

BMM5729 – Análise Sistêmica e Engenharia do Metabolismo

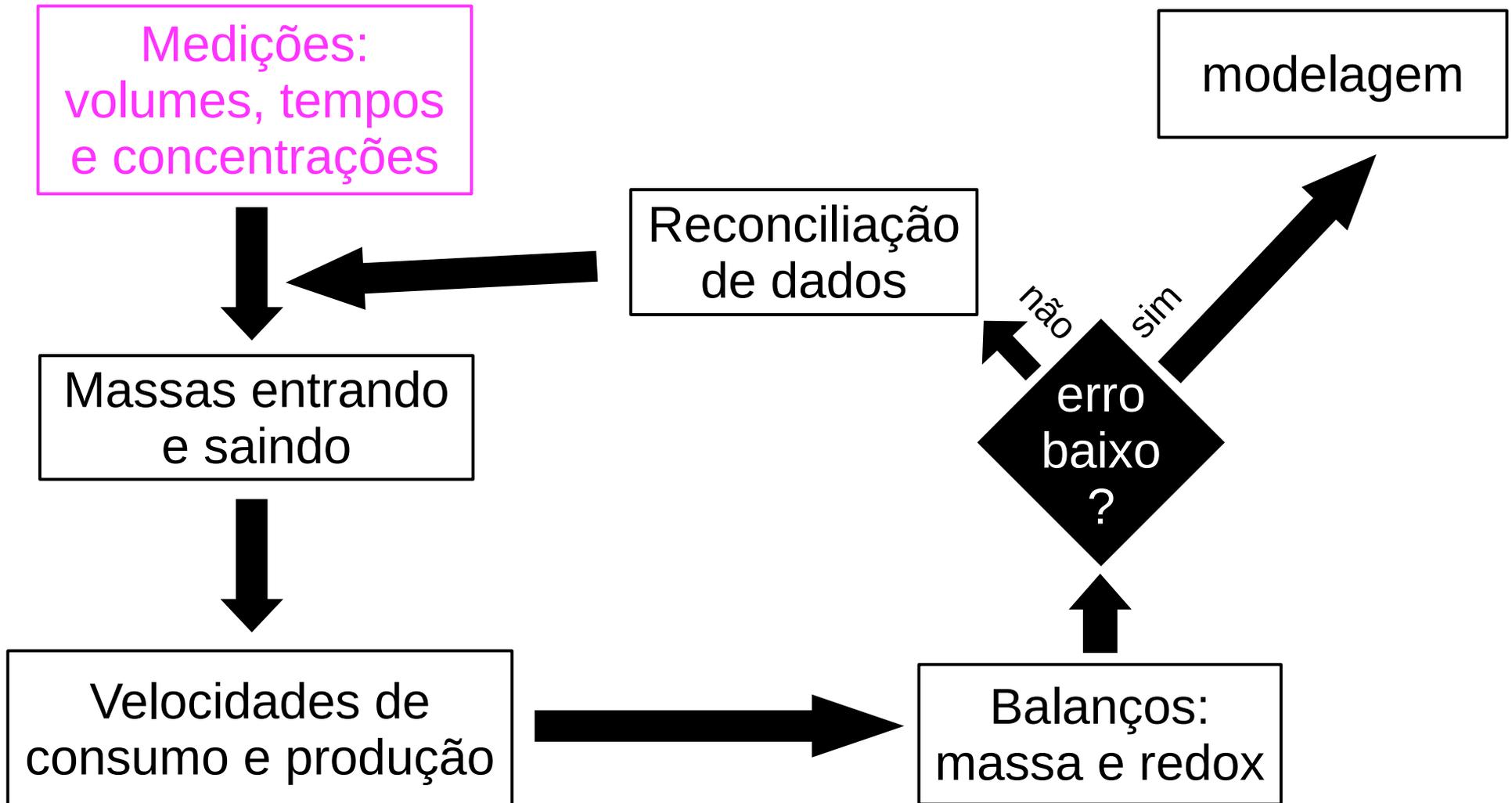
Tratamento de dados + balanços (C e redox)

Parte 1: Quimiostatos

Rafael Nahat
2018

Processo de tratamento de dados

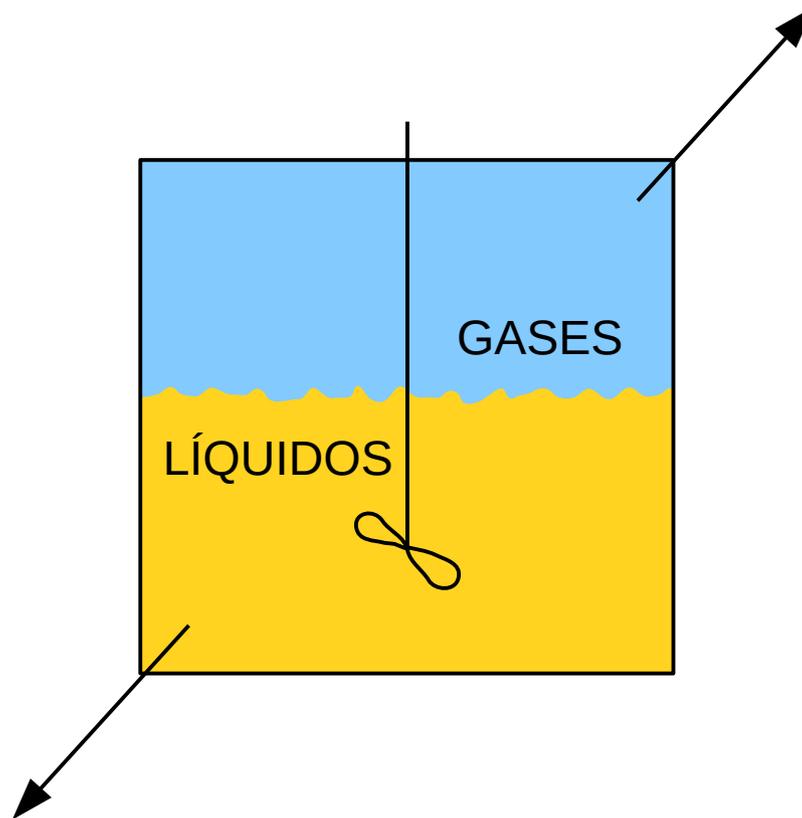
O processo é iterativo e começa com as **medições**



Dados experimentais

Esquema de um biorreator:

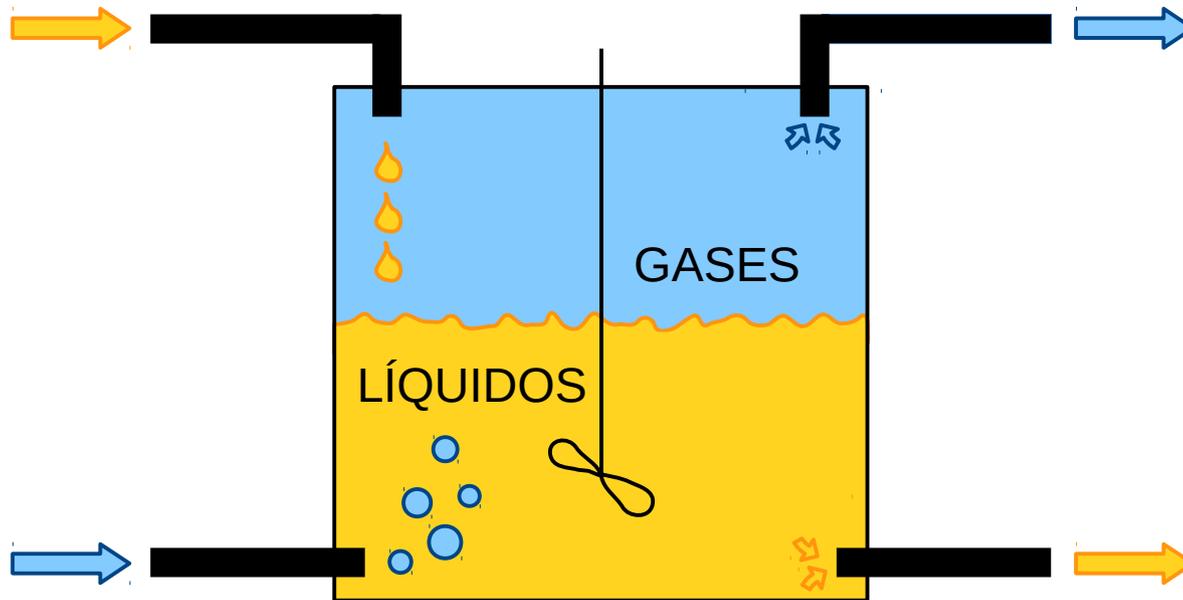
Nesta aula, esta cor
significa GÁS



Nesta aula, esta cor
significa LÍQUIDO

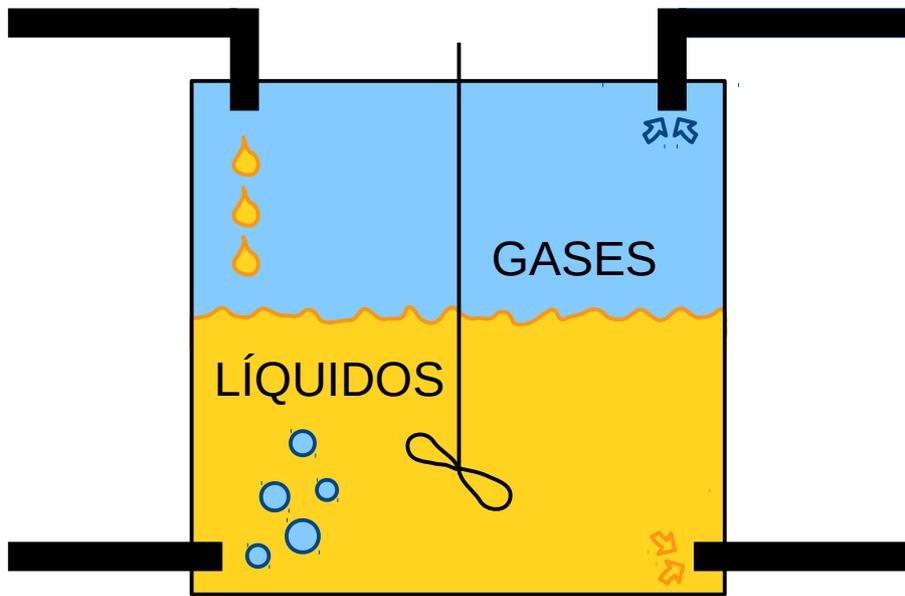
Dados experimentais

Esquema de um biorreator com correntes de entrada e saída:

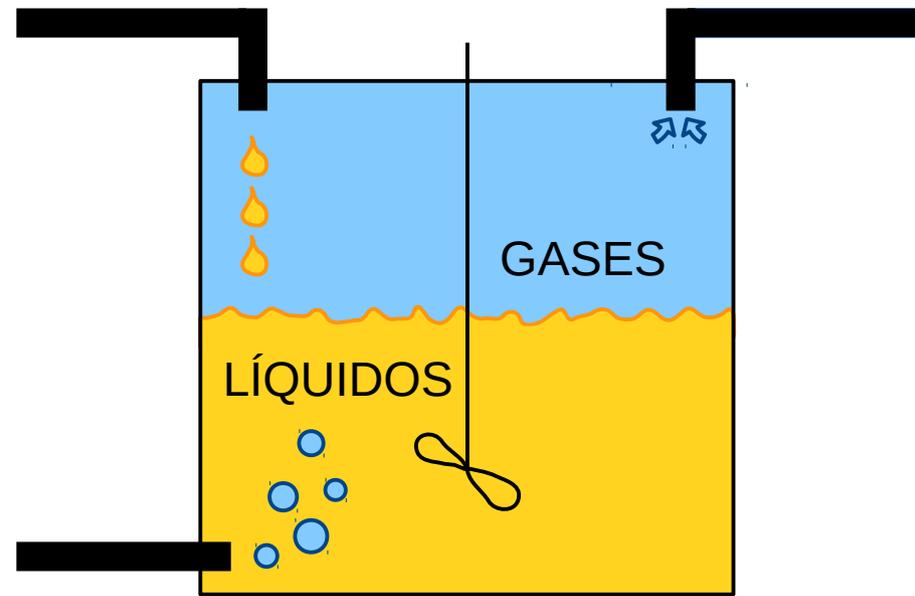


Dados experimentais

Esquema de um biorreator com correntes de entrada e saída:



