

**USP**

**Universidade de São Paulo**  
B R A S I L

**AdOx**

**Pesquisa em Processos Oxidativos Avançados**  
**Research in Advanced Oxidation Processes**

**PQI 3103**

**Conservação de Massa e Energia**

**Balances Materiais. Graus de Liberdade  
em Processos. Processos com Múltiplas  
Unidades**

**Prof. Dr. Antonio Carlos S. C. Teixeira (acscteix@usp.br)**

**Centro de Engenharia de Sistemas Químicos – Grupo de Pesquisa em  
Processos Oxidativos Avançados (AdOx)**

**Departamento de Engenharia Química – Escola Politécnica da USP**

**Edifício Semi-Industrial, bloco A, 3º andar**

**<http://sites.usp.br/adox>**

# sistema homogêneo

(para correntes de entrada e de saída,  $i = 1, \dots, n = J+K$ )

$$w_{1,1}\dot{m}_1 + w_{1,2}\dot{m}_2 + \dots + w_{1,n}\dot{m}_n = 0$$

$$w_{2,1}\dot{m}_1 + w_{2,2}\dot{m}_2 + \dots + w_{2,n}\dot{m}_n = 0$$

.

.

.

$$w_{s,1}\dot{m}_1 + w_{s,2}\dot{m}_2 + \dots + w_{s,n}\dot{m}_n = 0$$

$$w.\dot{m} = 0$$

$$(S \times n) \quad (n \times 1) \quad (S \times 1)$$

para uma corrente  $i$  ( $i = 1, \dots, n=J+K$ )

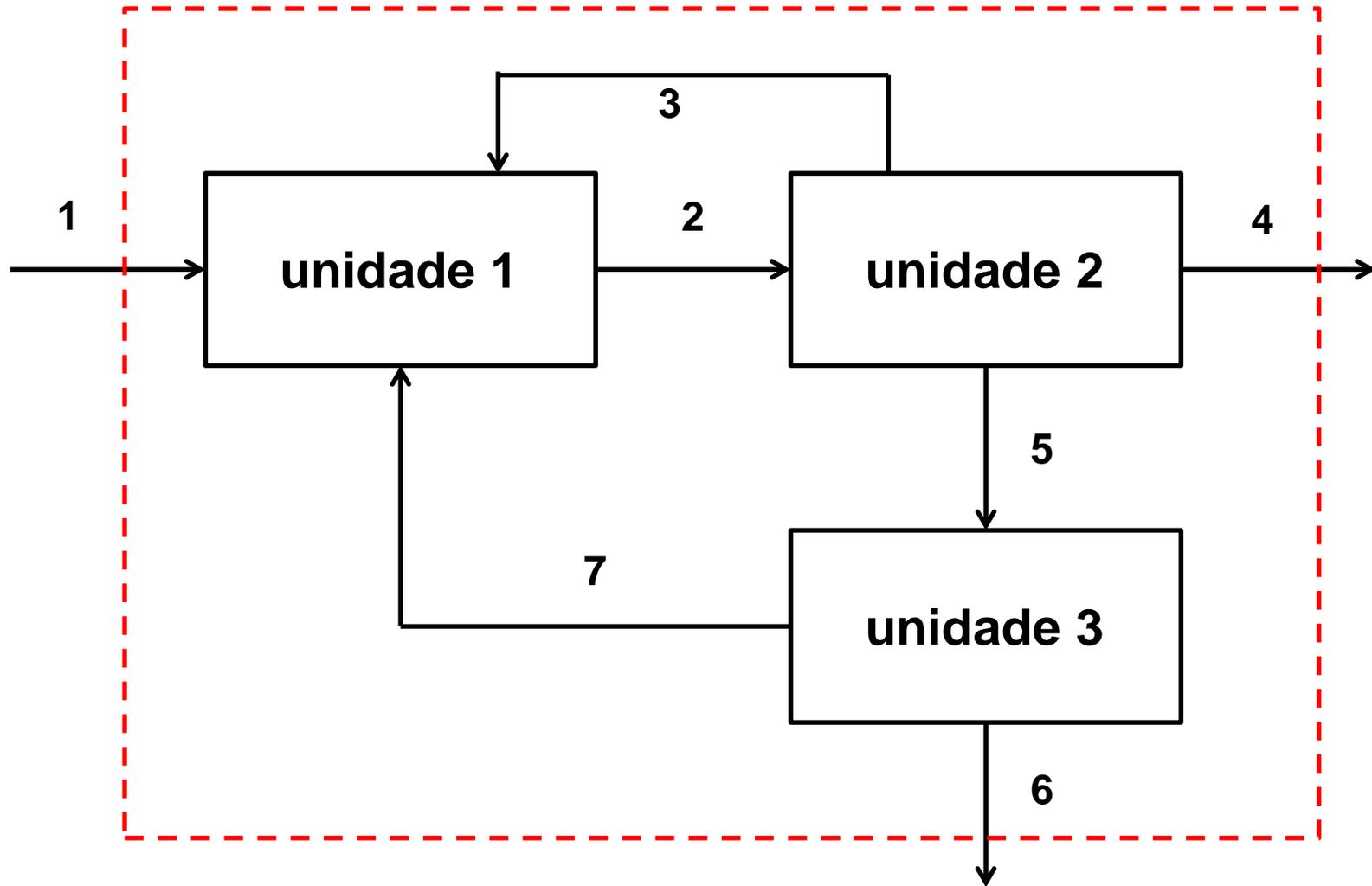
$$\sum_{i=1}^n w_{s,i} \dot{m}_i = 0 \quad s = 1, \dots, S \quad \text{espécies químicas}$$

se  $\dot{m}_i$  é uma solução do sistema, então  $\alpha \dot{m}_i$  também é solução, pois satisfaz a condição:

$$\sum_{i=1}^n w_{s,i} \alpha \dot{m}_i = \alpha \sum_{i=1}^n w_{s,i} \dot{m}_i = 0$$

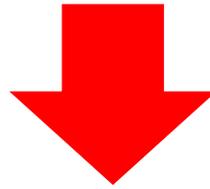
- ✓ na solução de balanços materiais, esta propriedade resulta no conceito de *base de cálculo* (BC);
- ✓ se nenhuma das vazões  $\dot{m}_i$  for especificada, pode-se adotar um valor de referência (BC) e depois *escalonar* a solução, se necessário;
- ✓ também se pode *realocar a BC* e, ao final, escalonar a solução para a base original.

# processos com múltiplas unidades de processamento



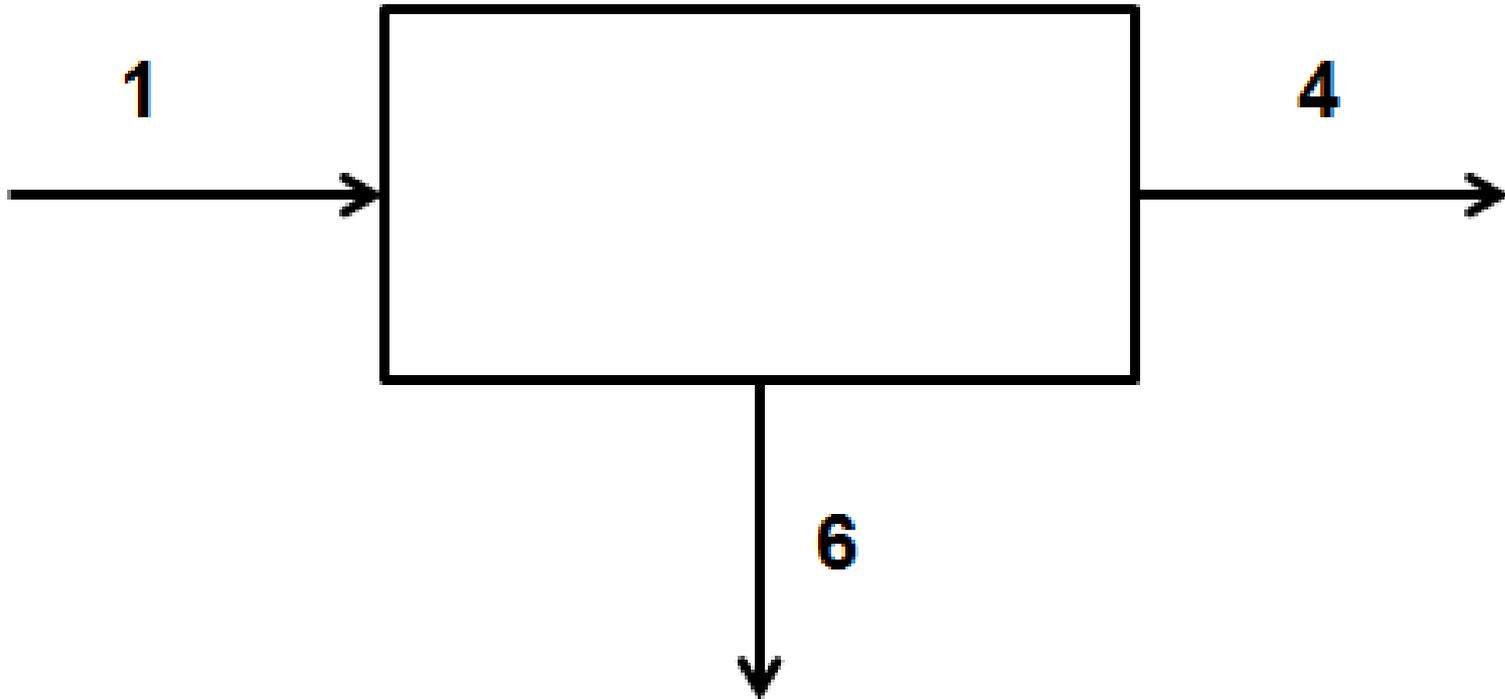


sempre é possível representar o processo com múltiplas unidades como uma única unidade



balanço material global

# processos com múltiplas unidades de processamento



supondo que existam  $NU$  unidades de processamento no processo, sendo  $u = 1, \dots, NU$

na unidade  $u$ , existem  $S_u$  espécies químicas e, logo,  $S_u$  equações de balanço material independentes. Assim:

Nº total de equações de balanço material independentes para o processo:

$$\sum_{u=1}^{NU} S_u$$

se um processo contém  $NU$  unidades, então somente  $NU$  conjuntos de balanços materiais são independentes, de um total de  $NU+1$  conjuntos

