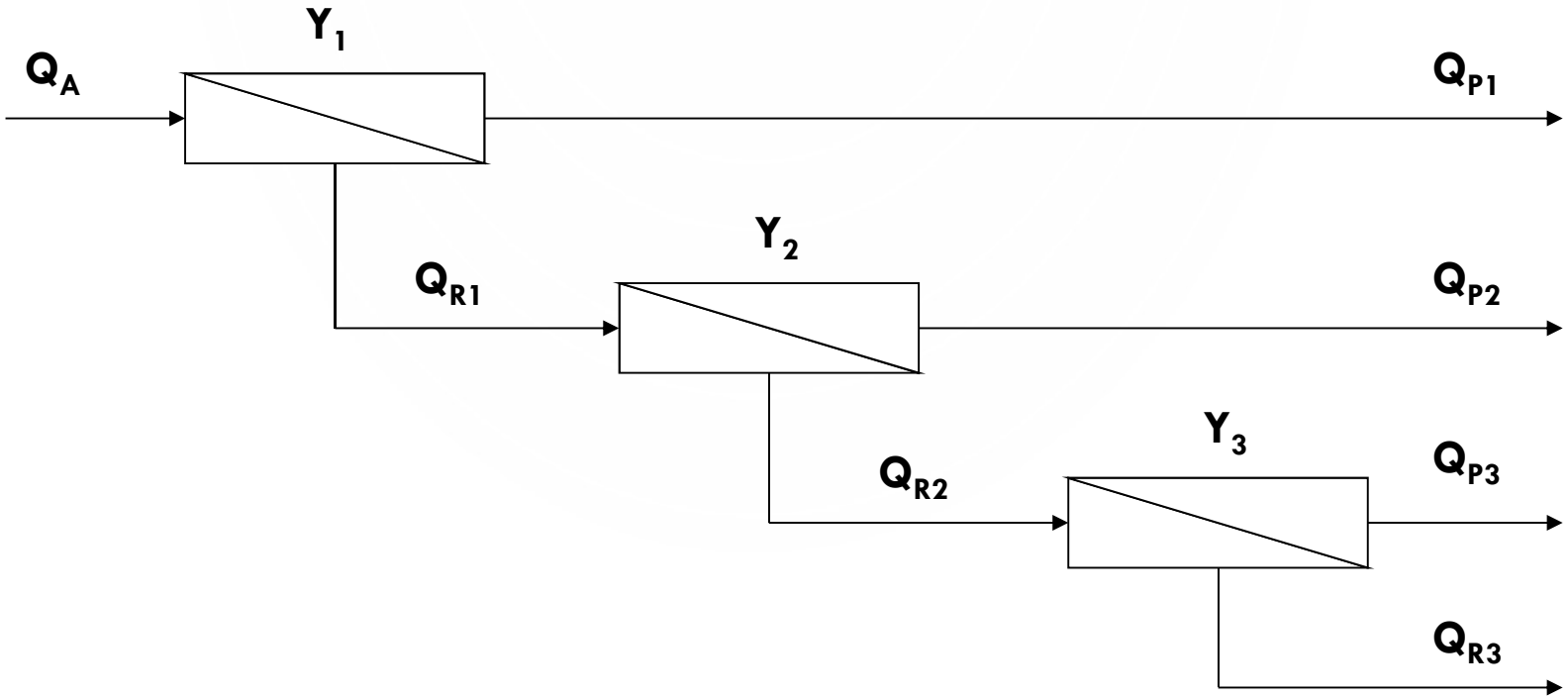
- $Q_P = Q_A.Y$
- $Q_R = Q_A.(1-Y)$
- $C_R = (C_A – Y.C_P) / (1 – Y)$
- $F_C = (C_A – Y.C_P) / [(1 – Y).C_A)]$