QUIMIOSTATO

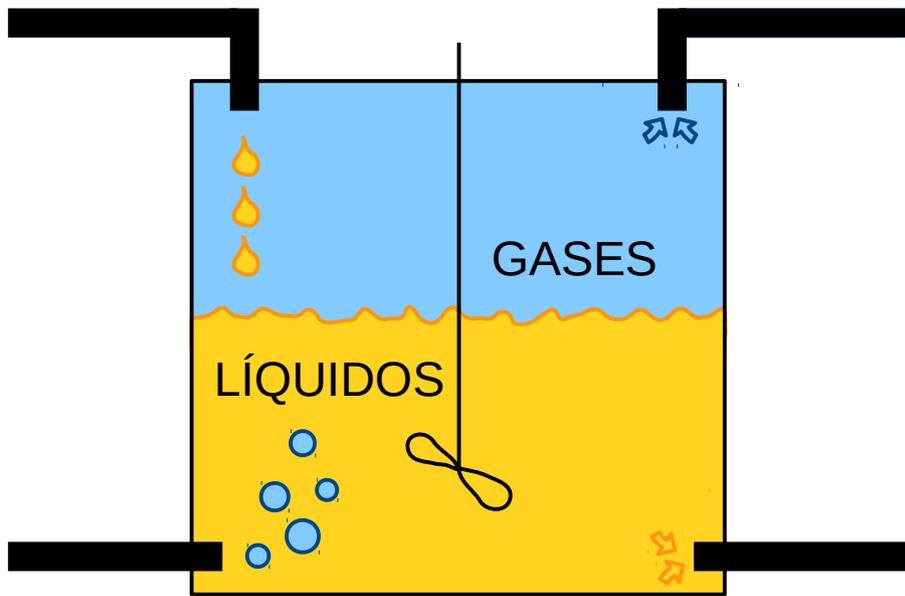


BATELADA ALIMENTADA

Dados experimentais

Esquema de um biorreator com correntes de entrada e saída:

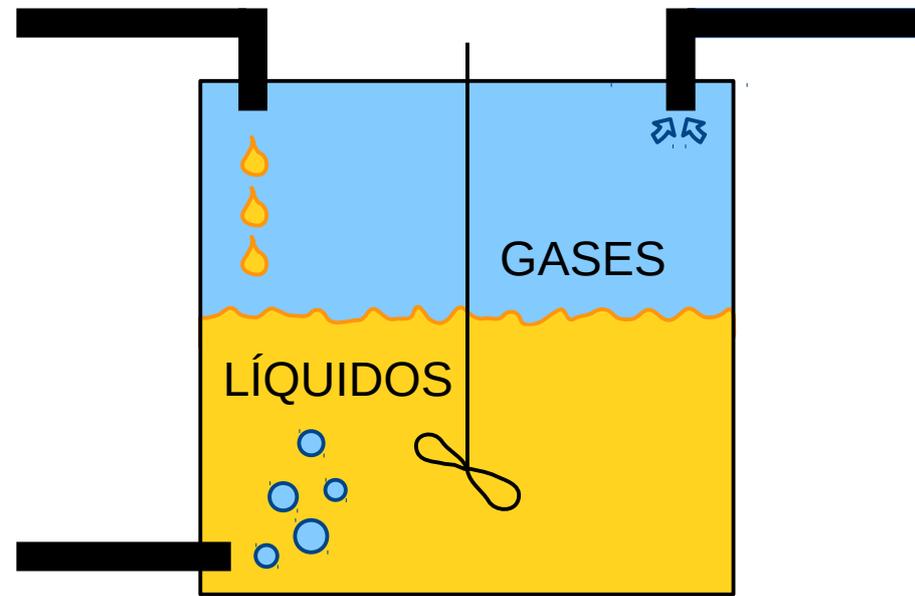
Experimento E1



QUIMIOSTATO

Estado
Estacionário

Experimento E2



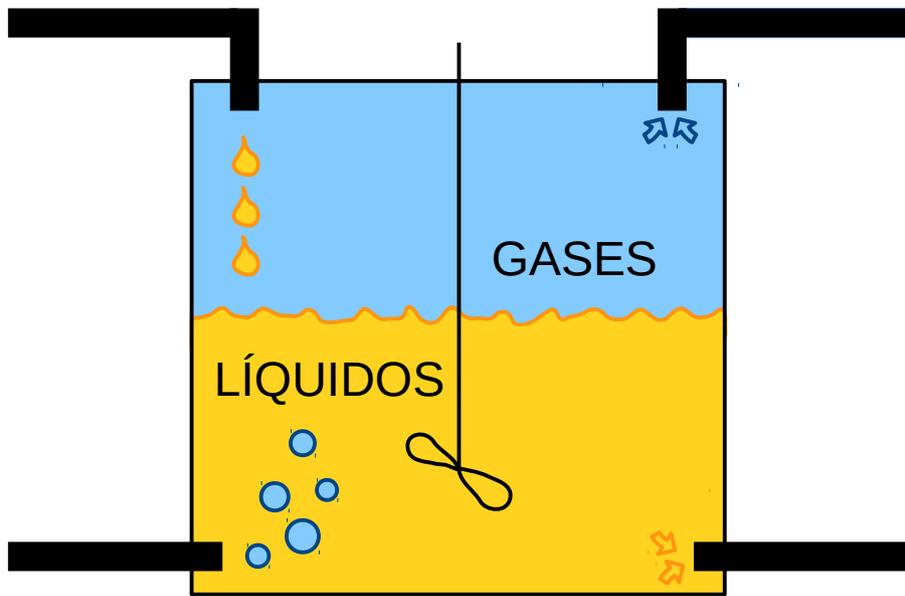
BATELADA ALIMENTADA

Estado
Pseudo-estacionário

Dados experimentais

Esquema de um biorreator com correntes de entrada e saída:

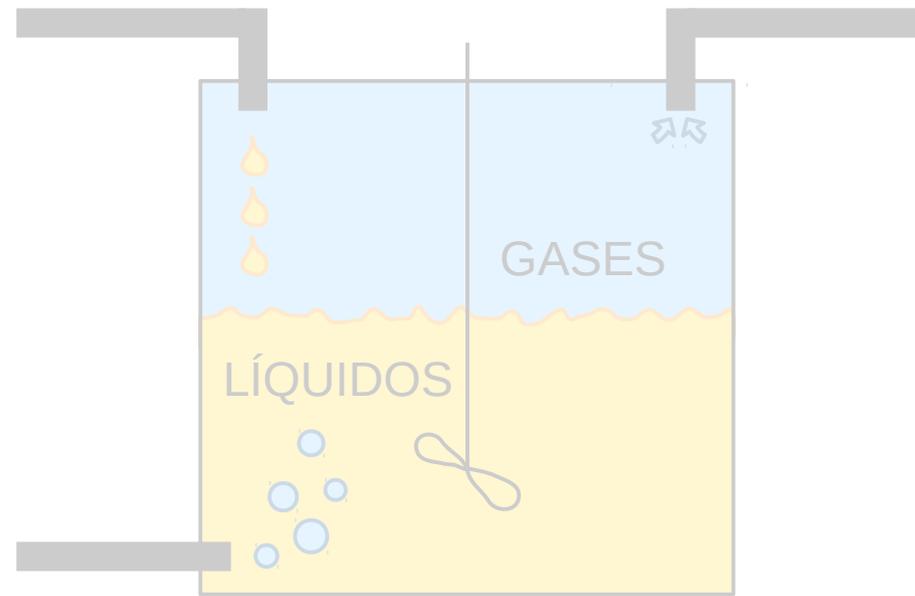
Experimento E1



QUIMIOSTATO

Estado
Estacionário

Experimento E2

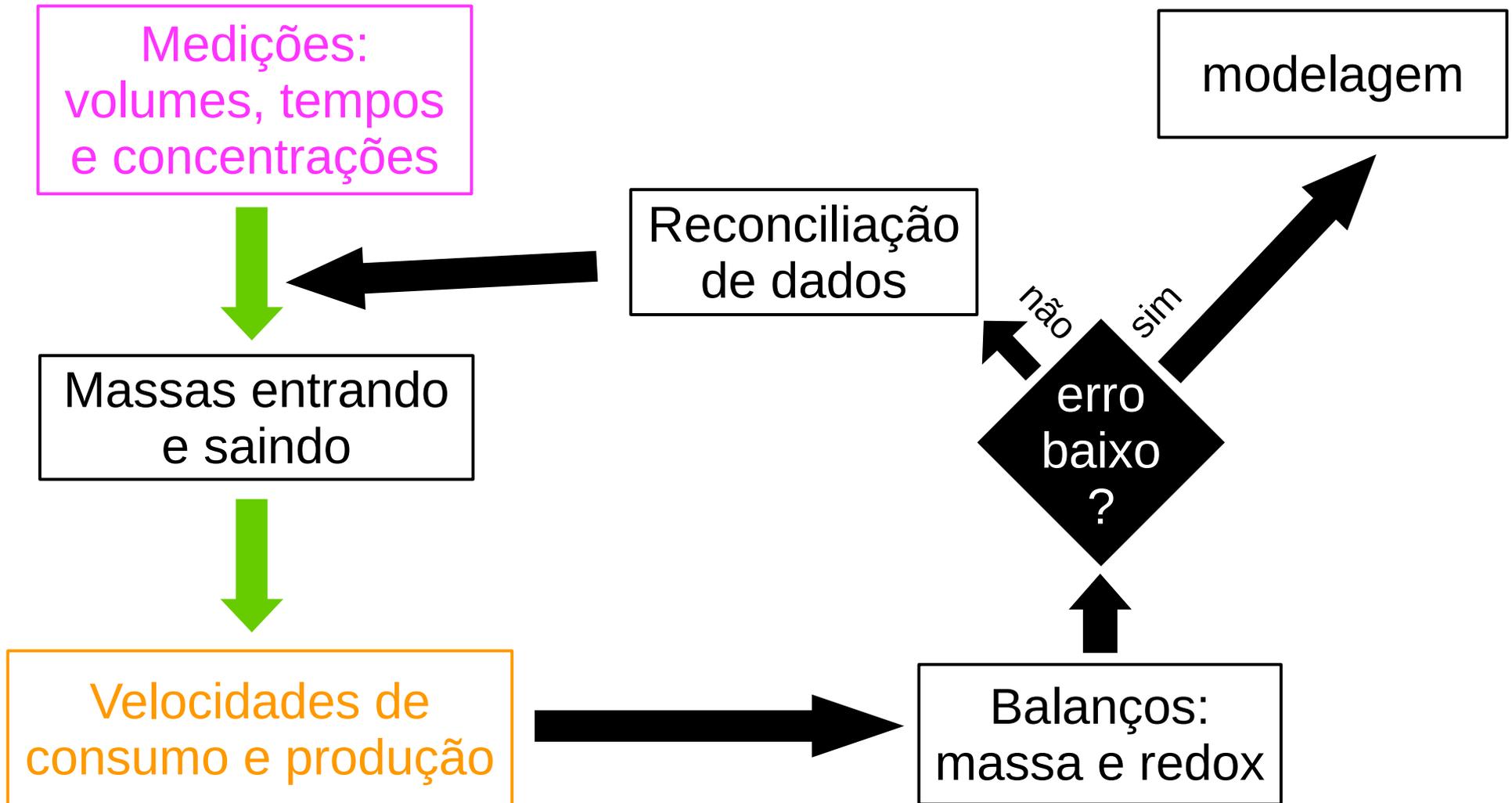


BATELADA ALIMENTADA

Estado
Pseudo-estacionário

Processo de tratamento de dados

Vamos **olhar para frente** para decidir **como proceder agora**



Cálculos experimentais

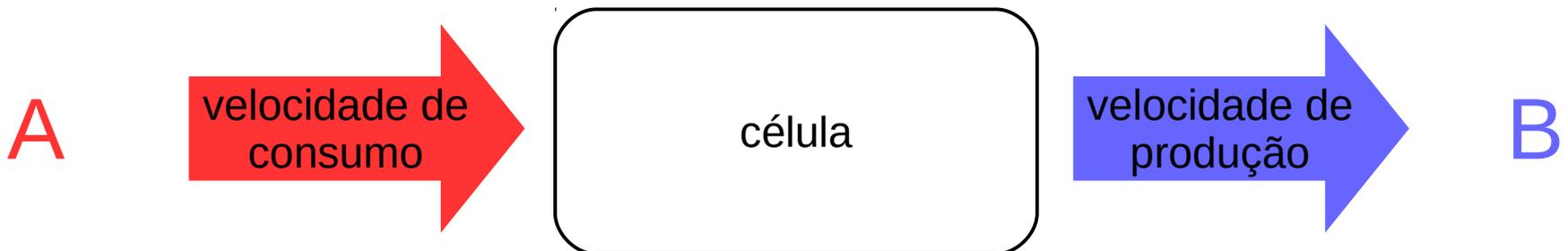
- Queremos velocidades de consumo ou produção:

$$v_A = \frac{\Delta \text{massa}_A}{\Delta \text{tempo}}$$

- Para quê? Quantificar a conversão de **A** em **B**

Fator de conversão (Yield)

$$Y_{B/A} = \frac{v_B}{v_A}$$



Cálculos experimentais

$$v_A = \frac{\Delta \text{massa}_A}{\Delta \text{tempo}}$$

$$\Delta \text{massa}_A = (\text{massa final de A}) - (\text{massa inicial de A})$$

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Massa} & = & \text{Concentração} & \times & \text{Volume} \\ \text{g} & = & \text{g/L} & \times & \text{L} \end{array}$$

Variáveis calculadas a partir de **medições experimentais**

Cálculos experimentais

$$v_A = \frac{\Delta \text{massa}_A}{\Delta \text{tempo}}$$

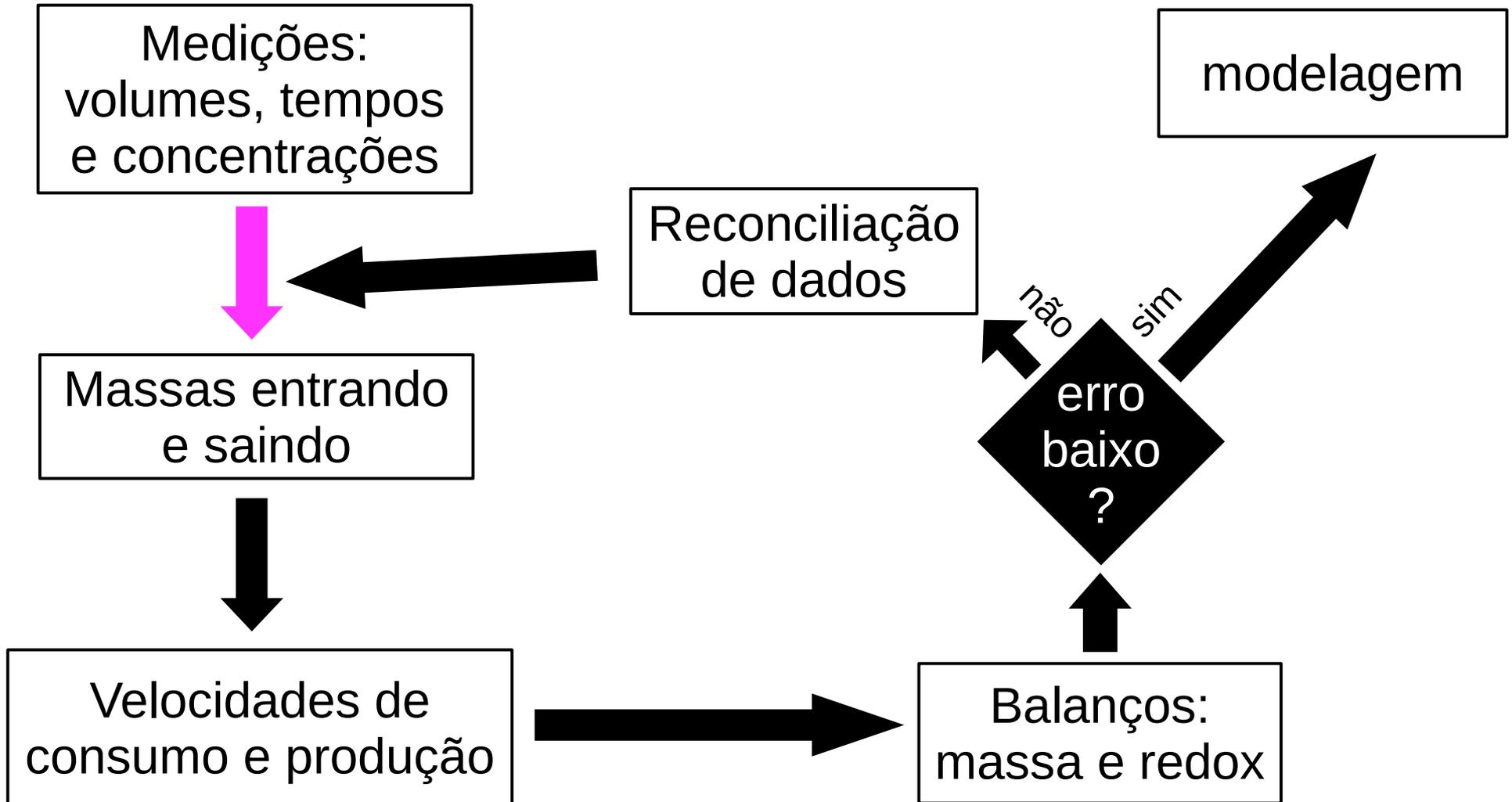
$$\Delta \text{massa}_A = (\text{massa final de A}) - (\text{massa inicial de A})$$

Vazão				Vazão
Mássica	=	Concentração	×	Volumétrica
g/h	=	g/L	×	L/h

Variáveis calculadas a partir de medições experimentais

Processo de tratamento de dados

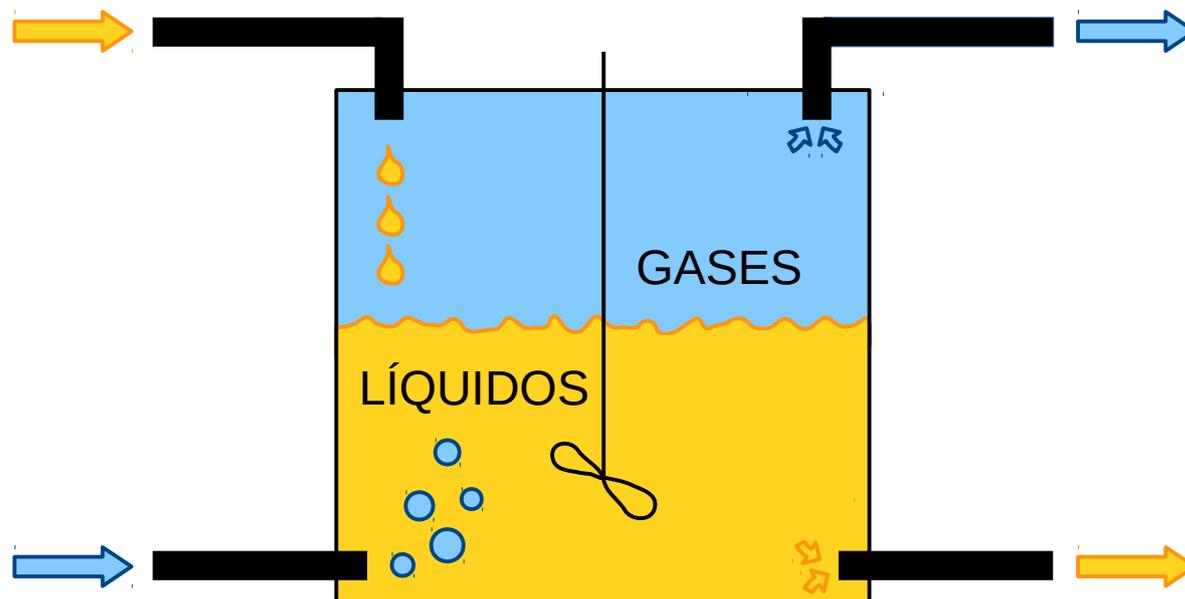
Agora vamos calcular massas entrando e saindo do reator



Cálculos experimentais

Lembrando: vazão mássica = concentração × vazão volumétrica

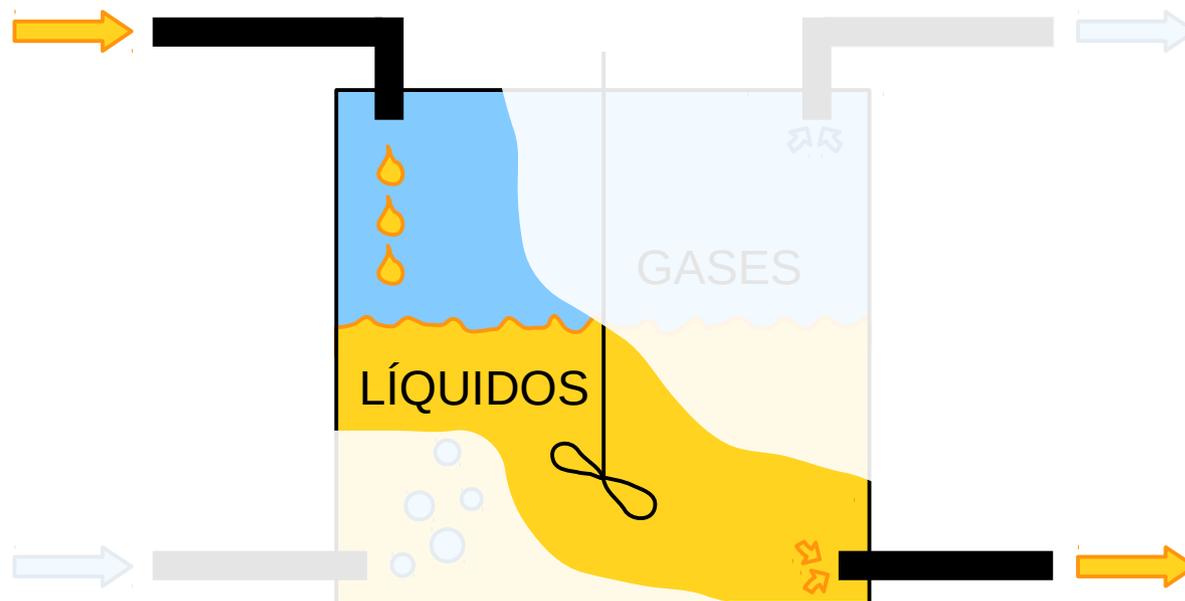
	LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					GASES		
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	y_{O_2}	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