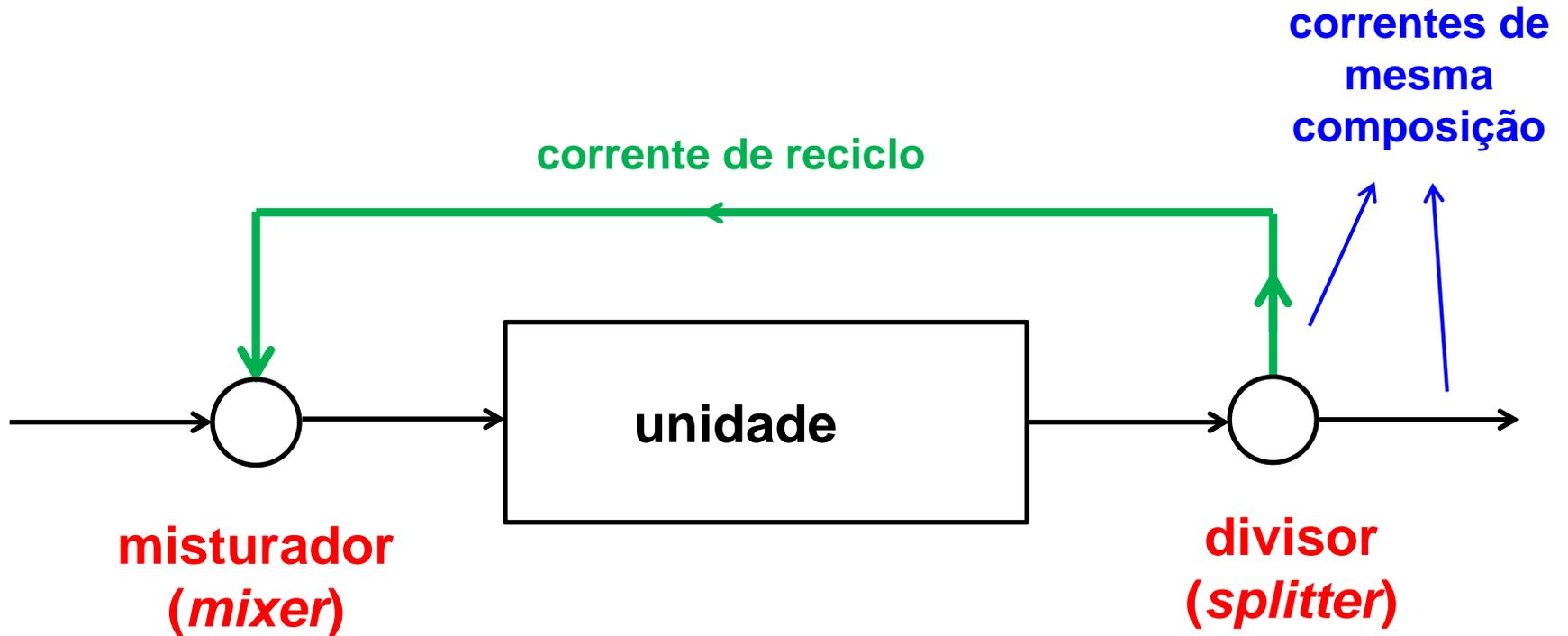


**correntes particulares em  
processos químicos com  
reciclo**

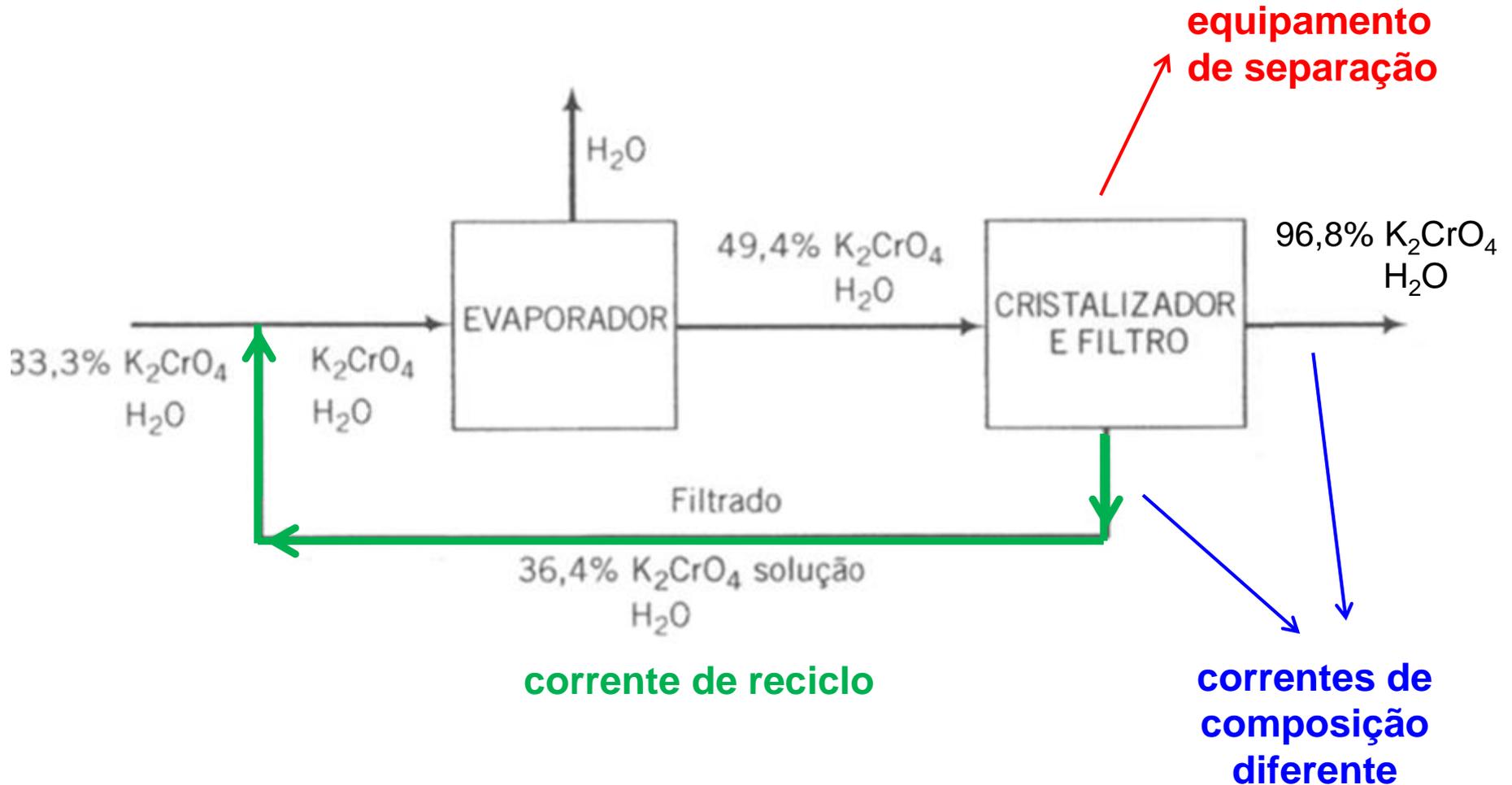
## corrente de reciclo

✓ comum em unidades de processamento, para aumentar tempo de contato/residência; reaproveitar substâncias (reagentes, solventes) não consumidas em etapa(s) precedente(s); diluição de correntes de alimentação; em ciclos de refrigeração; em circuitos de água de resfriamento etc.