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

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

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

CÁLCULO DA TAXA DE RECUPERAÇÃO DE ÁGUA PARA MEMBRANAS EM SÉRIE



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

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

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

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

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

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

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

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

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

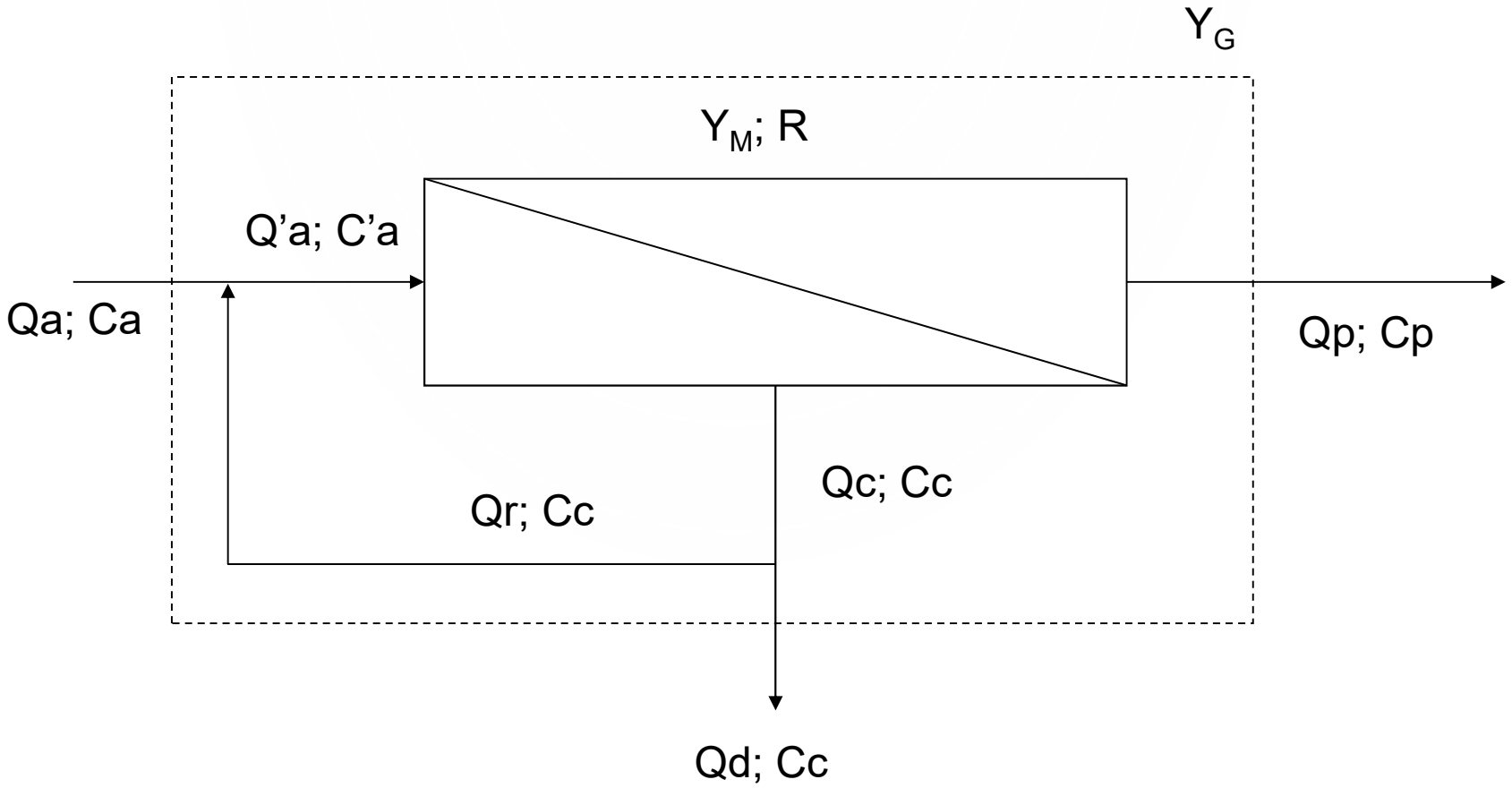
$$Y_G = \frac{Q_{PT}}{Q_A}$$

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

$$Para \quad Y_i \quad cons\tan te:$$

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