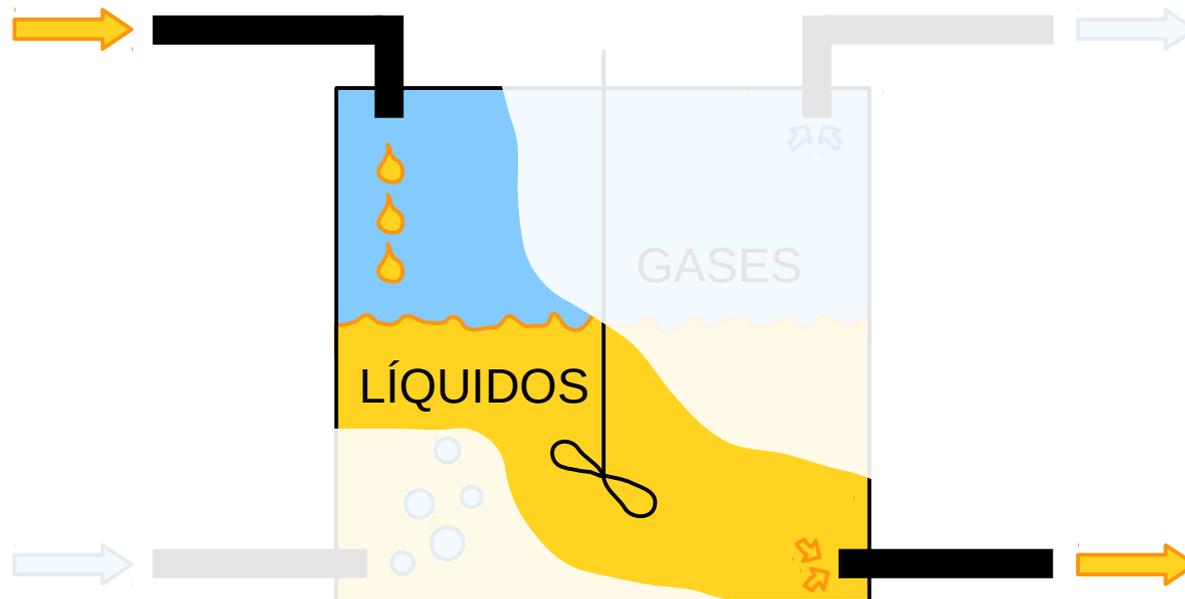
	LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					GASES		
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	y_{O_2}	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t (h)	V_L (L)	F_L (L/h)	X_R (g/L)	C_S (g/L)	C_P (g/L)	F_G (L/h)	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2} (%)
							$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	
							$\frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$	



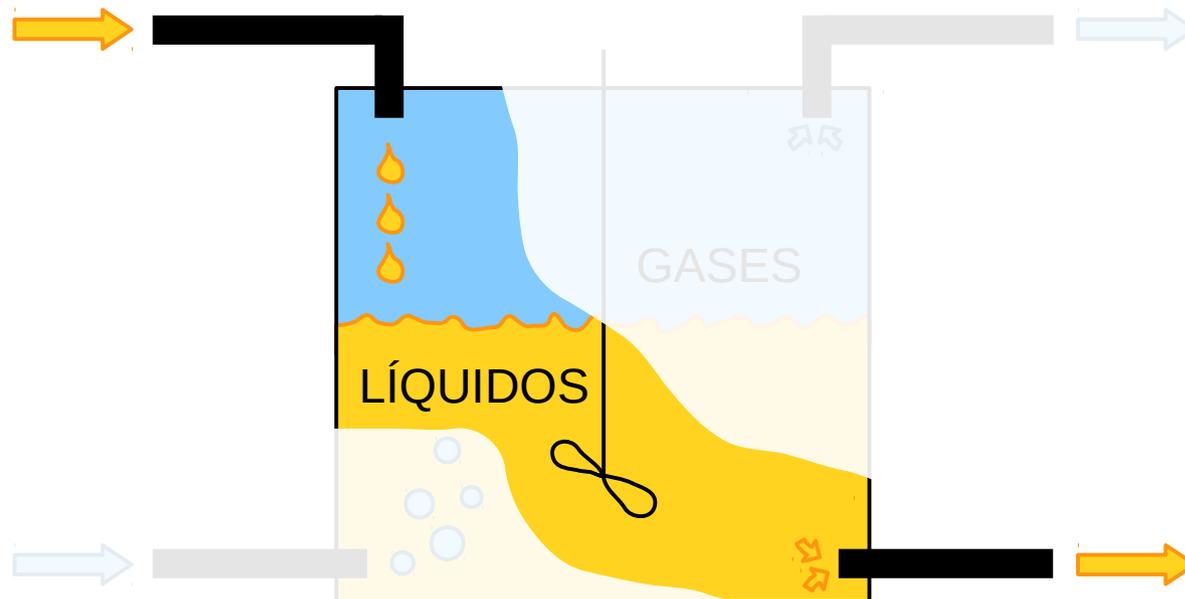
Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	(%)

$$\frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$$



Cálculos experimentais

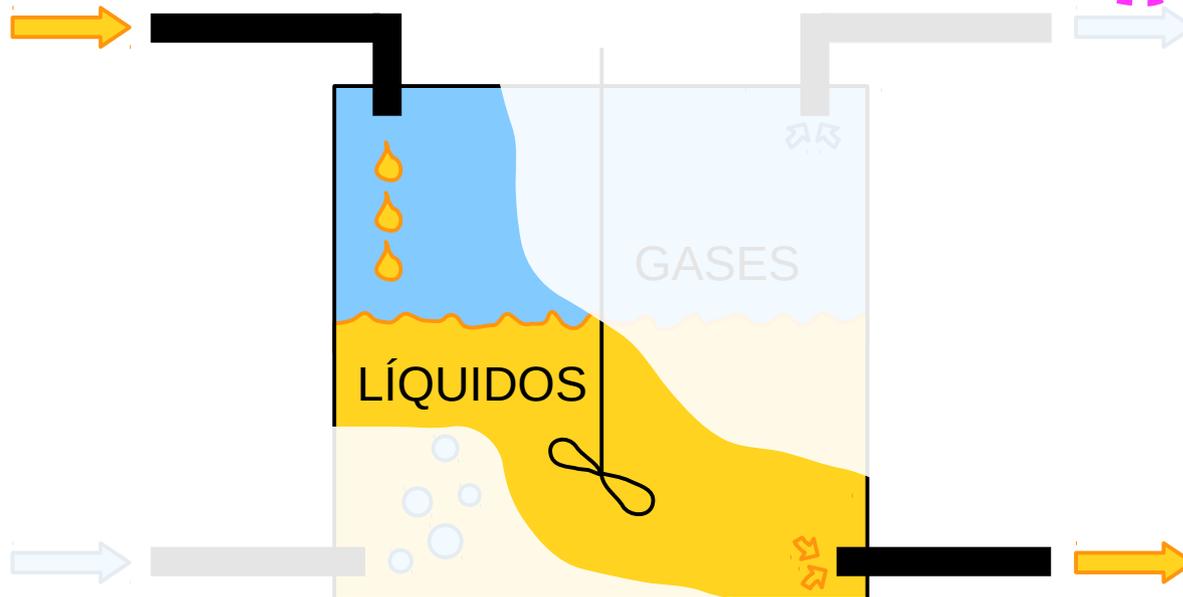
Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	(%)

“velocidade” da massa de S:
VAZÃO MÁSSICA de S
(g / h)

$$\frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$$



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

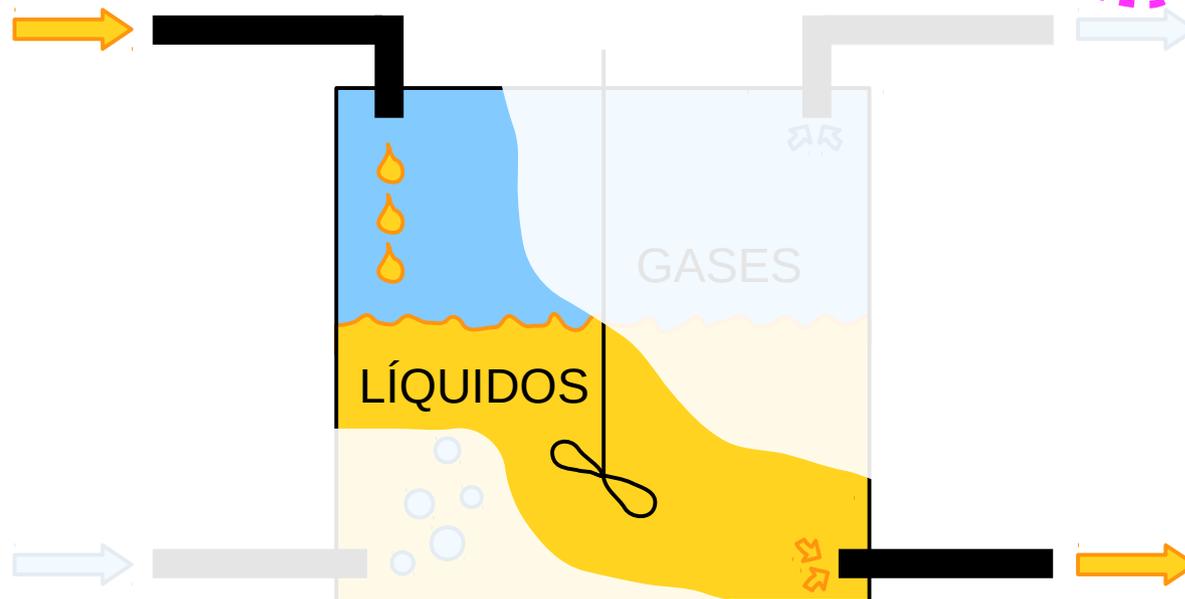
Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	(%)

queremos calcular: v_s
(g / h)

vazão mássica
(g / h)

$$\frac{\Delta m_s}{\Delta t} = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$$

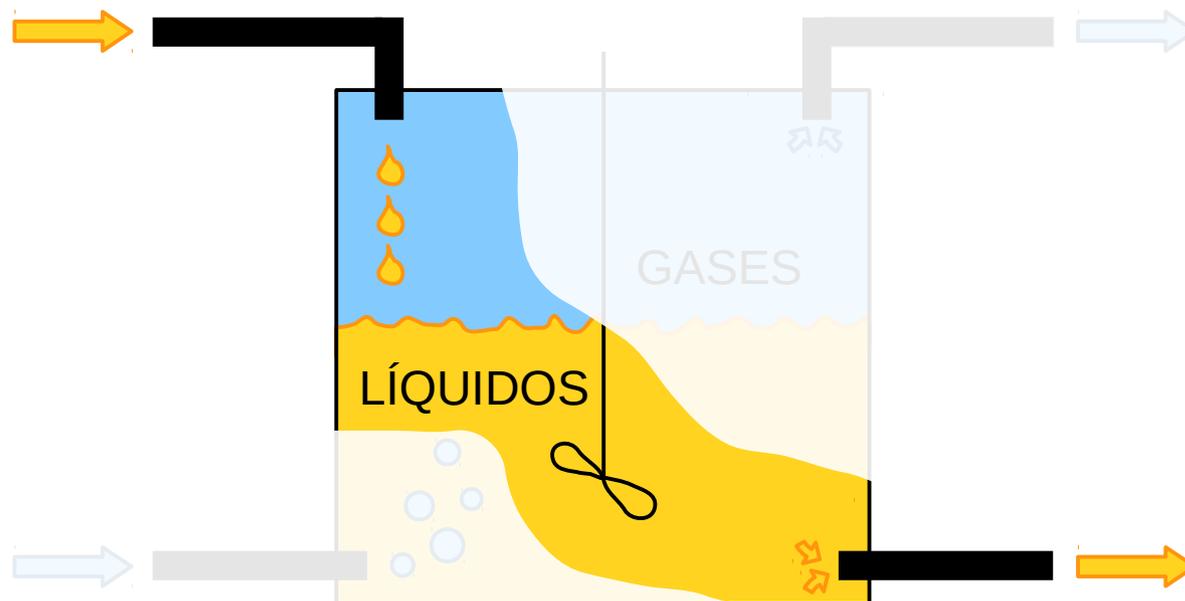


Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	(%)
							$v_s = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$	