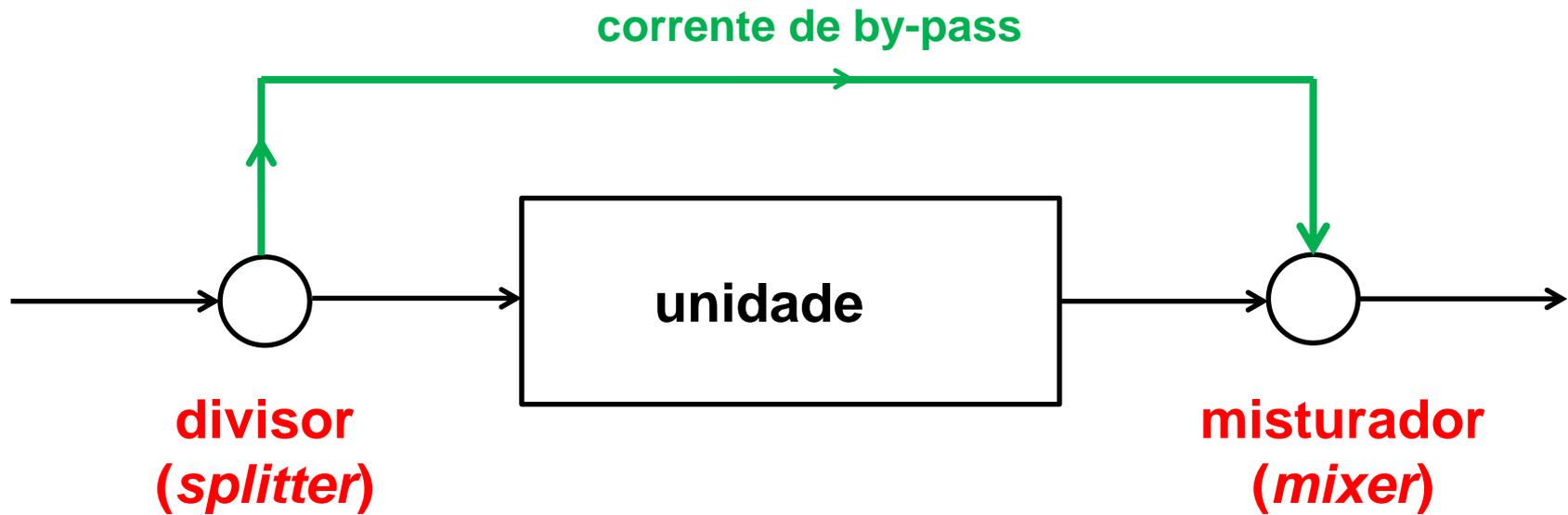
# corrente de reciclo



# corrente de reciclo

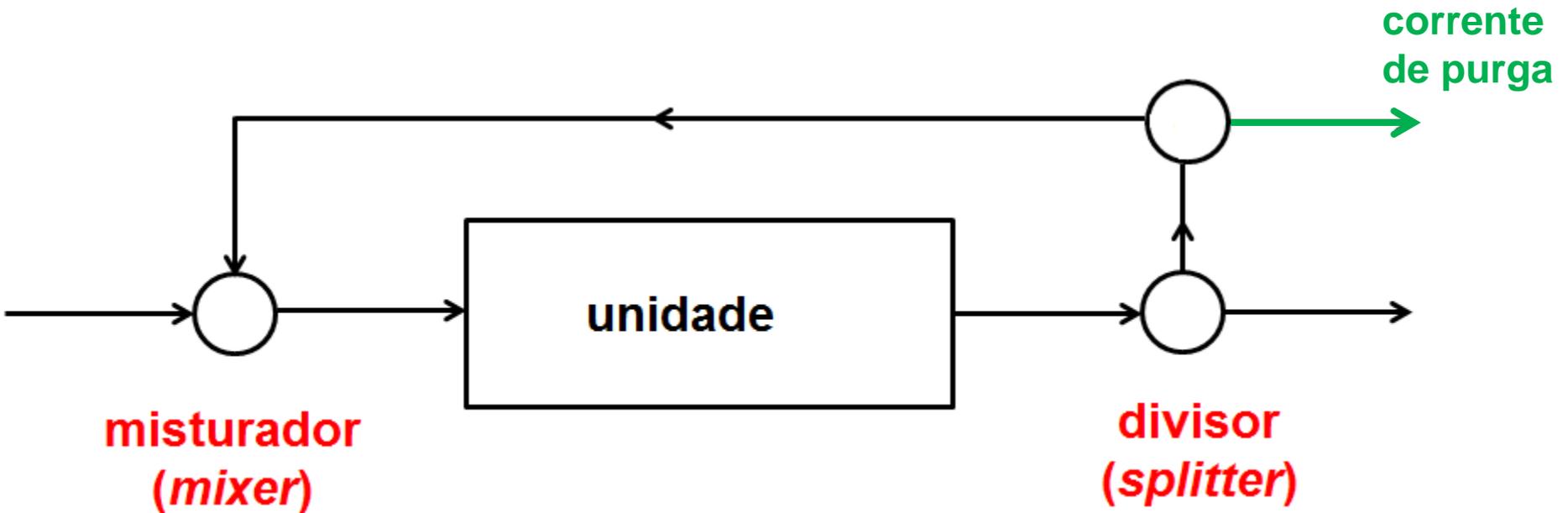


# corrente de *by-pass*



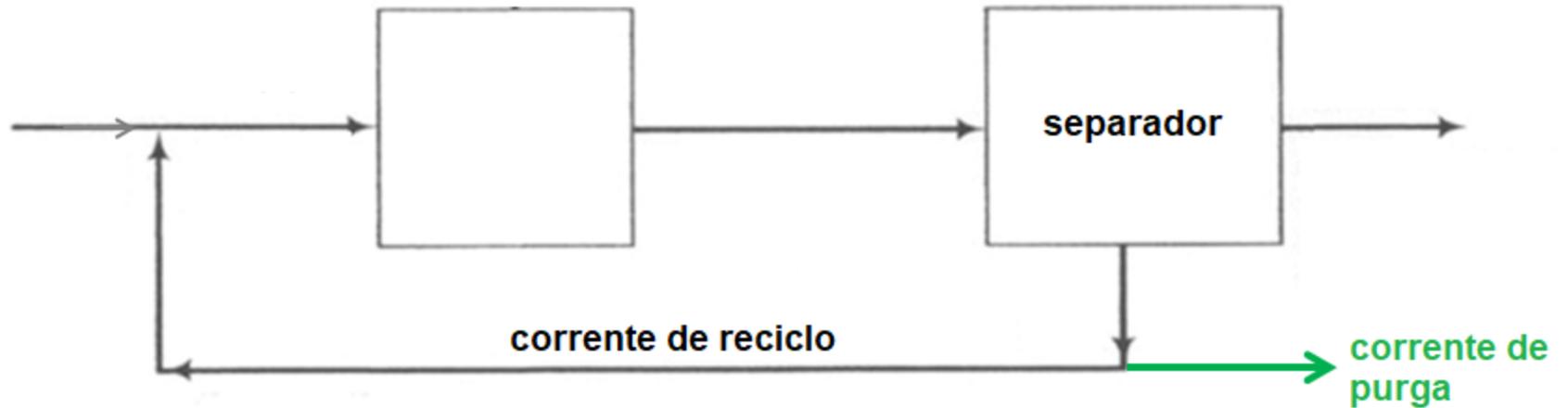
✓ desvio de uma fração de uma corrente. A corrente desviada não é processada na unidade.

## corrente de reciclo com purga

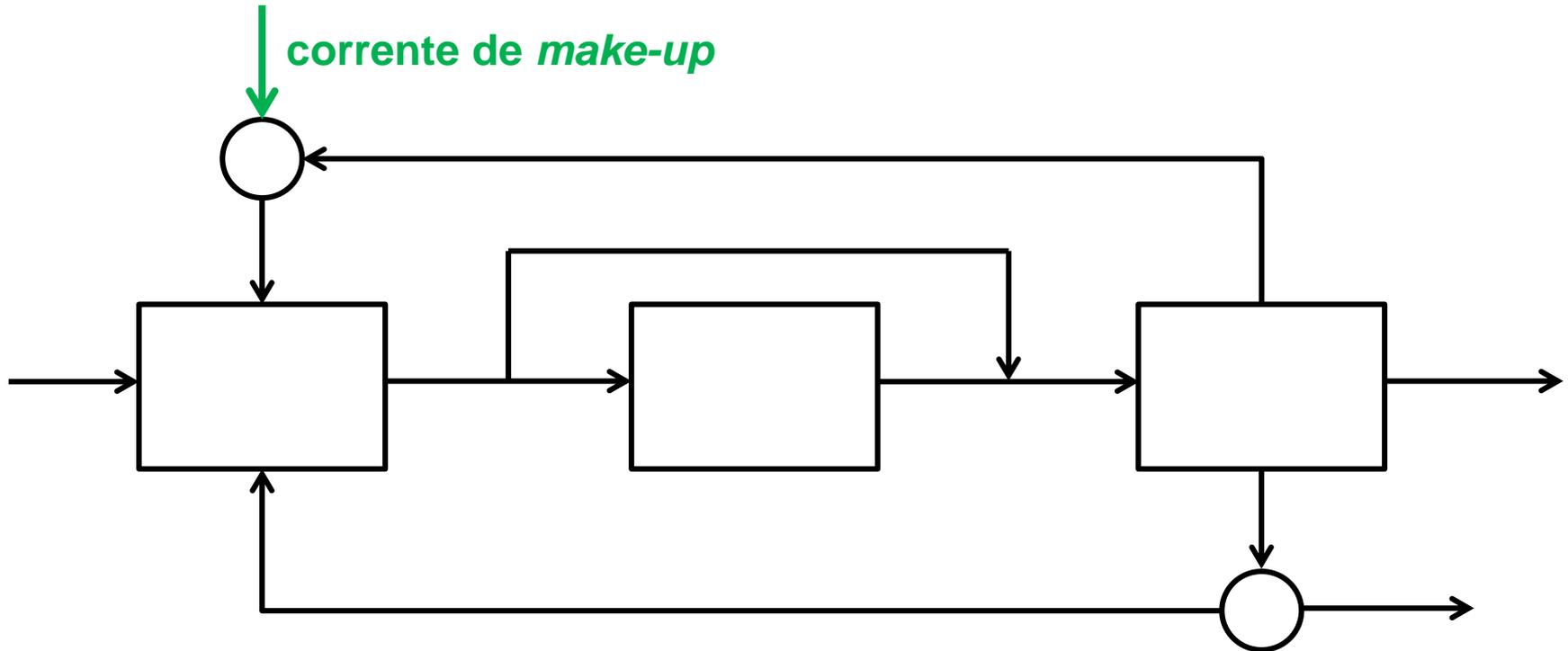


- ✓ a corrente de purga é separada de outra e descartada, evitando o acúmulo de inertes que acompanham a matéria-prima, em processos contendo reciclo(s).

# corrente de reciclo com purga



# corrente de reposição (*make-up*)



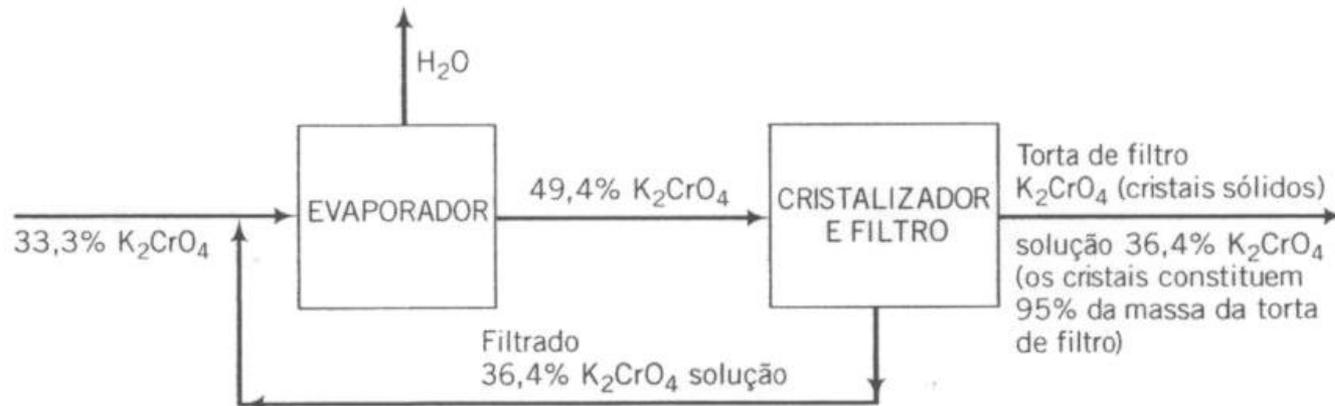
✓ a corrente de *make-up* permite repor perdas em circuito fechado. Essas perdas ocorrem, por exemplo, com a corrente de produto e/ou com a corrente de purga, por evaporação e eventuais vazamentos etc.

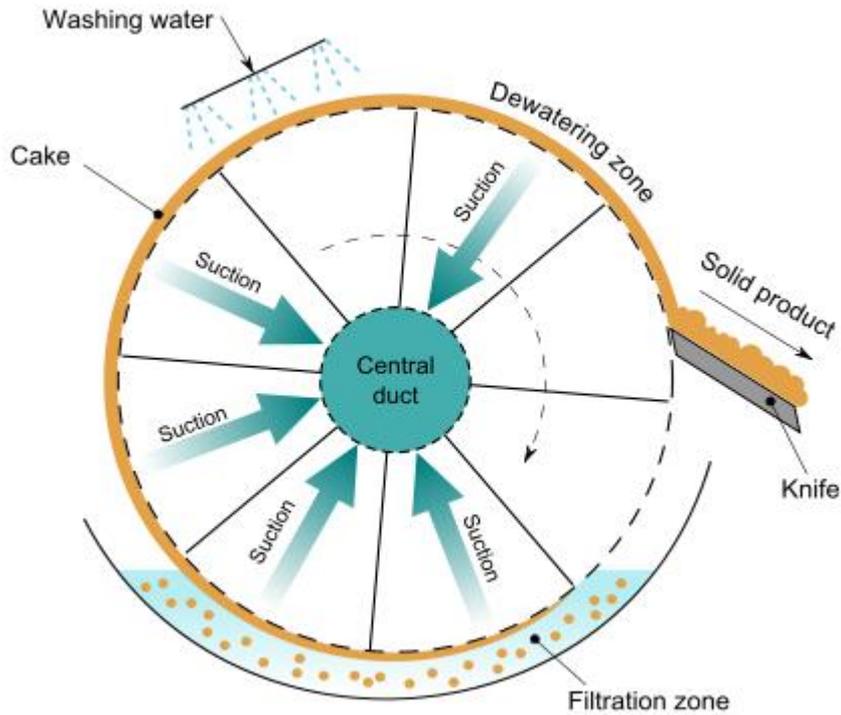
## exemplo 1 – planta de recuperação de cromato de potássio ( $K_2CrO_4$ )

A figura apresenta o fluxograma de um processo em estado estacionário para recuperar cromato de potássio cristalino ( $K_2CrO_4$ ) de uma solução aquosa deste sal.