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS COM RECIRCULAÇÃO



$$Q_p = Y_G . Q_A$$

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

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

$$Q_R = Q'_A - Q_A$$

$$Q_C = Q'_A . (1 - Y_M)$$

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

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

$$Q_D = Q_A . (1 - Y_G)$$

BALANÇO DE CONTAMINANTES

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

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

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

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

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

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

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

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

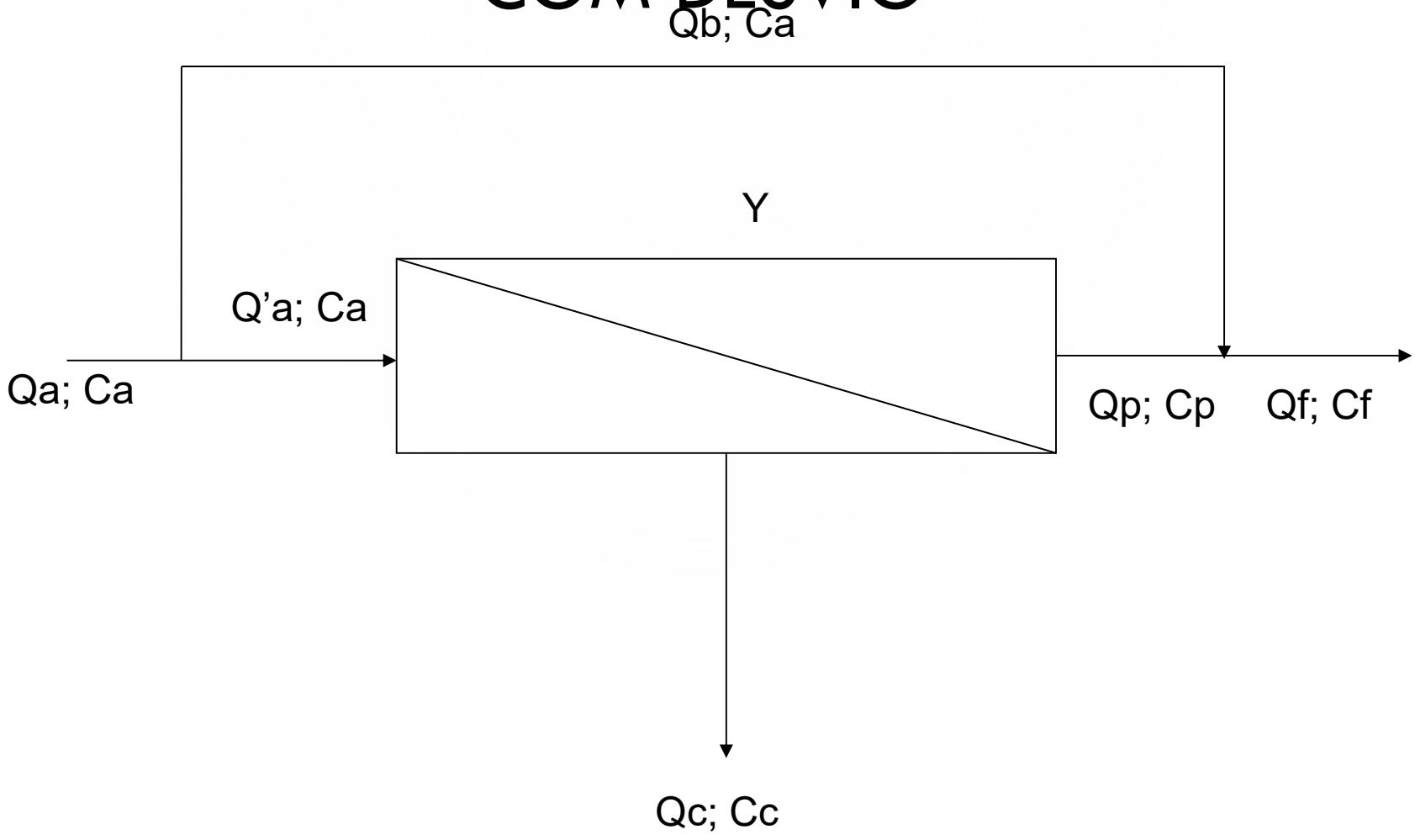
$$C_C = \frac{C_P}{(1-R)}.\frac{[1-Y_M.(1-R)]}{(1-Y_M)} \quad (8 \ em \ 6) \quad (9)$$