Cálculos experimentais

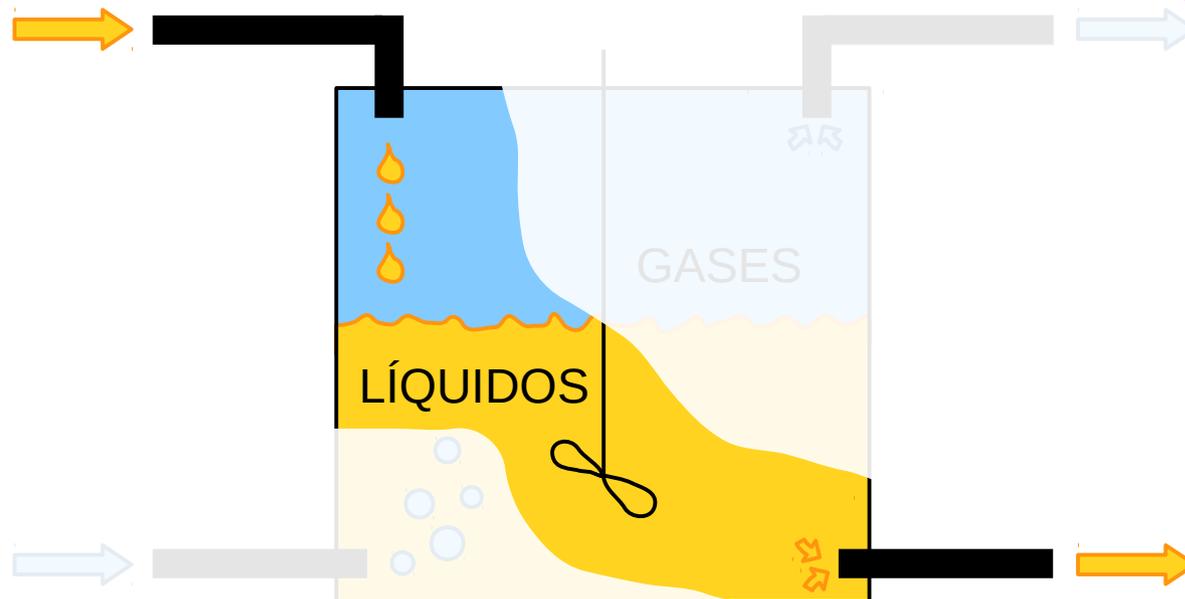
Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$m_s = C_s \times V$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	$\Delta m_s = C_s \times \Delta V$	(%)

“velocidade” do volume:
VAZÃO VOLUMÉTRICA
(L / h)

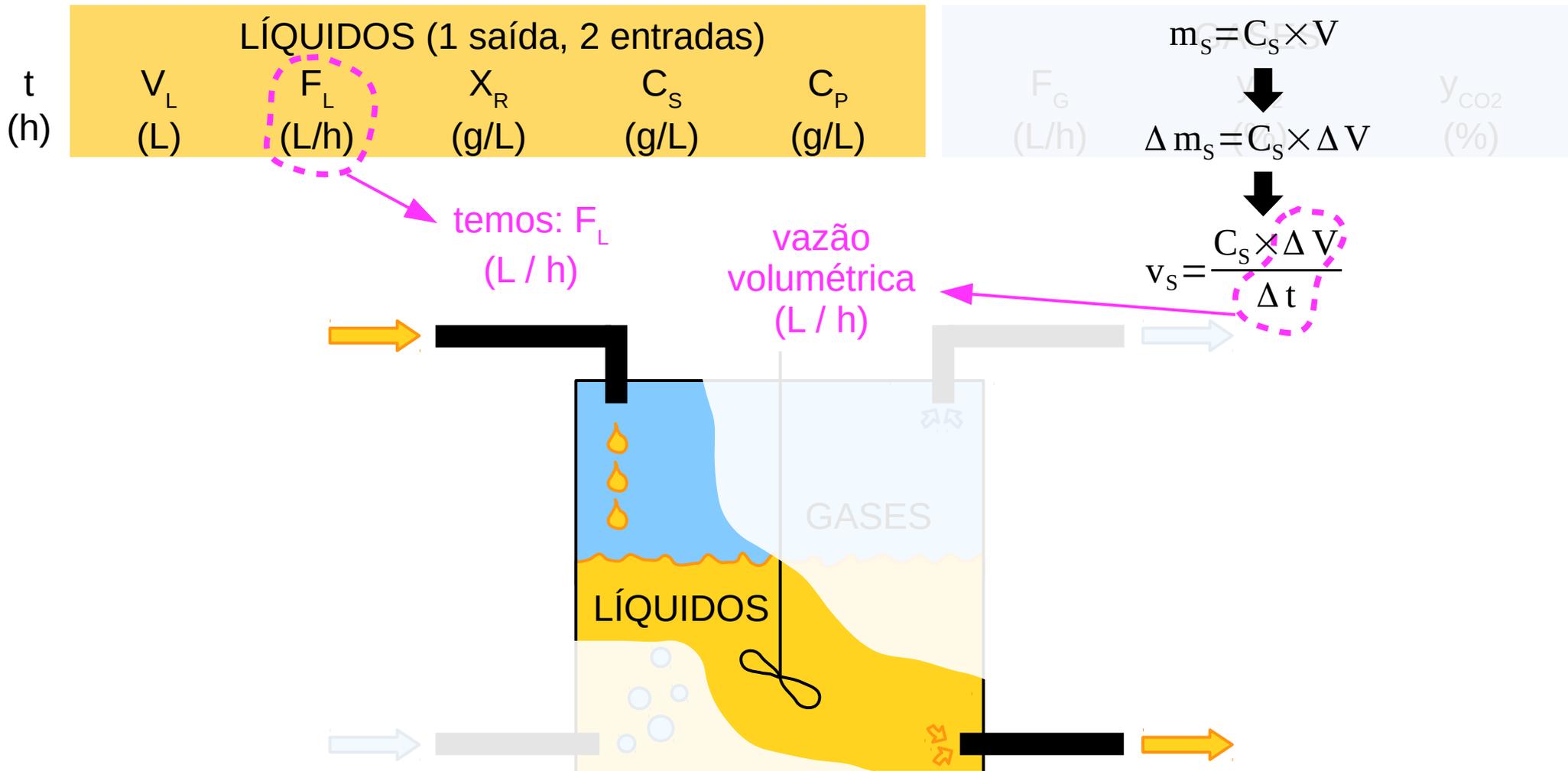
$$v_s = \frac{C_s \times \Delta V}{\Delta t}$$



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

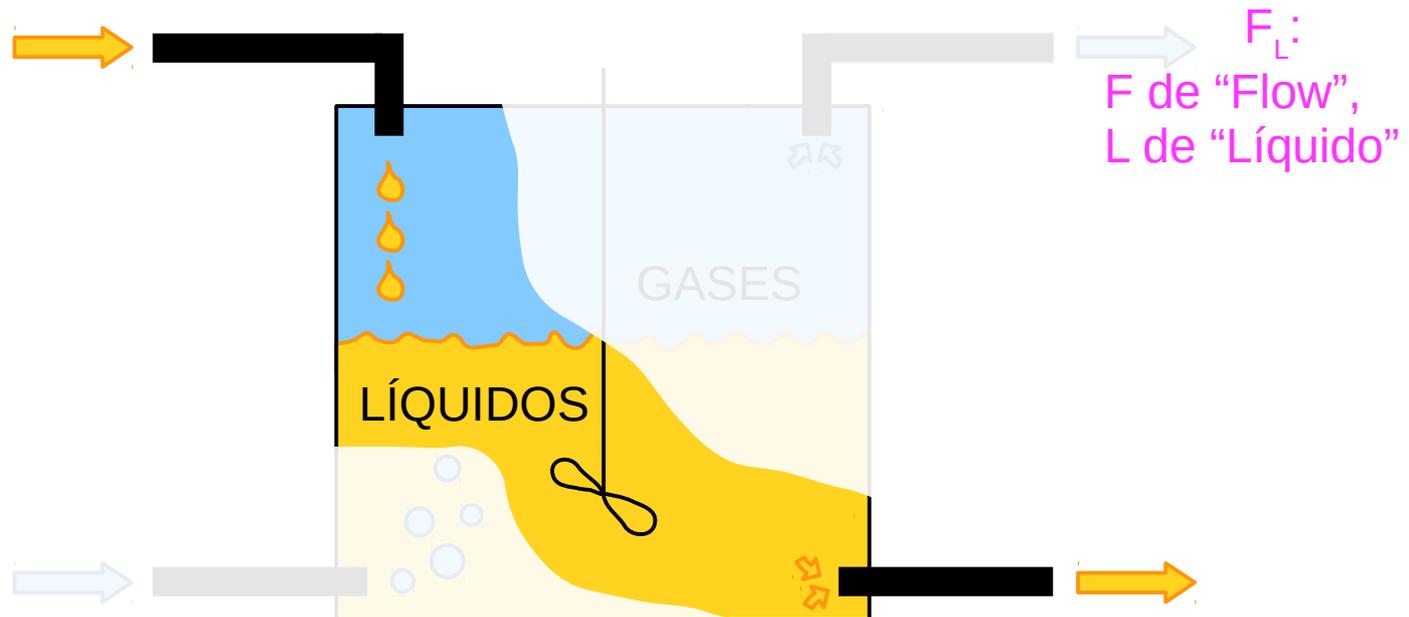
Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)

$m_s = C_s \times V$
↓
 $\Delta m_s = C_s \times \Delta V$
↓
 $v_s = C_s \times F_L$

F_G
(L/h)

y_{CO_2}
(%)



Cálculos experimentais

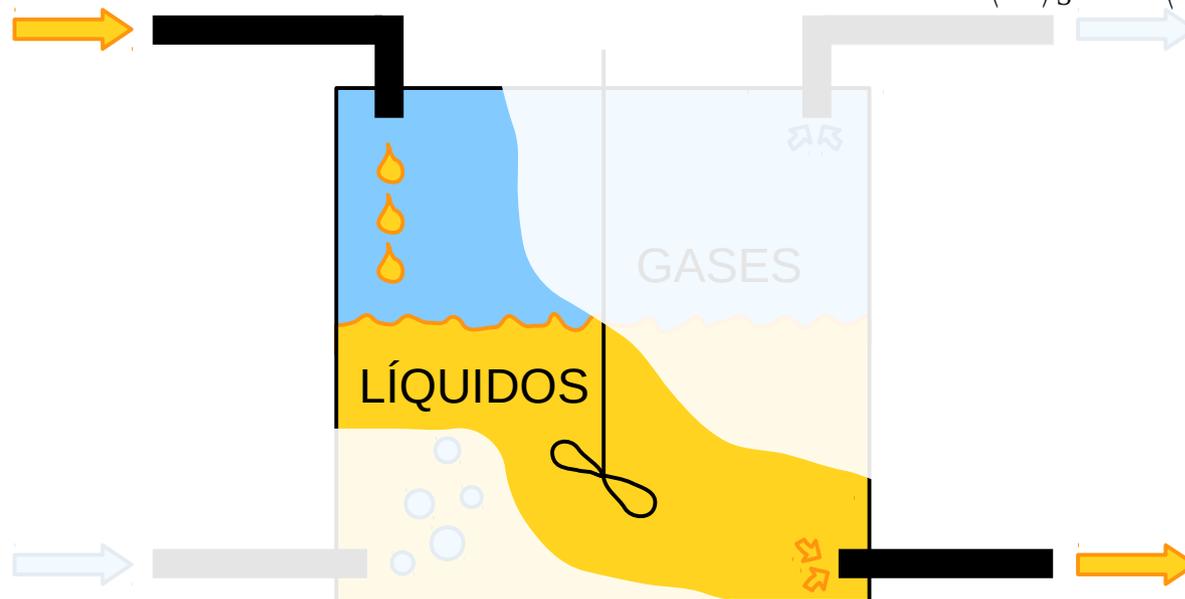
Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Para facilitar, vamos olhar as unidades