Uma solução aquosa com 1/3 de  $K_2CrO_4$  em massa se junta com uma corrente de reciclo contendo 36,4% em massa de  $K_2CrO_4$  e a corrente combinada alimenta um evaporador. A corrente concentrada que deixa o evaporador contém 49,4% em massa de  $K_2CrO_4$ . Esta corrente alimenta um cristalizador, no qual é resfriada, causando a precipitação de cristais do sal, sendo em seguida, filtrada.

A torta de filtração é formada por cristais de  $K_2CrO_4$  embebidos por uma solução aquosa contendo 36,4% em massa de  $K_2CrO_4$ ; os cristais constituem 95% da massa total da torta. A solução aquosa que passa através do filtro, isenta de cristais e também contendo 36,4% em massa de  $K_2CrO_4$ , é a corrente de reciclo.

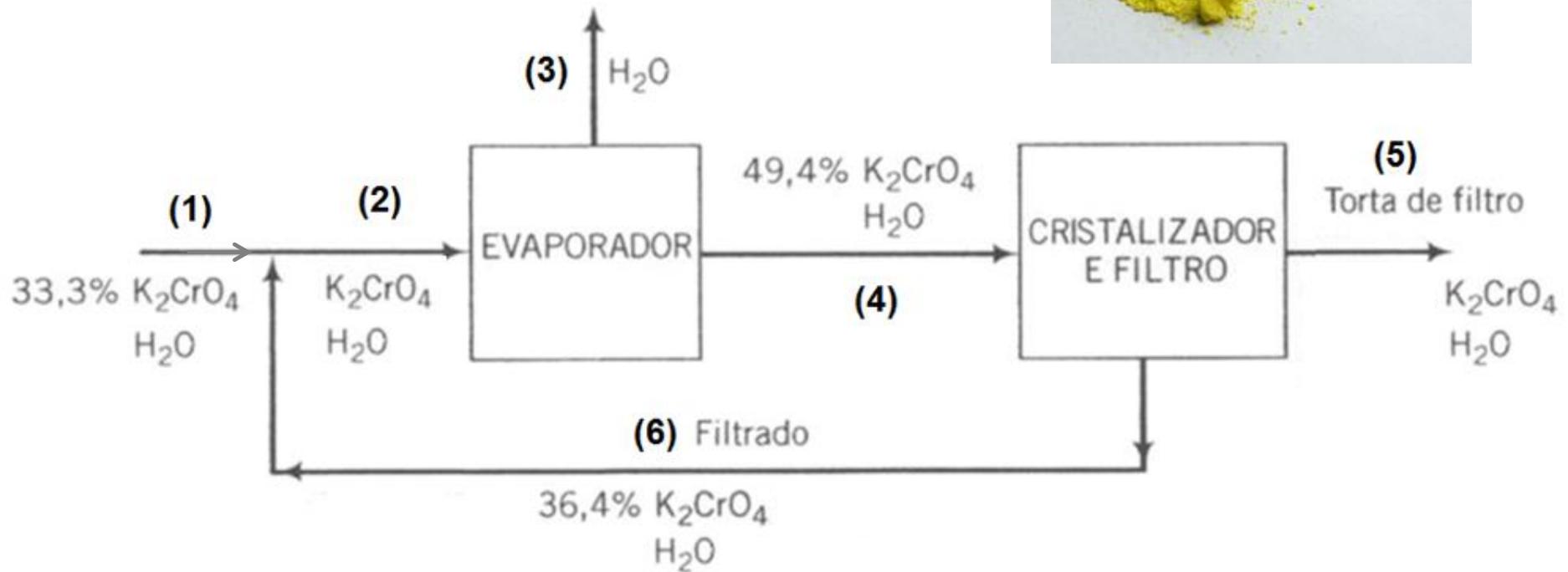




## filtro rotativo a vácuo



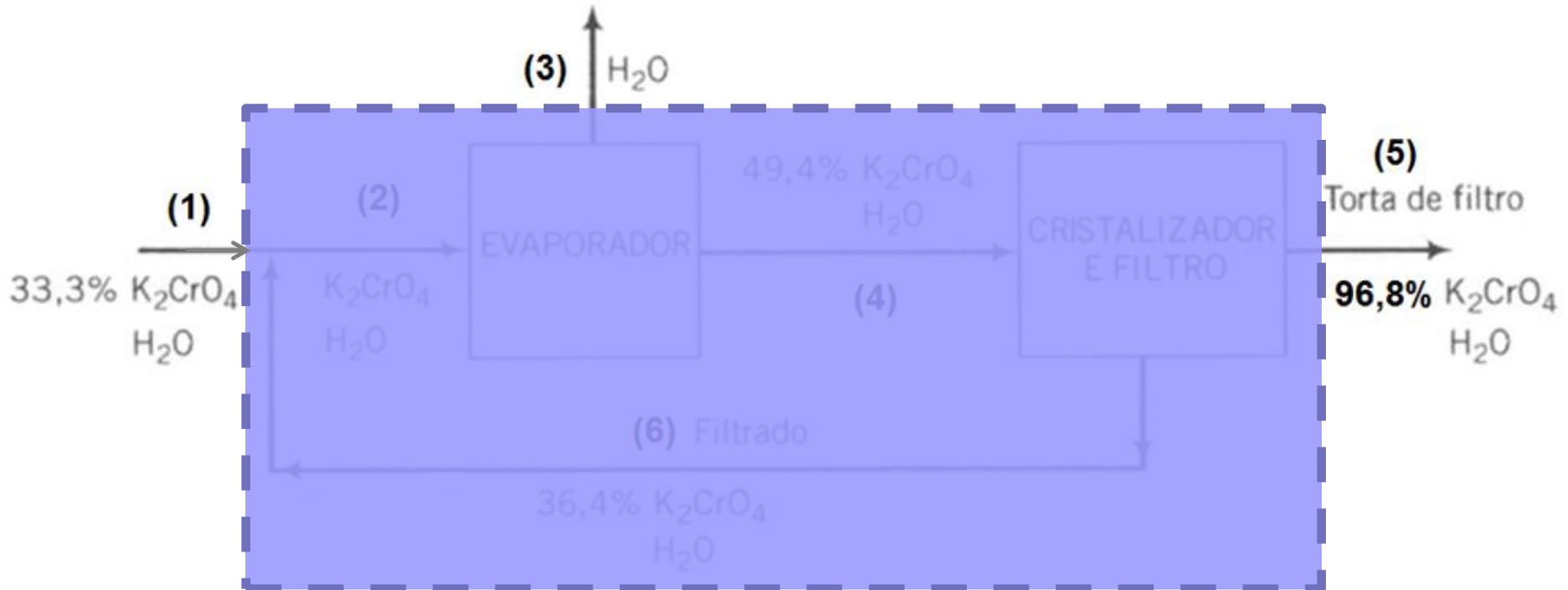
[youtube.com/watch?v=x74pP2I-EDs](https://www.youtube.com/watch?v=x74pP2I-EDs)



**% massa**

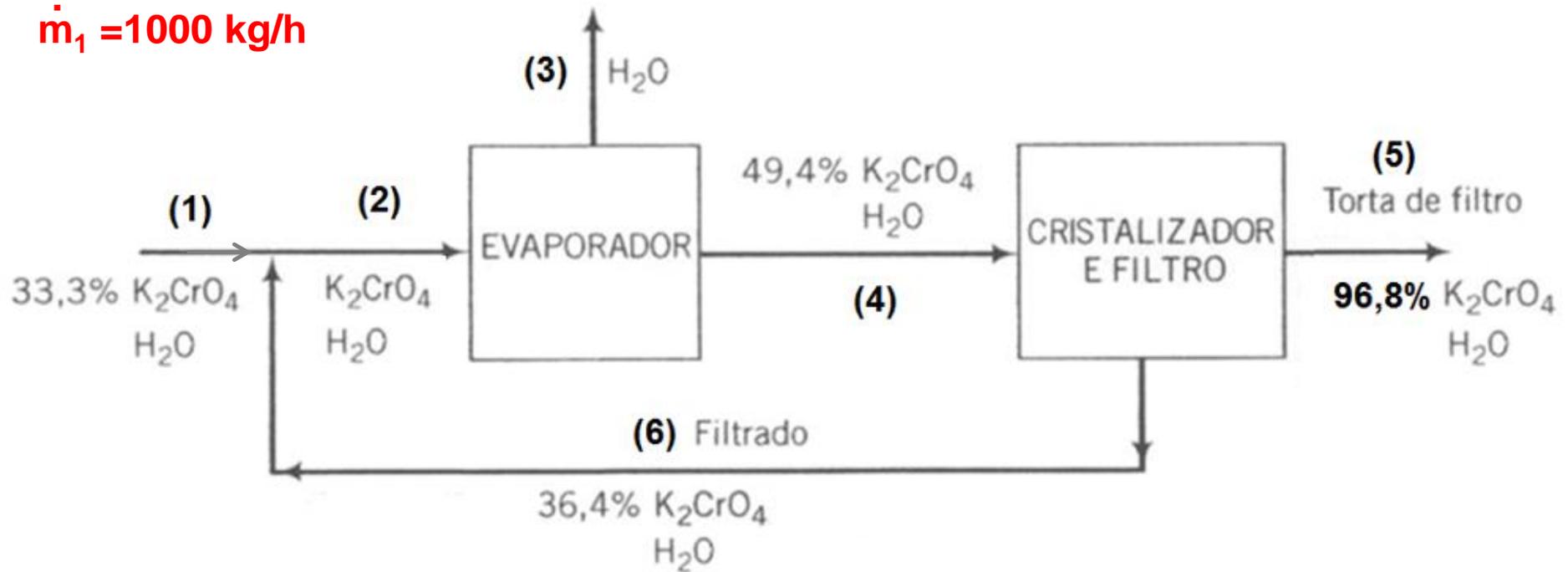
- 
- a) Calcular a fração mássica de  $K_2CrO_4$  na torta (*Resposta: 96,8%*)
- b) Realizar a análise do número de graus de liberdade completa para o problema.
- c) Calcular a porcentagem mássica de  $K_2CrO_4$  na corrente que alimenta o evaporador. (*Resposta: 35%*).
- d) Calcular a razão de reciclo (= massa de reciclo/massa de alimentação virgem). (*Resposta: 1,26*)
- e) Calcular as taxas de evaporação e de produção de  $K_2CrO_4$  cristalino para vazão de alimentação da planta igual a 4500 kg/h. (*Respostas: 2952,3 kg/h e 1470,3 kg/h, respectivamente*)
- f) Suponha que o filtrado seja descartado em vez de ser reciclado. Quais seriam as consequências? Avalie qualitativamente os benefícios e os custos da reciclagem.