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

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

Prof. Mierzwa

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS COM DESVIO



$$Q_p + Q_b = Q_f$$

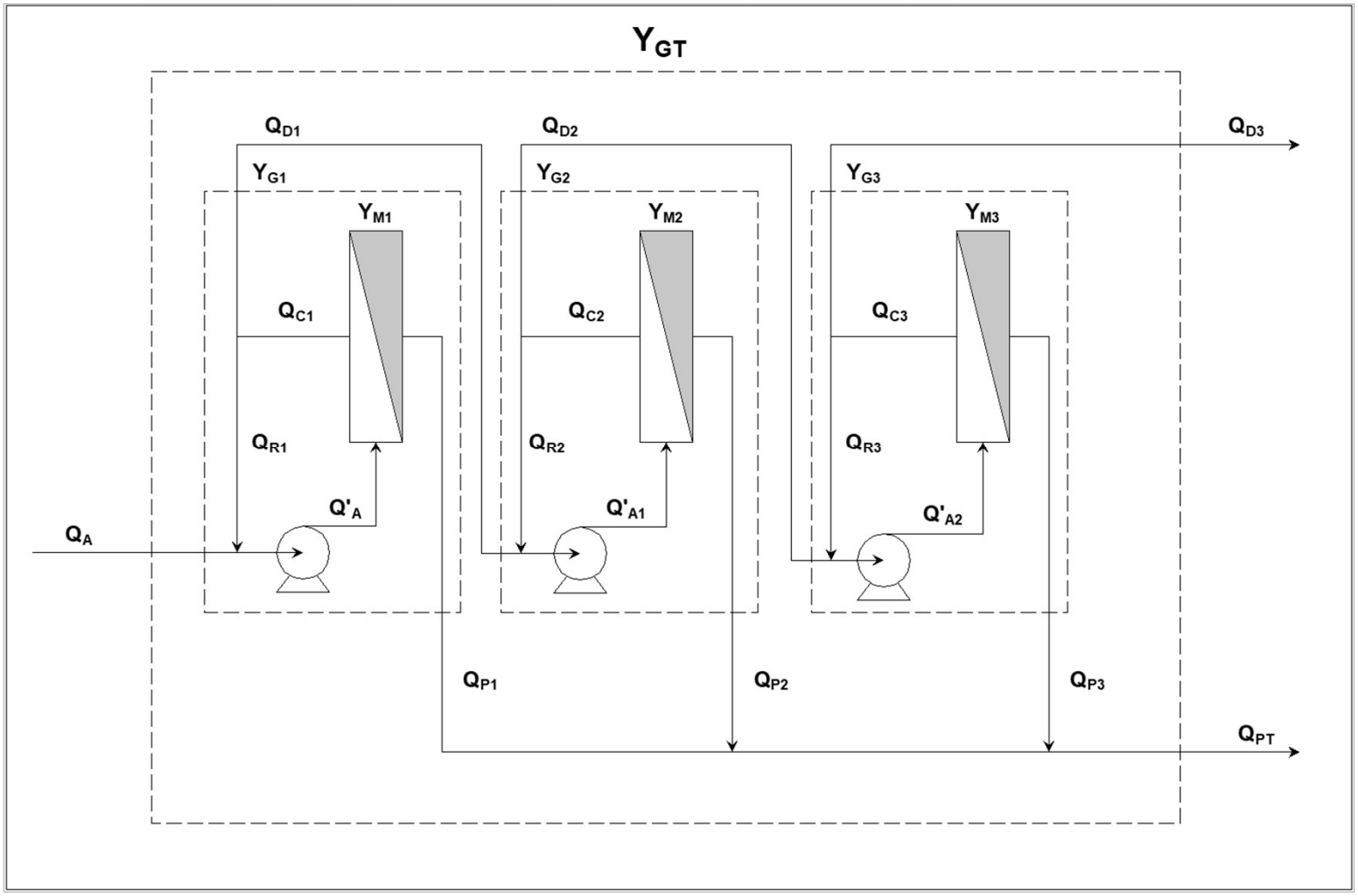
$$Q_b = Q_f - Q_p$$

$$Q_p.C_p + Q_b.C_a = Q_f.C_f$$

$$\frac{C_p}{C_a} = 1 - \frac{\%\,\mathrm{Re}\,jeição}{100}$$

$$Q_p = \frac{Q_f.\left(C_a - C_f\right)}{C_a.\%\,\mathrm{Re}\,jeição}.100$$