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)

$$v_s = C_s \times F_L$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{vazão} \\ \text{mássica} \end{array} \right)_s = C_s \times \left(\begin{array}{c} \text{vazão} \\ \text{volumétrica} \end{array} \right)_{\text{solução}}$$

$$\left(\frac{\text{g}}{\text{h}} \right)_s = \left(\frac{\text{g}_s}{\text{L}} \right) \times \left(\frac{\text{L}}{\text{h}} \right)_{\text{solução}}$$


Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)						GASES		
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$v_S = C_S \times F_L$	y_{CO_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)

vazão mássica de S entrando:

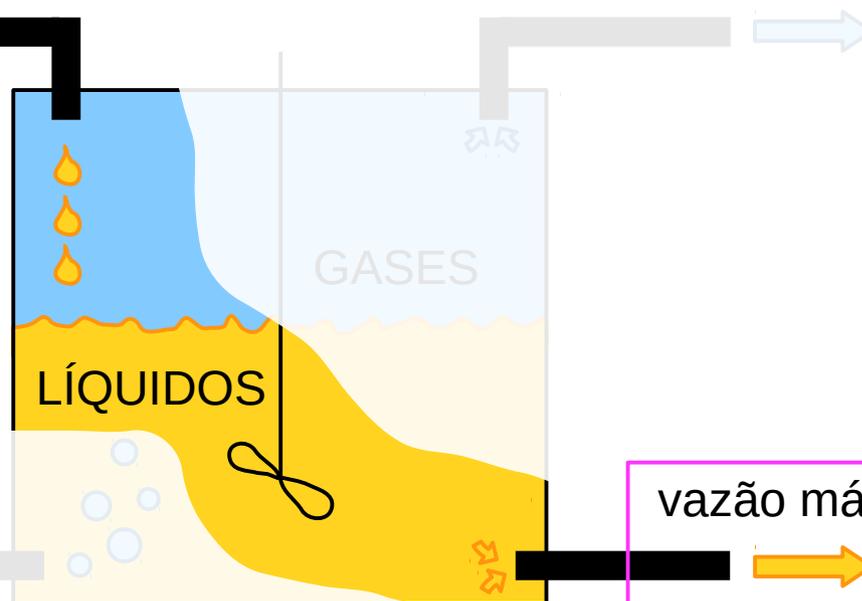
$$v_{S,in} = C_{S,in} \times F_L$$

QUIMIOSTATO:

Volume cte: vazão volumétrica total de entrada igual à vazão volumétrica total de saída



Entrada e saída são ambas F_L



vazão mássica de S saindo:

$$v_{S,out} = C_{S,out} \times F_L$$

Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

	LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					GASES		
t	V_L	F_L	X_R	C_S	C_P	F_G	$v_S = C_S \times F_L$	y_{O_2}
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(%)	y_{CO_2}
								(%)

vazão mássica de S entrando:

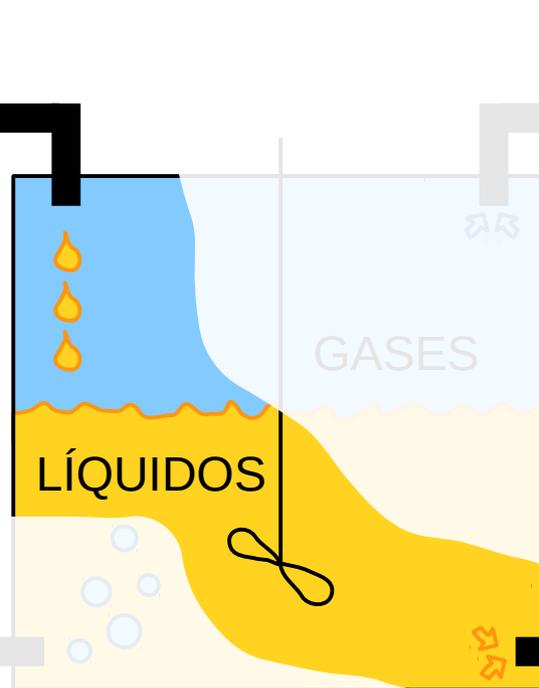
$$v_{S,in} = C_{S,in} \times F_L$$

QUIMIOSTATO:

Volume cte: vazão volumétrica total de entrada igual à vazão volumétrica total de saída



Entrada e saída são ambas F_L



vazão mássica de S passando pelo quimiostato:

$$v_S = (v_{S,out}) - (v_{S,in})$$



$$v_S = (C_{S,out} \times F_L) - (C_{S,in} \times F_L)$$

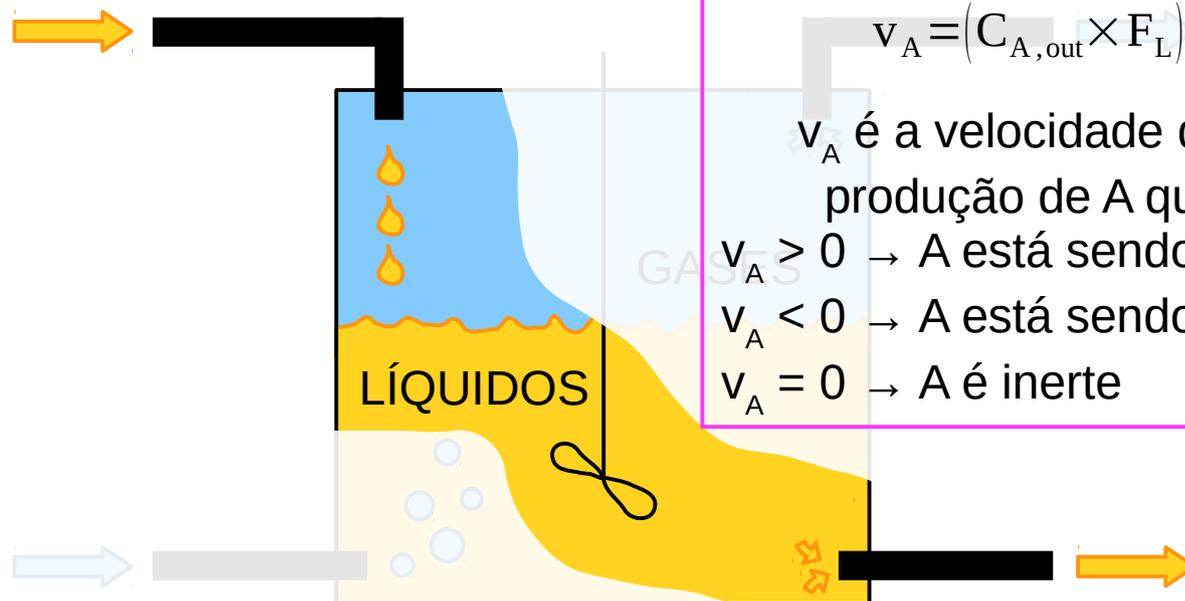
vazão mássica de S saindo:

$$v_{S,out} = C_{S,out} \times F_L$$

Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

t (h)	LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)					GASES		
	V_L (L)	F_L (L/h)	X_R (g/L)	C_S (g/L)	C_P (g/L)	F_G (L/h)	y_{O_2} (%)	y_{CO_2} (%)



vazão mássica de uma substância A qualquer passando pelo quimiostato:

$$v_A = (C_{A,out} \times F_L) - (C_{A,in} \times F_L)$$

v_A é a velocidade de consumo ou produção de A que queremos:

$v_A > 0 \rightarrow$ A está sendo produzido

$v_A < 0 \rightarrow$ A está sendo consumido

$v_A = 0 \rightarrow$ A é inerte

Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Mas, espere!

Se num quimiostato todas as velocidades se equilibram para manter tudo constante, quem disse que vai estabilizar no pH que nós queremos?

Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

Mas, espere!

Se num quimiostato todas as velocidades se equilibram para manter tudo constante, quem disse que vai estabilizar no pH que nós queremos?

Não vai! Por isso no caso real, temos:

líquidos: pelo menos 1 saída, pelo menos 2 entradas
1 dessas entradas de líquidos é o controle de pH

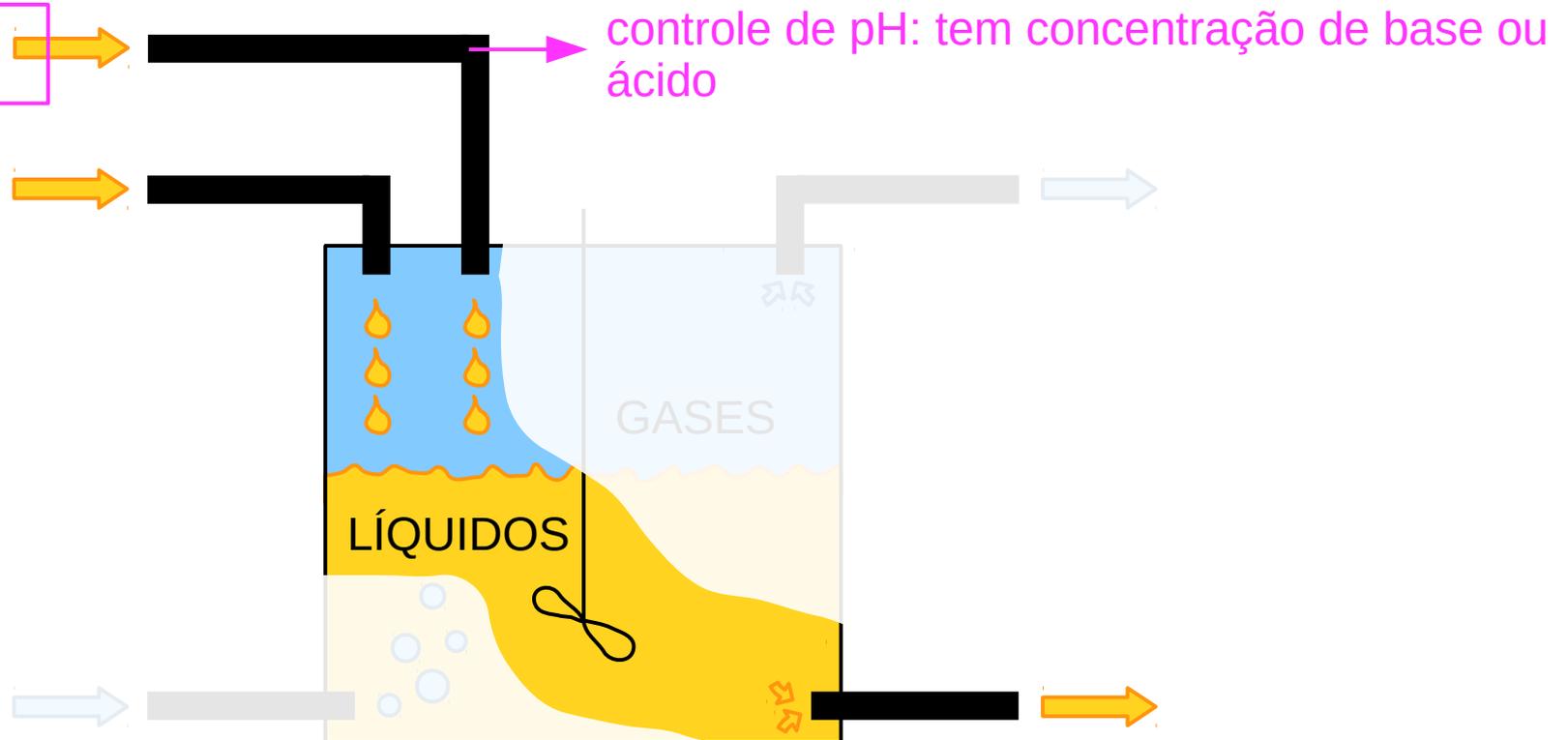
Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	$C_{S,in1}$	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O2,in}$	$y_{CO2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O2,out}$	$y_{CO2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)

$$v_{S,in1} = C_{S,in1} \times F_{L,in1}$$

$$v_{S,in2} = C_{S,in2} \times F_{L,in2}$$



PERGUNTA SURPRESA

A sua bactéria acidifica o meio quando cresce. Você usa soluções de NaOH e H_2SO_4 para controlar o pH do quimiostato. O que acontece se o meio de cultura de alimentação tiver:

- a) muito pouco sódio?
- b) muito pouco enxofre?
- c) muito pouco sódio e muito pouco enxofre?