misturador	evaporador	cristalizador+filtro	global	processo
NVCI=6	NVCI=5	NVCI=6	NVCI=5	NVCI=11
NVEI=2	NVEI=1	NVEI=3	NVEI=2	NVEI=4
<b>NBMI=2</b>	<b>NBMI=2</b>	<b>NBMI=2</b>	NBMI=2	<b>NBMI=6</b>
<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>
NGL=2	NGL=2	NGL=1	NGL=1	NGL=1

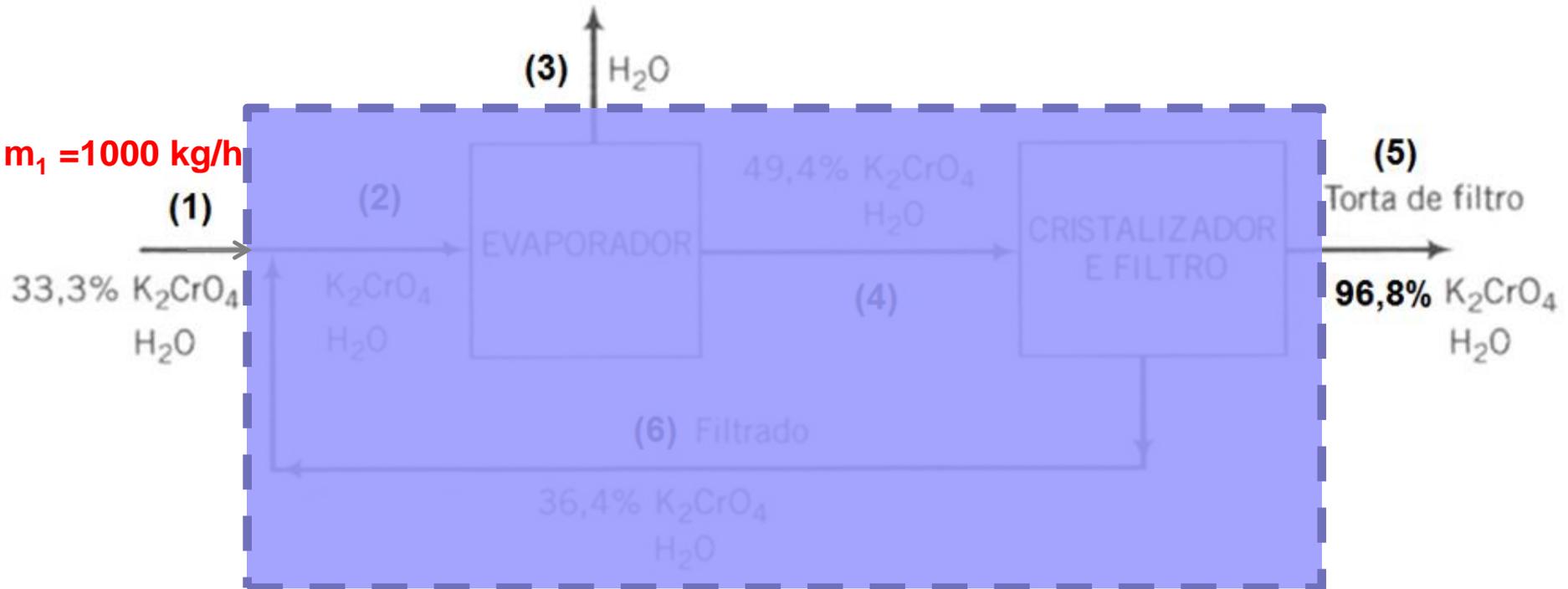


base de cálculo adotada

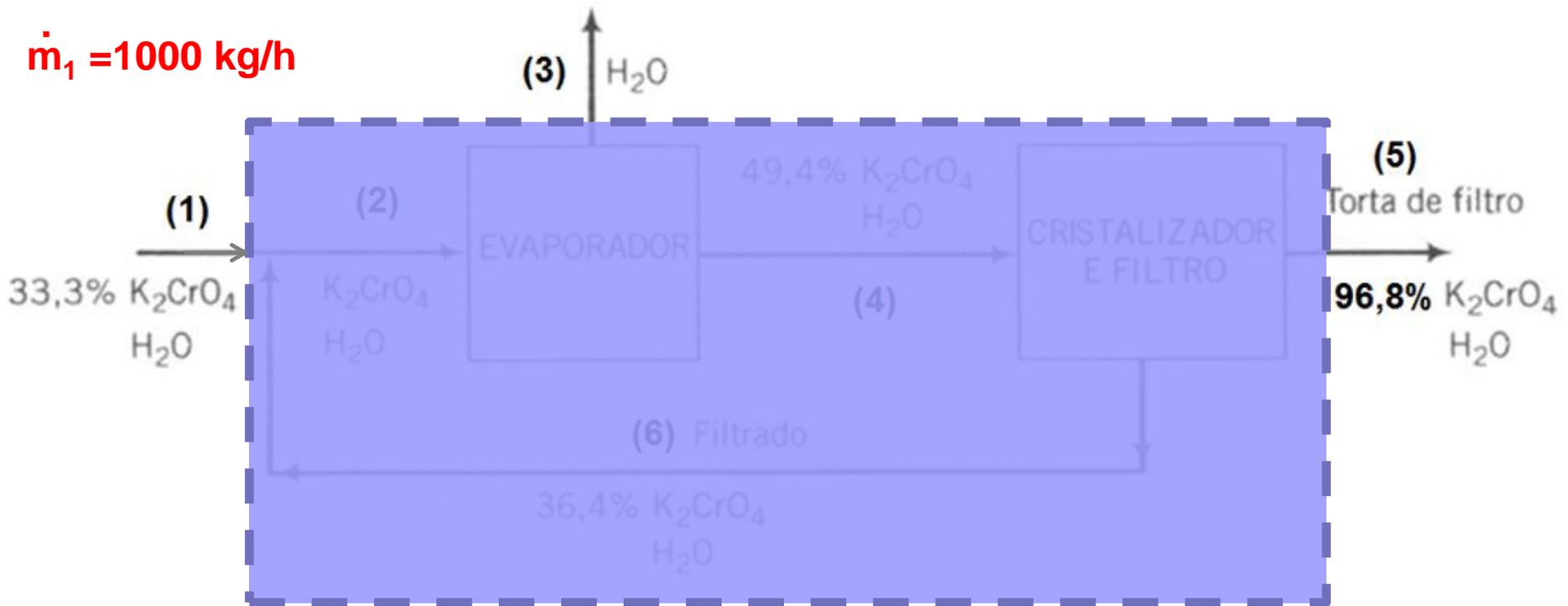
$\dot{m}_1 = 1000 \text{ kg/h}$



misturador	evaporador	cristalizador+filtro	global	processo
NVCI=6	NVCI=5	NVCI=6	NVCI=5	NVCI=11
NVEI=3	NVEI=1	NVEI=3	NVEI=3	NVEI=5
NBMI=2	NBMI=2	NBMI=2	NBMI=2	NBMI=6
<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>	<u>NRI=0</u>
NGL=1	NGL=2	NGL=1	NGL=0	NGL=0

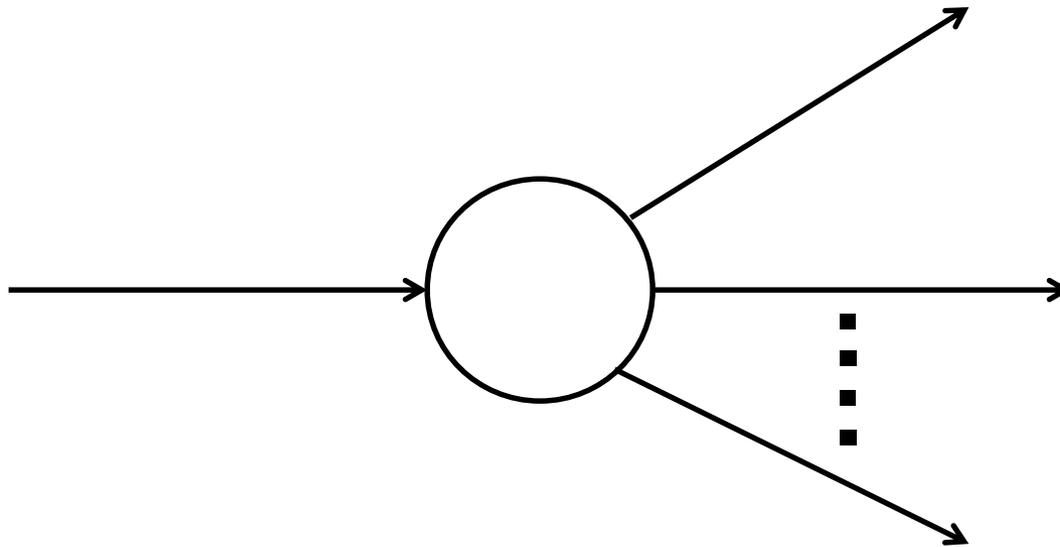


$\dot{m}_1 = 1000 \text{ kg/h}$



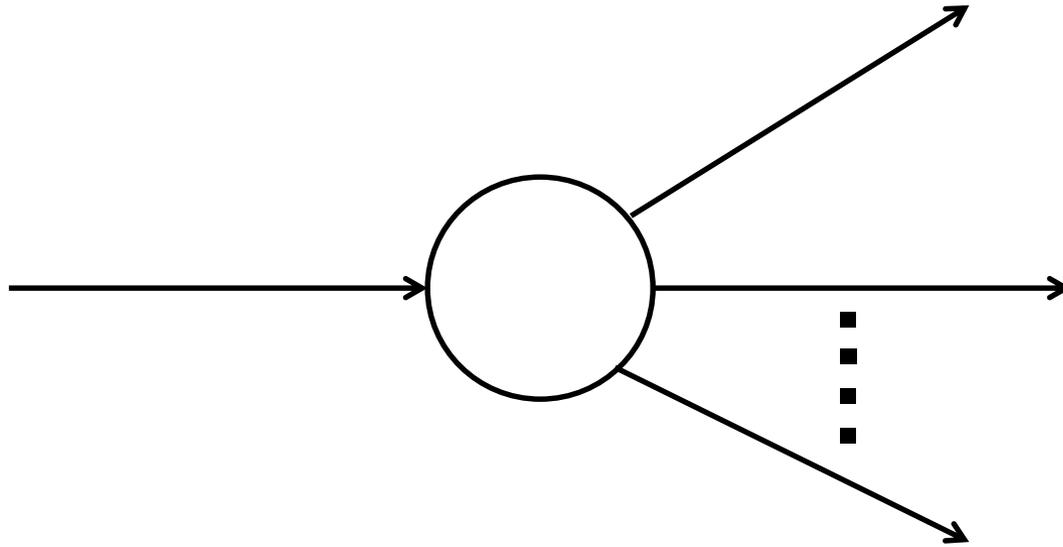
**% massa**

## divisor de correntes (*splitter*)



✓ o **divisor de correntes** (*splitter*) é uma unidade que requer atenção especial: a corrente a ele alimentada é dividida em duas ou mais correntes, todas com mesma composição. As correntes de saída podem, porém, ter vazões diferentes.