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS



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

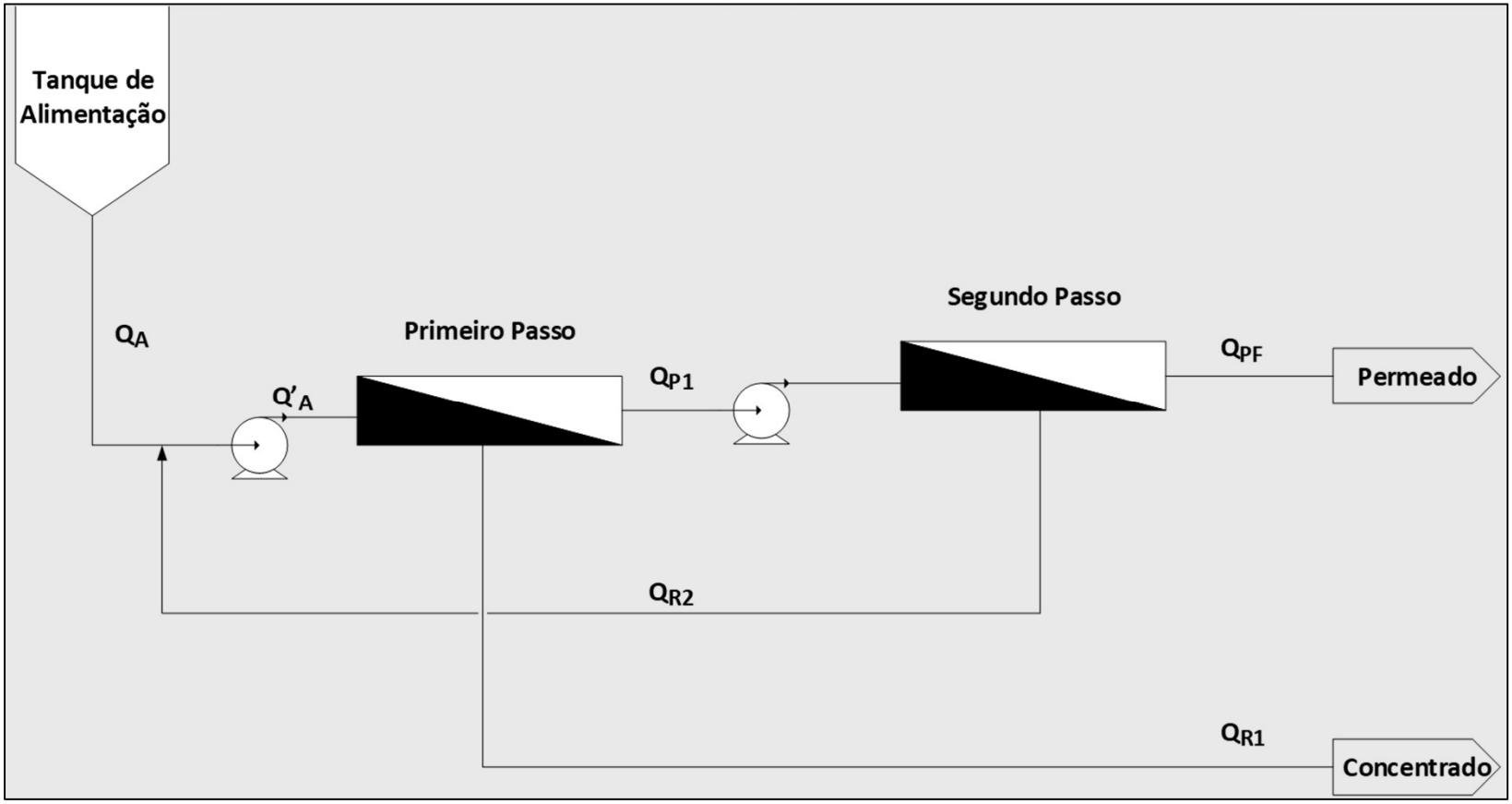
$$Q_{PT} = Q_A . Y_{GT}$$

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

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

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

BALANÇO DE MASSA PARA SISTEMAS DE DUPLO PASSO



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

$$Q_{PF} = Q_A . Y_G$$