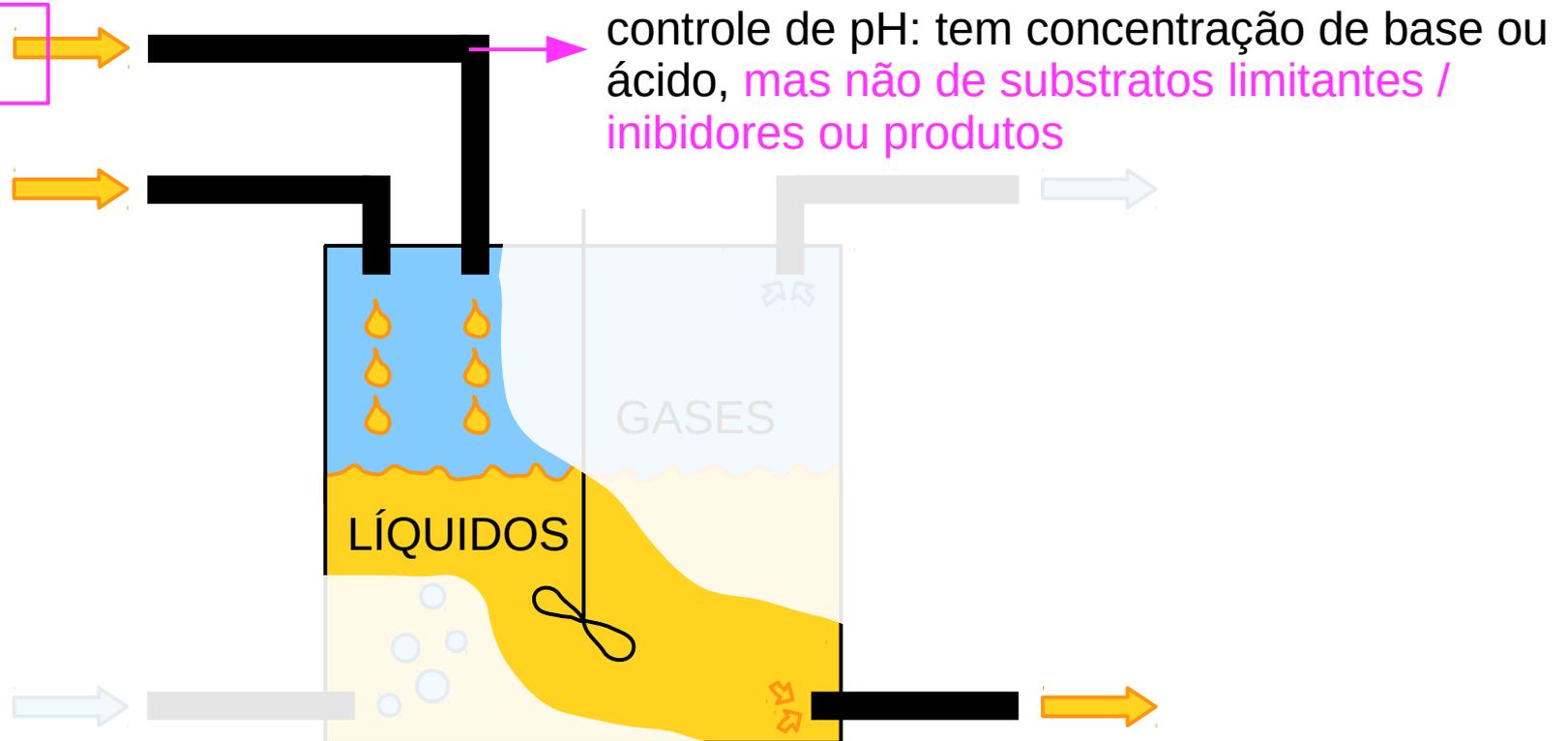
Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)								GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	zero	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O2,in}$	$y_{CO2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O2,out}$	$y_{CO2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)

$$v_{S,in1} = (0) \times F_{L,in1}$$

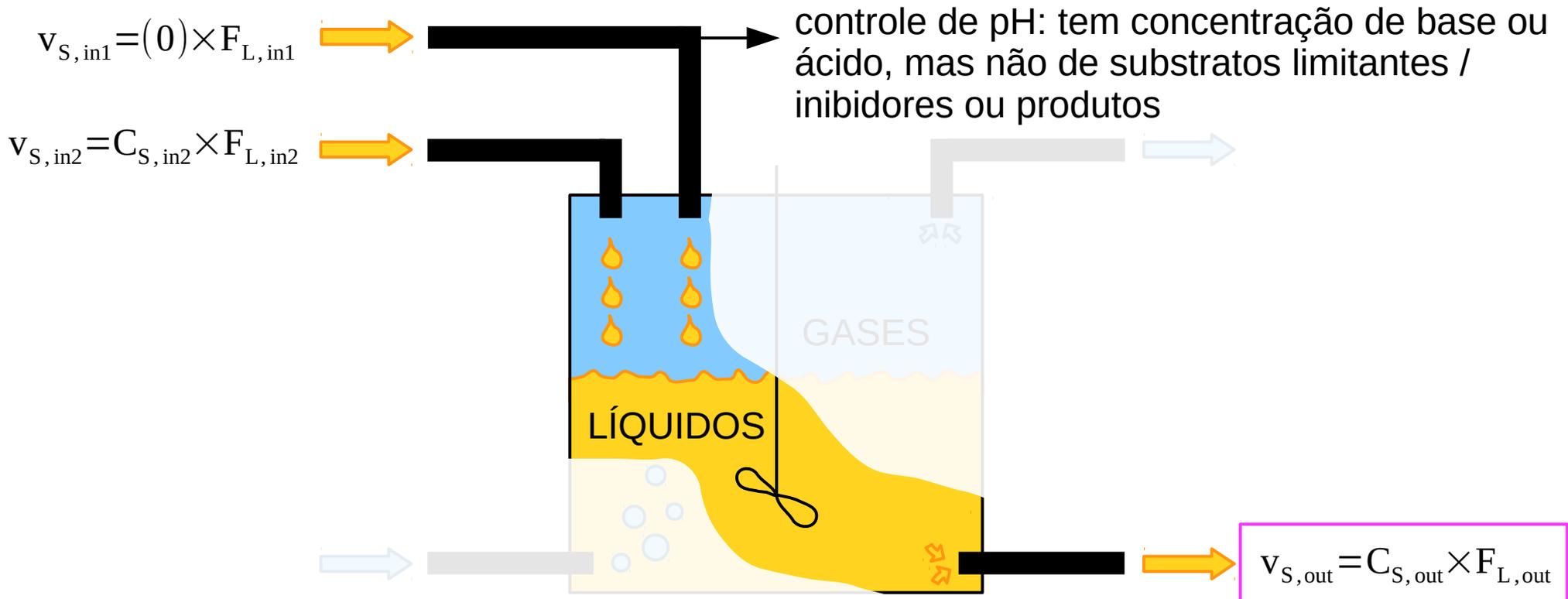
$$v_{S,in2} = C_{S,in2} \times F_{L,in2}$$



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

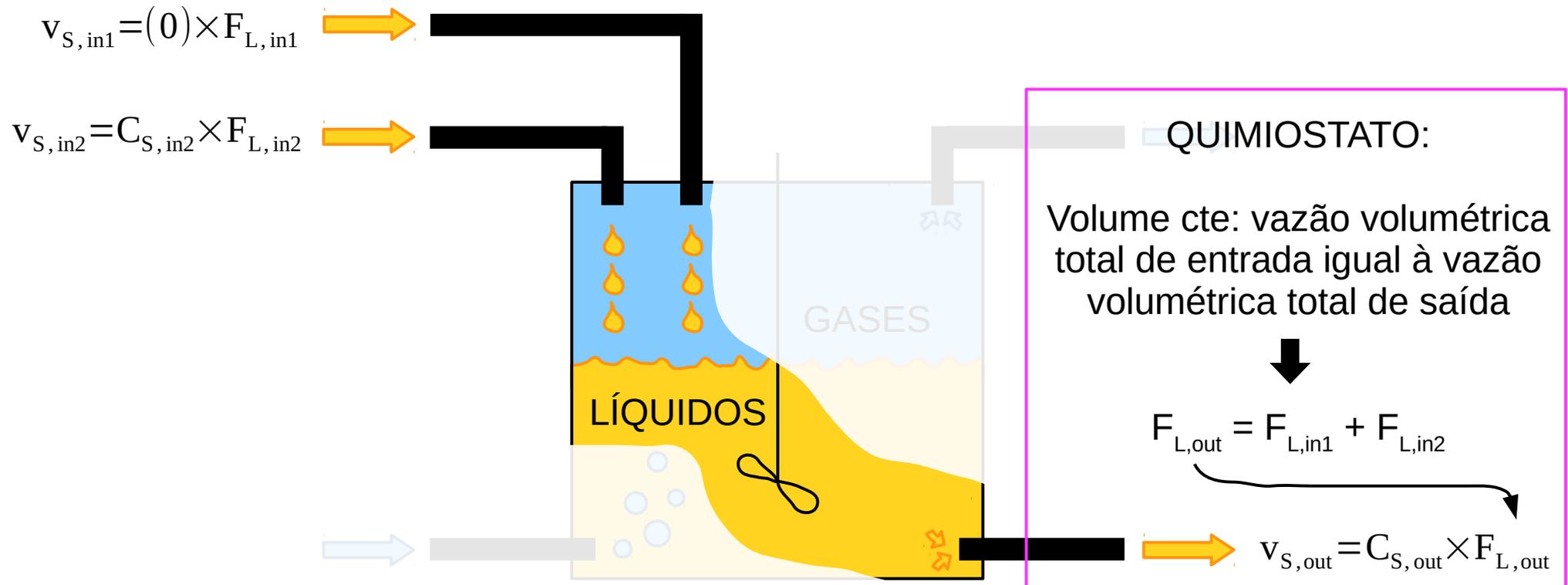
		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)							GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O2,in}$	$y_{CO2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O2,out}$	$y_{CO2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)							GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O_2,in}$	$y_{CO_2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O_2,out}$	$y_{CO_2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)							GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O2,in}$	$y_{CO2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O2,out}$	$y_{CO2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)