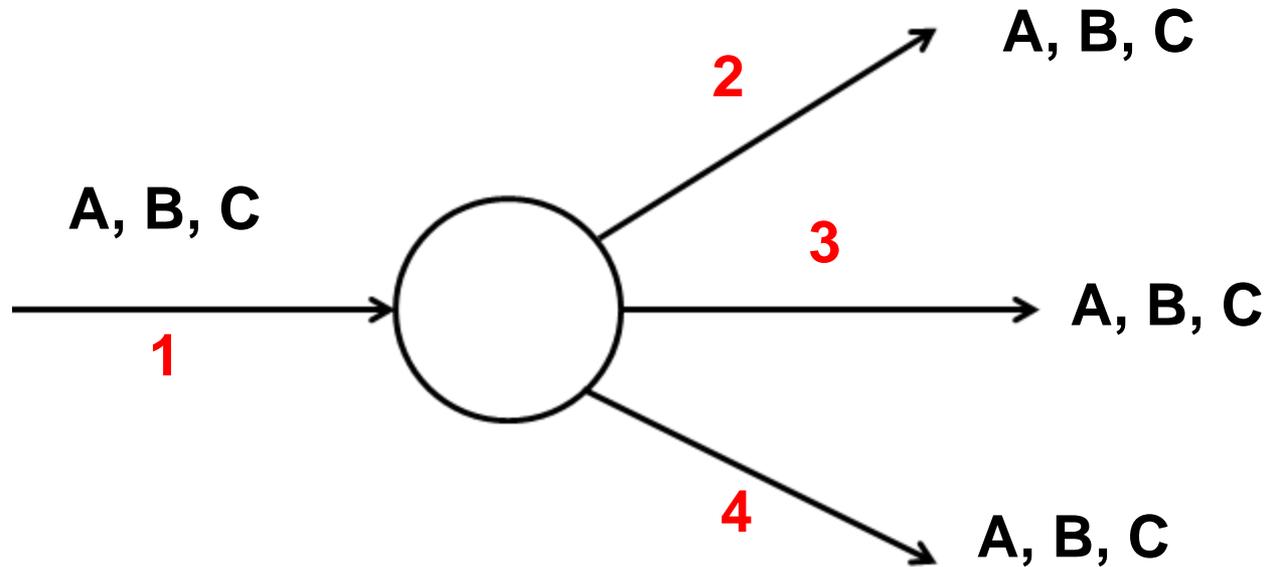
## divisor de correntes (*splitter*)



se uma corrente contendo  $S$  espécies químicas é separada em  $K$  correntes, então são criadas  $(K-1) \times (S-1)$  relações de composição independentes impostas às  $K$  correntes geradas

***nº restrições independentes do splitter =  $(K-1) \times (S-1)$***

## exemplo – divisor de correntes (*splitter*)



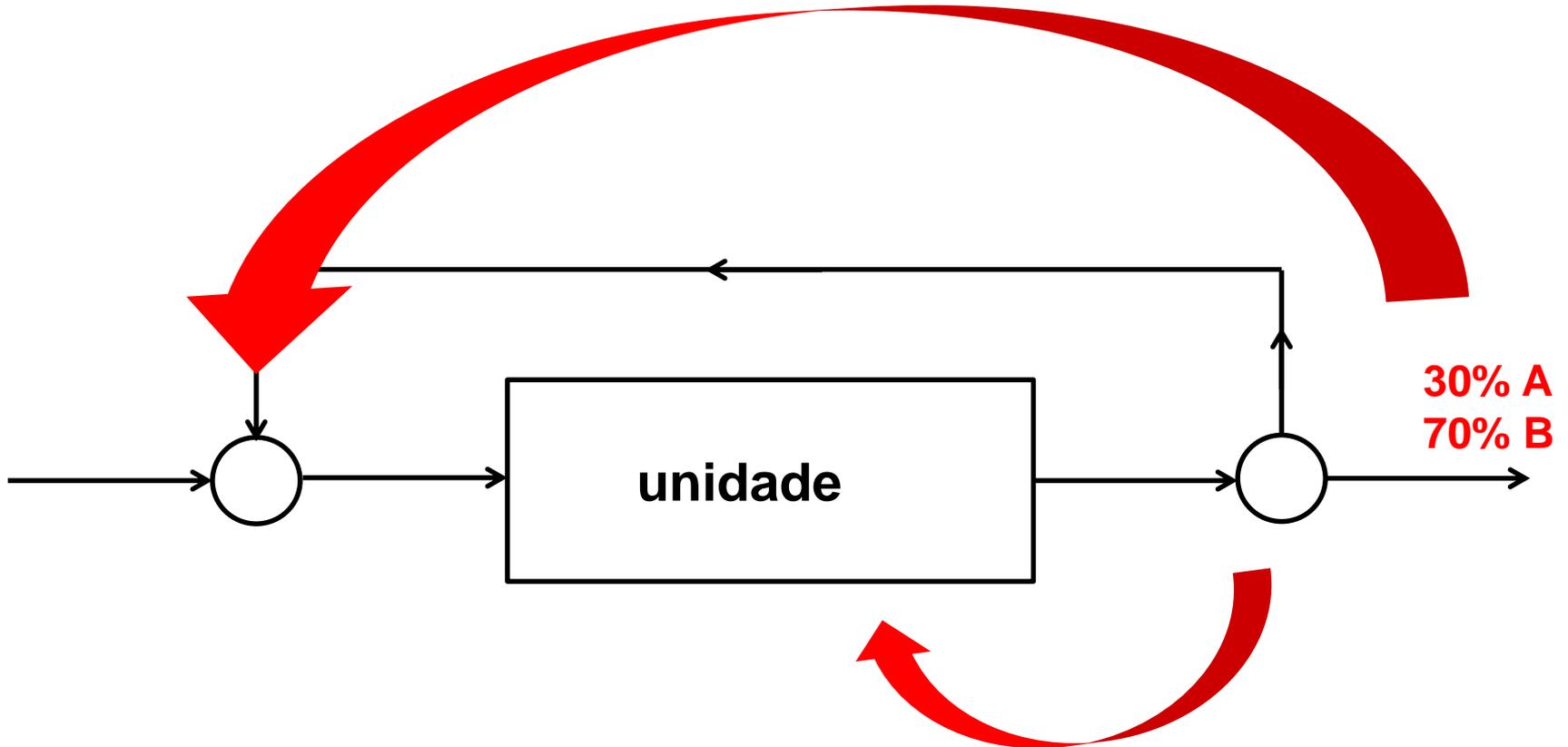
$$W_{A,2} = W_{A,3} = W_{A,4}$$

$$W_{B,2} = W_{B,3} = W_{B,4}$$

$$W_{C,2} = W_{C,3} = W_{C,4}$$

total de 9 relações de igualdade entre as composições das correntes de saída, das quais  $(3-1) \times (3-1) = 4$  são independentes

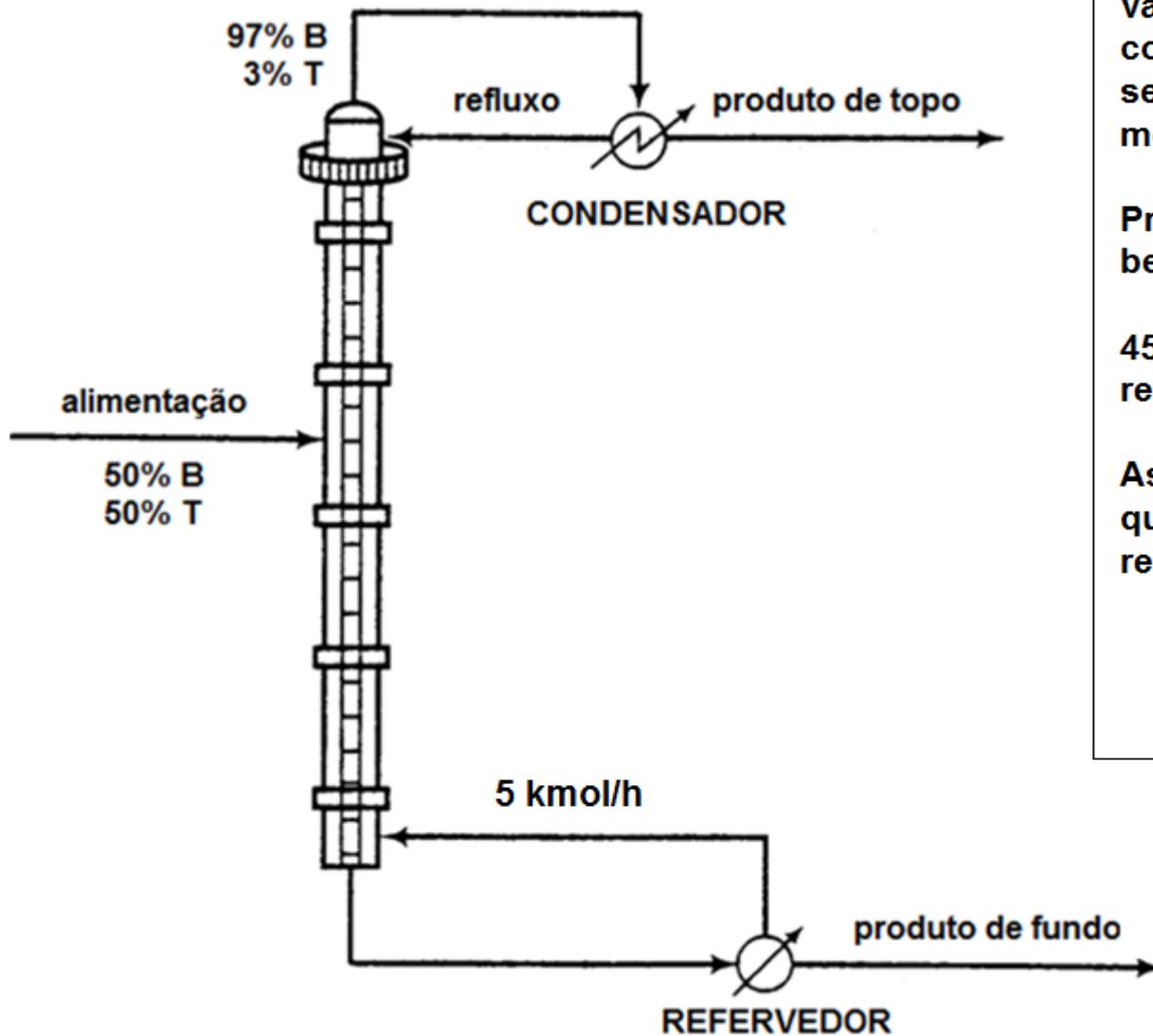
uma especificação do divisor de correntes (*splitter*) pode ser aproveitada nas unidades a ele conectadas