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

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

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.)

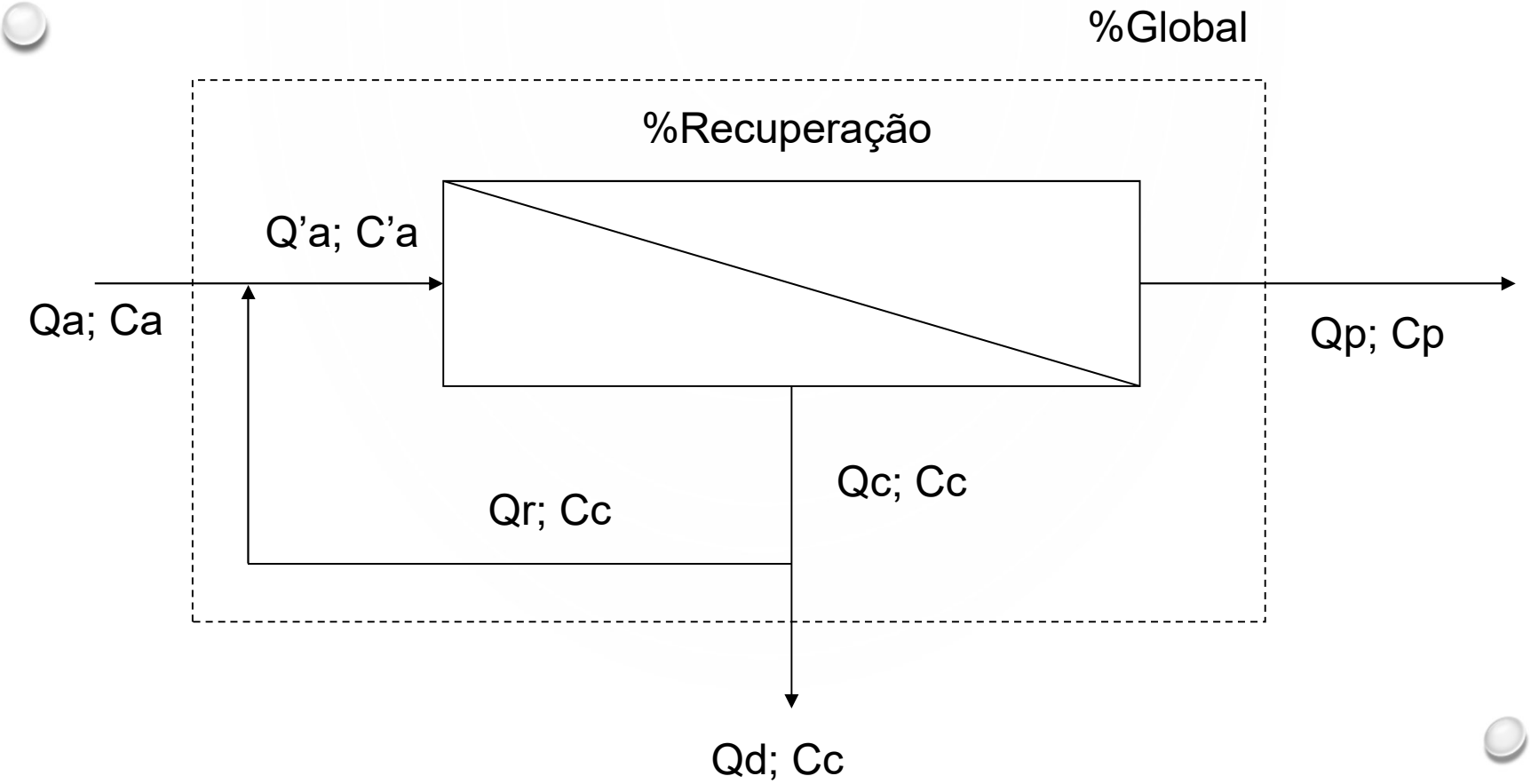
- CARACTERÍSTICAS DA MEMBRANA:
  - TIPO;
  - TAXA DE PRODUÇÃO;
  - LIMITES OPERACIONAIS;
- ÁREA TOTAL DE MEMBRANA;
- CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA:
  - PASSAGEM ÚNICA;
  - RECIRCULAÇÃO DE CONCENTRADO;
  - DUPLO PASSO;
  - SISTEMA COM DESVIO;
  - MÚLTIPLOS ESTÁGIOS.

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 M^3/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 30 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.


%Global
%Recuperação
Q'a; C'a
Qa; Ca
Qp; Cp
Qc; Cc
Qr; Cc
Qd; Cc

RESOLUÇÃO:

- VAZÃO AFLUENTE (Q_A) = 100 M^3/H;
- $Q_D = Q_A / 10 = 10\ M^3/H$
- $Q_A = Q_P + Q_D$
- $Q_P = 100 - 10 = 90\ M^3/H$
- $Y_G = Q_P / Q_A = 90 / 100 = 0{,}9\ (90\%)$
- $Y_M = 1 - (1 - Y_{MEMBRANA})^N = 0{,}344$

RESOLUÇÃO:

- VAZÃO DE ALIMENTAÇÃO DAS MEMBRANAS (Q'_A):
  - $Q'_A = Y_G.Q_A / Y_M = 100.0,9 / 0,344$
  - $Q'_A = 261,63\ M_3/H$
- VAZÃO DE RECIRCULAÇÃO (Q_R)
  - $Q_R = Q'_A - Q_A = 261,63 - 100$
  - $Q_R = 161,63\ M^3/H$

RESOLUÇÃO:

- ÁREA DE MEMBRANA:
  - $A_M = Q_P / Q_M$
  - $A_M = 90.000 / 30 = 3.000\ M^2$
- NÚMERO DE MEMBRANAS:
  - $N_M = A_M / A$
  - $N_M = 3.000 / 32 = 93,75$ ➔ 94 MEMBRANAS
- NÚMERO DE VASOS DE PRESSÃO:
  - $N_V = N_M / N = 94 / 4 = 23,5$ ➔ 24 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;
  - VAZÃO DE PERMEADO = 100 L/H;
  - RECUPERAÇÃO DE ÁGUA EM CADA PASSO:
    - PRIMEIRO = 70%;
    - SEGUNDO = 50%.
  - TODO O CONCENTRADO DO SEGUNDO PASSO É RECIRCULADO PARA O PRIMEIRO PASSO;