## exemplo 2 – coluna de destilação

Uma mistura líquida equimolar de benzeno e tolueno é separada em uma coluna de destilação, como ilustrado na figura a seguir. Dentro da coluna, uma corrente líquida desce enquanto uma corrente de vapor sobe. Em cada ponto da coluna, uma parte do líquido vaporiza e uma parte do vapor condensa. O vapor deixa o topo da coluna contendo 97% molar de benzeno e, neste exemplo, é completamente condensado e separado em duas correntes de mesma vazão: uma delas é retirada como produto de topo e a outra (o refluxo) é recirculada ao topo da coluna. O produto de topo contém 89,2% do benzeno que alimenta a coluna. O líquido que deixa o fundo da coluna alimenta um refeedor parcial, no qual 45% do líquido são vaporizados. O vapor gerado no refeedor retorna ao fundo da coluna, constituindo a corrente de vapor ascendente e o líquido residual é retirado como produto de fundo. *Neste exemplo*, as composições das correntes que saem do refeedor estão relacionadas pela equação:

$$\frac{y_B / (1 - y_B)}{x_B / (1 - x_B)} = 2,25$$



Vapor que sai do topo é completamente condensado e separado em duas correntes de mesma vazão

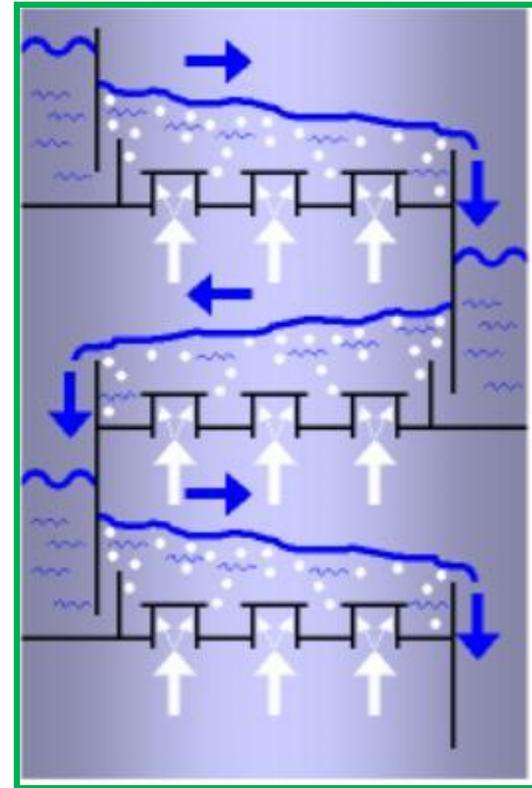
Produto de topo contém 89,2% do benzeno alimentado à coluna

45% do líquido à entrada do refervedor são vaporizados

As composições das correntes que saem do refervedor são relacionadas por:

$$\frac{y_B / (1 - y_B)}{x_B / (1 - x_B)} = 2,25$$

- 
- a) Rotule completamente o fluxograma de processo para a coluna de destilação, identificando os componentes presentes em cada corrente (B: benzeno; T: tolueno).
- b) Refervedor (*reboiler*) e condensador são trocadores de calor (operações unitárias) em que ocorrem mudanças de fase (vaporização de líquido e condensação de vapor, respectivamente). Neste exercício em particular, um desses equipamentos pode ser tratado simplificadaamente como um divisor de corrente (*splitter*) para efeito de contagem de número de graus de liberdade e realização de balanços materiais. Qual é esse equipamento? Justifique com base nas informações fornecidas no exercício.
- c) Faça a análise completa do número de graus de liberdade para o problema e interprete o resultado.
- d) Calcule a fração molar de benzeno na corrente de produto de fundo e a porcentagem de recuperação de tolueno no produto de fundo ( $100 \times \text{mols de tolueno no fundo} / \text{mols de tolueno na alimentação}$ ). (Respostas: 0,10; 97,2%)
- e) Quais são as vazões de alimentação da coluna e de produto de topo? (Respostas: 11,3 kmol/h; 5,2 kmol/h)



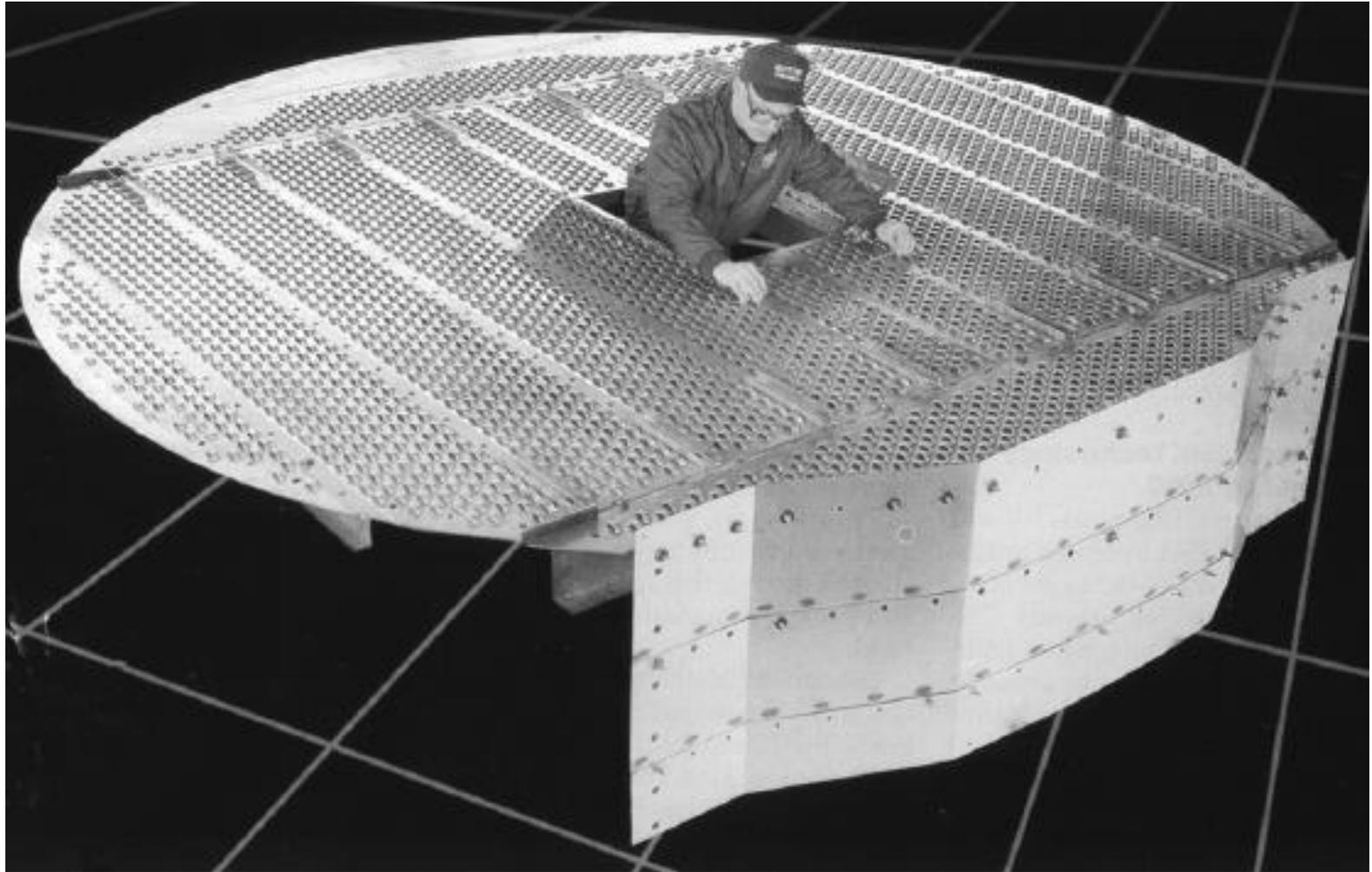
[youtube.com/watch?v=CclZN11bGml](https://www.youtube.com/watch?v=CclZN11bGml)

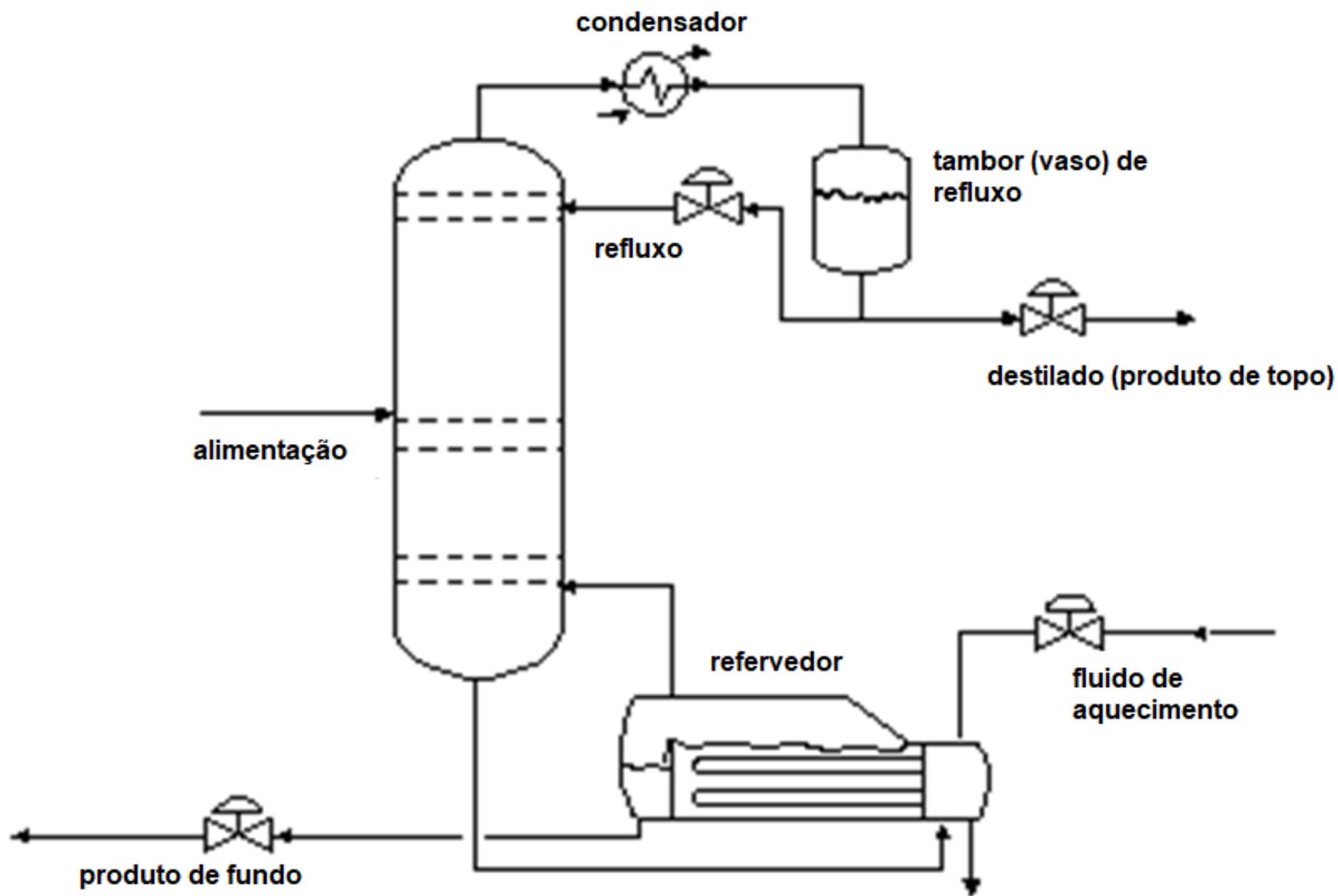
[youtube.com/watch?v=D0H9FWsk\\_Ck](https://www.youtube.com/watch?v=D0H9FWsk_Ck)

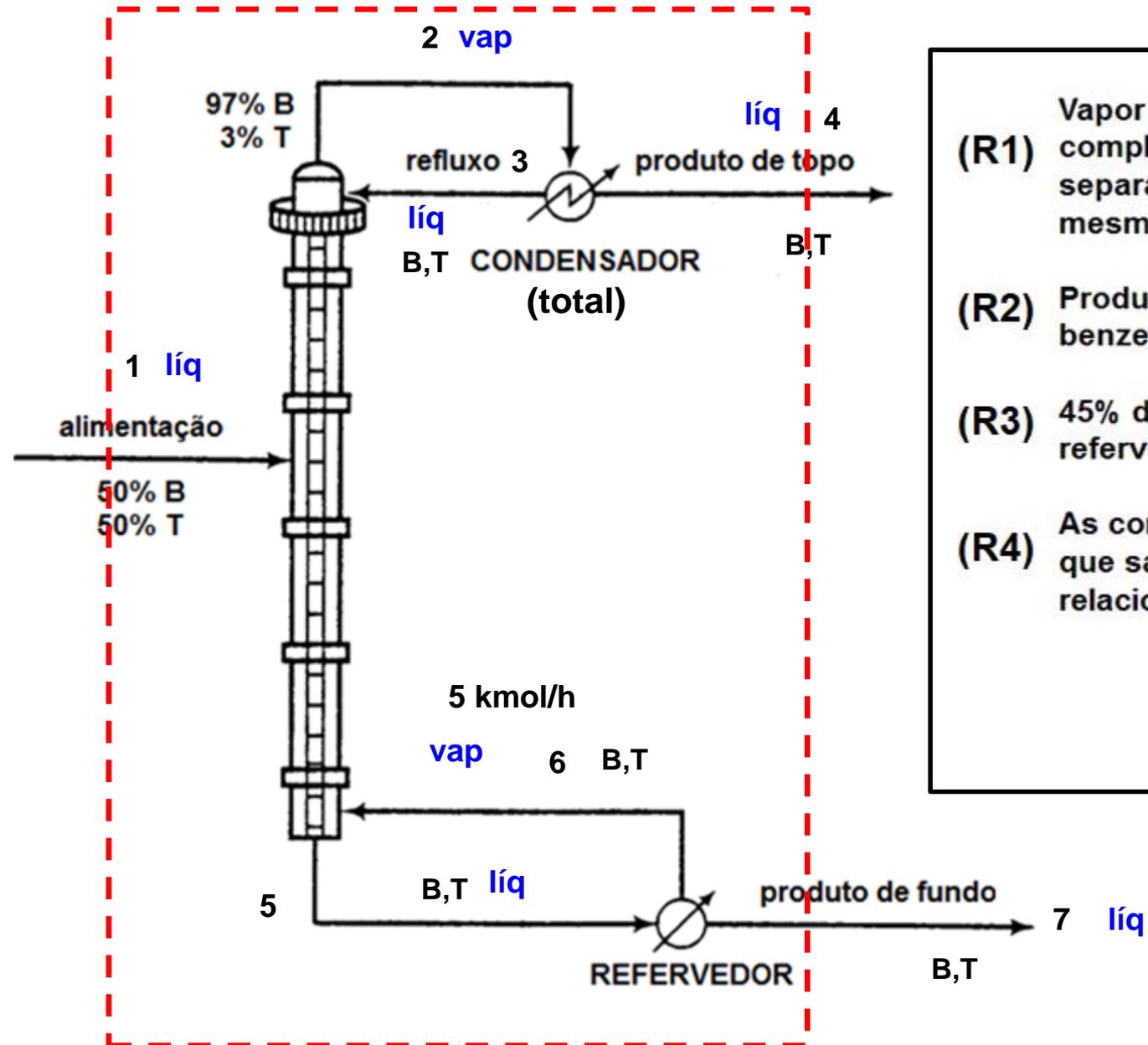
[youtube.com/watch?v=82KHGne2TOW](https://www.youtube.com/watch?v=82KHGne2TOW)

[youtube.com/watch?v=RQEJOmZg2aQ](https://www.youtube.com/watch?v=RQEJOmZg2aQ)

[youtube.com/watch?v=gYnGgre83CI](https://www.youtube.com/watch?v=gYnGgre83CI)

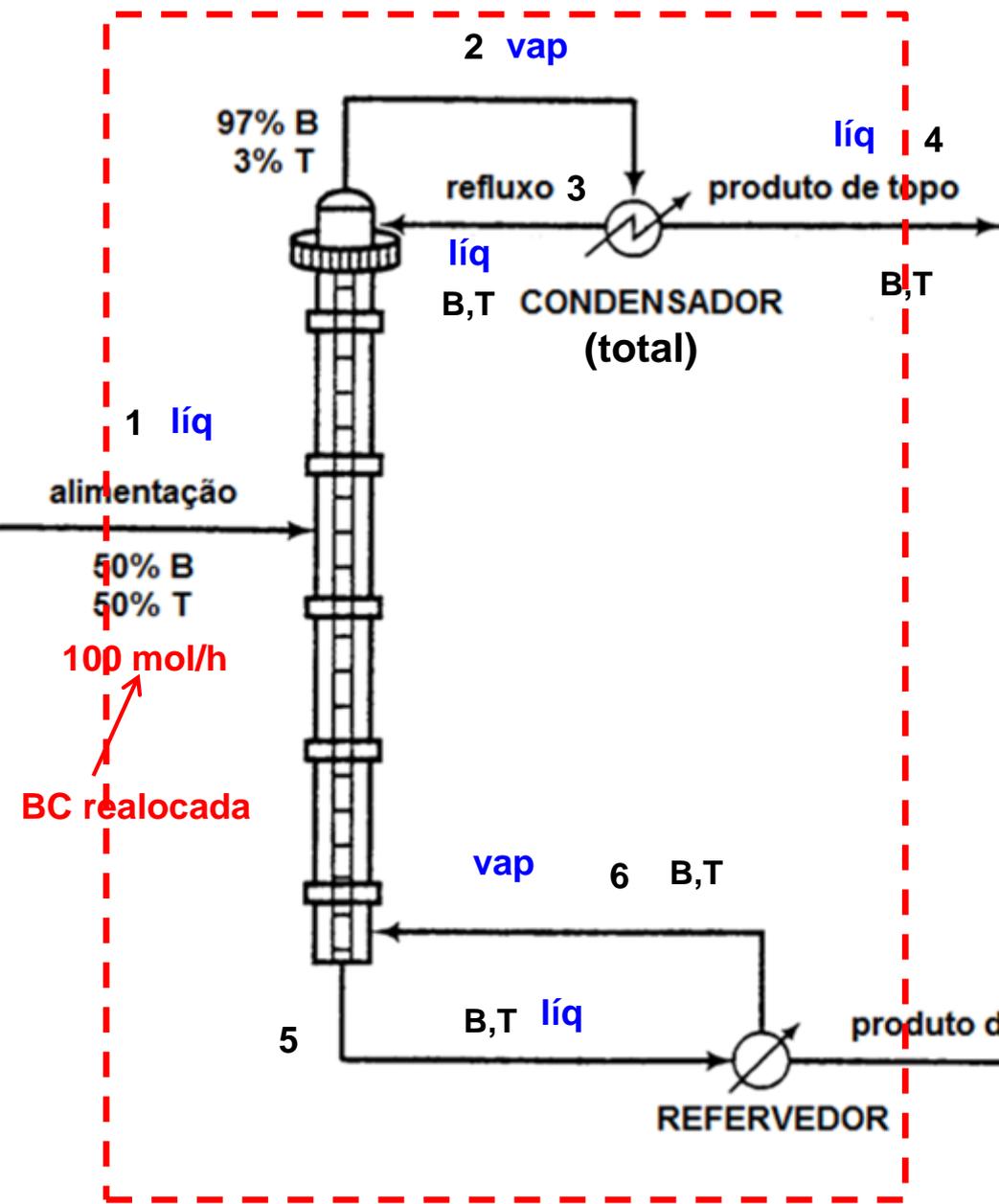






- Vapor que sai do topo é completamente condensado e separado em duas correntes de mesma vazão
- (R1)
- Produto de topo contém 89,2% do benzeno alimentado à coluna
- (R2)
- 45% do líquido à entrada do refervedor são vaporizados
- (R3)
- As composições das correntes que saem do refervedor são relacionadas por:
- (R4)

$$\frac{y_B / (1 - y_B)}{x_B / (1 - x_B)} = 2,25$$



100 mol/h  
BC realocada

- (R1) Vapor que sai do topo é completamente condensado e separado em duas correntes de mesma vazão
- (R2) Produto de topo contém 89,2% do benzeno alimentado à coluna
- (R3) 45% do líquido à entrada do refeedor são vaporizados
- (R4) As composições das correntes que saem do refeedor são relacionadas por:

$$\frac{y_B / (1 - y_B)}{x_B / (1 - x_B)} = 2,25$$

# exercício proposto – produção de café instantâneo

A figura representa simplificada um processo de produção de café instantâneo que opera em regime estacionário. Café moído e torrado (corrente 2, contendo 32,7% de sólidos insolúveis e 67,3% de componentes solúveis) é alimentado junto com água quente ao conjunto percolador-separador, gerando o extrato (corrente 8, contendo somente água e 35% de componentes solúveis). A solução obtida na prensagem (corrente 7), contendo apenas componentes solúveis e água, é reciclada para o percolador. A corrente 4 contém 40% de sólidos insolúveis, além de componentes solúveis e água. No secador é gerada a corrente 6, que contém 62,5% de sólidos insolúveis, água e componentes solúveis. A corrente 5 contém apenas água gerada na operação de secagem. Sabe-se também que:

$$\frac{\text{componentes solúveis, corrente 4}}{\text{água, corrente 4}} = \frac{\text{componentes solúveis, corrente 7}}{\text{água, corrente 7}}$$

- Faça a análise do número de graus de liberdade para cada unidade, para o balanço global e para o processo completo. Interprete o resultado.
- Calcule a porcentagem de recuperação de componente solúveis, isto é, a relação:

$$\frac{\text{componentes solúveis recuperados no extrato}}{\text{componentes solúveis no café alimentado ao processo}} \times 100$$

- Determine a porcentagem de sólidos solúveis na corrente 6.

Todas as porcentagens indicadas estão em base mássica.