$$v_{S,in1} = (0) \times F_{L,in1}$$



$$v_{S,in2} = C_{s,in2} \times F_{L,in2}$$

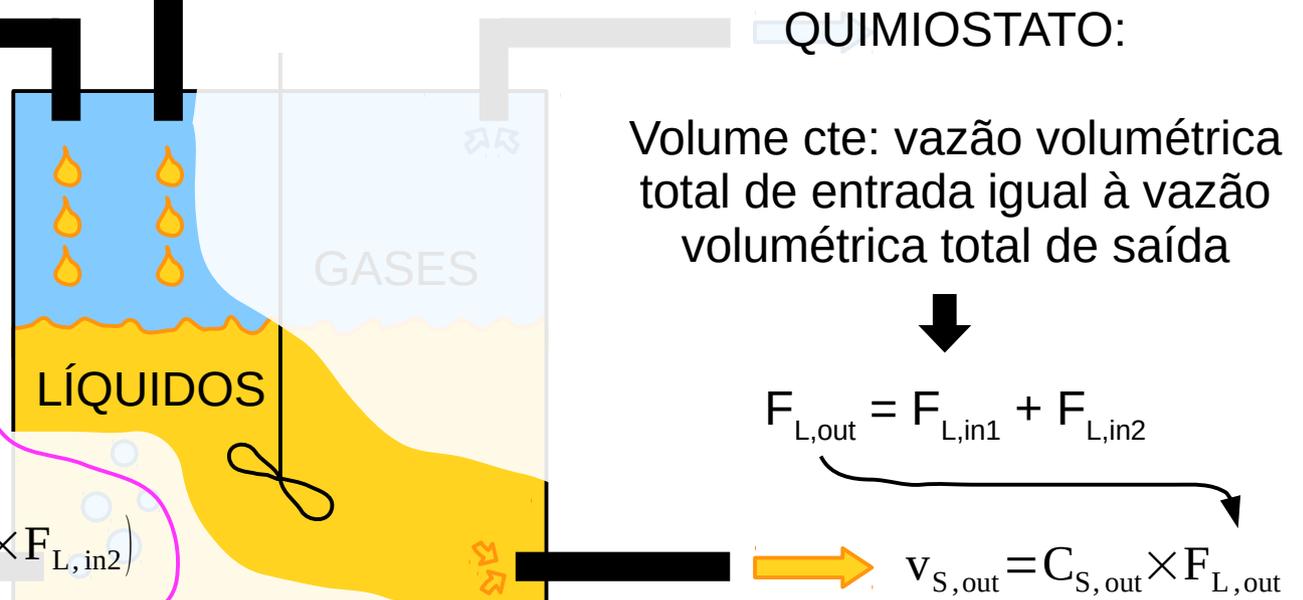


vazão mássica de S passando pelo quimiostato (2 entradas):

$$v_S = (v_{S,out}) - (v_{S,in})$$



$$v_S = (C_{S,out} \times (F_{L,in1} + F_{L,in2})) - (C_{S,in2} \times F_{L,in2})$$



Cálculos experimentais

Vamos montar a tabela começando pelos **LÍQUIDOS**:

		LÍQUIDOS (1 saída, 2 entradas)							GASES					
t	V_L	$F_{L,out}$	$X_{R,out}$	$C_{S,out}$	$C_{P,out}$	$F_{L,in1}$	$F_{L,in2}$	$C_{S,in2}$	$F_{G,in}$	$y_{O2,in}$	$y_{CO2,in}$	$F_{G,out}$	$y_{O2,out}$	$y_{CO2,out}$
(h)	(L)	(L/h)	(g/L)	(g/L)	(g/L)	(L/h)	(L/h)	(g/L)	(L/h)	(%)	(%)	(L/h)	(%)	(%)

QUIMIOSTATO: PARA OS LÍQUIDOS:

O caso mais comum é 1 saída e 2 entradas. Para qualquer substância A:

$$v_A = (C_{A,out} \times (F_{L,in1} + F_{L,in2})) - (C_{A,in2} \times F_{L,in2})$$

$v_A > 0 \rightarrow$ A está sendo produzida

$v_A < 0 \rightarrow$ A está sendo consumida

$v_A = 0 \rightarrow$ A é inerte

PERGUNTA SURPRESA

Suponha que no seu quimiostato:

- a vazão volumétrica de controle de pH seja 5% da de entrada de meio de cultura;
- O meio de cultura alimentado tenha 20 g/L de fonte de C
- Na saída haja 15 g/L de fonte de C não-consumida

Se você desprezar o controle de pH, qual será o erro relativo que você introduzirá no seu cálculo do fator de conversão de fonte de carbono a biomassa?

Dica:
$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{referência}}{\text{referência}} = 1 - \frac{\text{errado}}{\text{referência}}$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\hat{e}ncia}}{\text{refer\hat{e}ncia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\hat{e}ncia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{Y'_{X/S} - 1}{Y_{X/S}} = \frac{\frac{V'_X}{V'_S} - 1}{\frac{V_X}{V_S}} = \frac{V'_X}{V'_S} \cdot \frac{V_S}{V_X} - 1$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\^encia}}{\text{refer\^encia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\^encia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{Y'_{X/S} - 1}{Y_{X/S}} = \frac{\frac{v'_X}{v'_S} - 1}{\frac{v_X}{v_S}} = \frac{v'_X \cdot v_S}{v'_S \cdot v_X} - 1$$

$$\epsilon = \frac{C_{X,\text{out}} \times F_{L,\text{in}2} - C_{X,\text{in}2} \times F_{L,\text{in}2}}{C_{S,\text{out}} \times F_{L,\text{in}2} - C_{S,\text{in}2} \times F_{L,\text{in}2}} \times \frac{C_{S,\text{out}} \times (F_{L,\text{in}1} + F_{L,\text{in}2}) - C_{S,\text{in}2} \times F_{L,\text{in}2}}{C_{X,\text{out}} \times (F_{L,\text{in}1} + F_{L,\text{in}2}) - C_{X,\text{in}2} \times F_{L,\text{in}2}} - 1$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\^encia}}{\text{refer\^encia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\^encia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{Y'_{X/S} - 1}{Y_{X/S}} = \frac{\frac{v'_X}{v'_S} - 1}{\frac{v_X}{v_S}} = \frac{v'_X \cdot v_S}{v'_S \cdot v_X} - 1$$

$$\epsilon = \frac{C_{X,\text{out}} \times F_{L,\text{in2}} - \overset{0}{\cancel{C_{X,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}}}}{C_{S,\text{out}} \times F_{L,\text{in2}} - C_{S,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}} \times \frac{C_{S,\text{out}} \times (F_{L,\text{in1}} + F_{L,\text{in2}}) - C_{S,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}}{C_{X,\text{out}} \times (F_{L,\text{in1}} + F_{L,\text{in2}}) - \underset{0}{\cancel{C_{X,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}}}} - 1$$

$1.05 \times F_{L,\text{in2}}$ (pointing to $F_{L,\text{in1}}$)
 $1.05 \times F_{L,\text{in2}}$ (pointing to $F_{L,\text{in2}}$)

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\hat{e}ncia}}{\text{refer\hat{e}ncia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\hat{e}ncia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{Y'_{X/S}}{Y_{X/S}} - 1 = \frac{\frac{v'_X}{v'_S}}{\frac{v_X}{v_S}} - 1 = \frac{v'_X \cdot v_S}{v'_S \cdot v_X} - 1$$

$$\epsilon = \frac{C_{X,\text{out}} \times F_{L,\text{in2}}}{C_{S,\text{out}} \times F_{L,\text{in2}} - C_{S,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}} \times \frac{C_{S,\text{out}} \times 1.05 \times F_{L,\text{in2}} - C_{S,\text{in2}} \times F_{L,\text{in2}}}{C_{X,\text{out}} \times 1.05 \times F_{L,\text{in2}}} - 1$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\^encia}}{\text{refer\^encia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\^encia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{Y'_{X/S}}{Y_{X/S}} - 1 = \frac{\frac{V'_X}{V'_S}}{\frac{V_X}{V_S}} - 1 = \frac{V'_X \cdot V_S}{V'_S \cdot V_X} - 1$$

$$\epsilon = \frac{\cancel{C_{X,out}} \times \cancel{F_{L,in2}}}{C_{S,out} \times \cancel{F_{L,in2}} - C_{S,in2} \times \cancel{F_{L,in2}}} \times \frac{C_{S,out} \times 1.05 \times \cancel{F_{L,in2}} - C_{S,in2} \times \cancel{F_{L,in2}}}{\cancel{C_{X,out}} \times 1.05 \times \cancel{F_{L,in2}}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{1}{C_{S,out} - C_{S,in2}} \times \frac{C_{S,out} \times 1.05 - C_{S,in2}}{1.05} - 1$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\^encia}}{\text{refer\^encia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\^encia}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{1}{1.05} \times \frac{C_{S,\text{out}} \times 1.05 - C_{S,\text{in2}}}{C_{S,\text{out}} - C_{S,\text{in2}}} - 1$$

PERGUNTA SURPRESA

$$\epsilon = \frac{\text{erro}}{\text{relativo}} = \frac{\text{errado} - \text{refer\^encia}}{\text{refer\^encia}} = \frac{\text{errado}}{\text{refer\^encia}} - 1$$

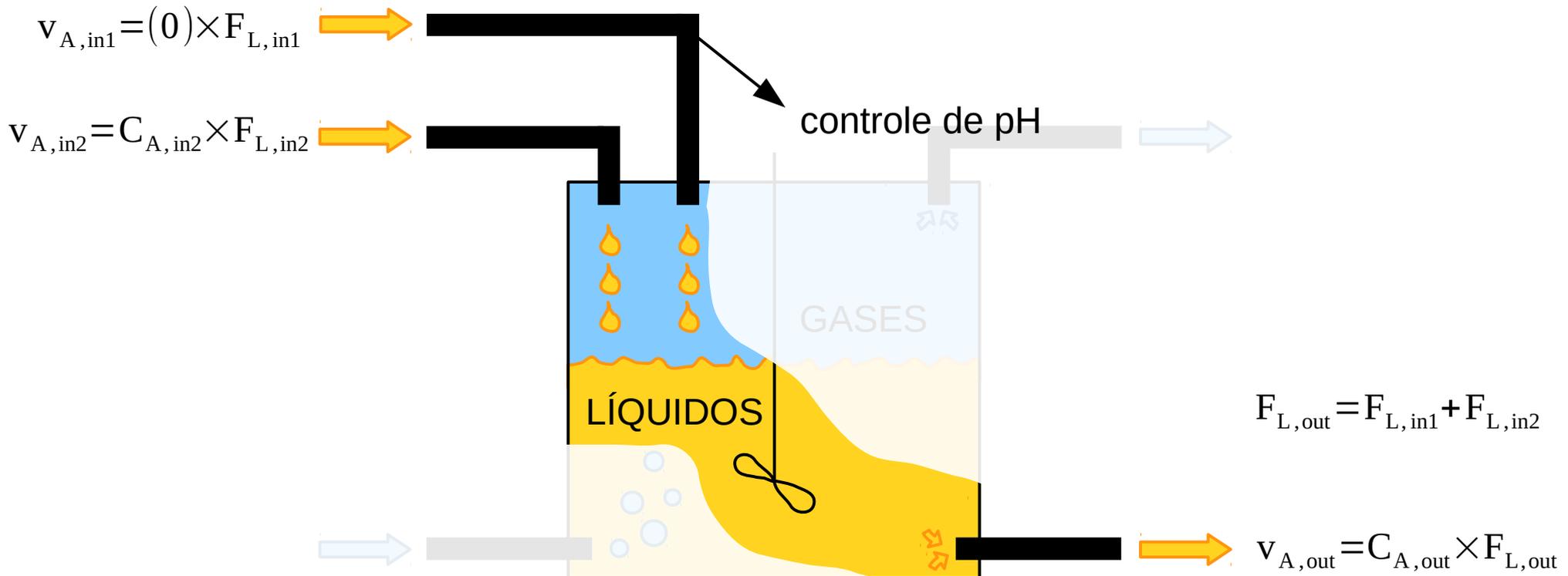
$$\epsilon = \frac{1}{1.05} \times \frac{C_{S,\text{out}} \times 1.05 - C_{S,\text{in}2}}{C_{S,\text{out}} - C_{S,\text{in}2}} - 1$$

$$\epsilon = \frac{1}{1.05} \times \frac{15 \times 1.05 - 20}{15 - 20} - 1 = \frac{1}{1.05} \times \frac{-4.25}{-5} - 1 = \frac{0.85}{1.05} - 1 \approx -19\%$$

Desprezar uma vaz\~ao que representa apenas 5% do total gera um erro de quase 20% em apenas 1 fator de convers\~ao!

Cálculos experimentais

Exercício 1: temos dados de um quimiostato com controle de pH, como esquematizado abaixo. Usando a planilha “quimiostato_cru”, preencha as colunas de vazão mássica de entrada e saída de **líquidos** na aba “quimiostato_tratado”. Dica: comece pelo controle de pH.

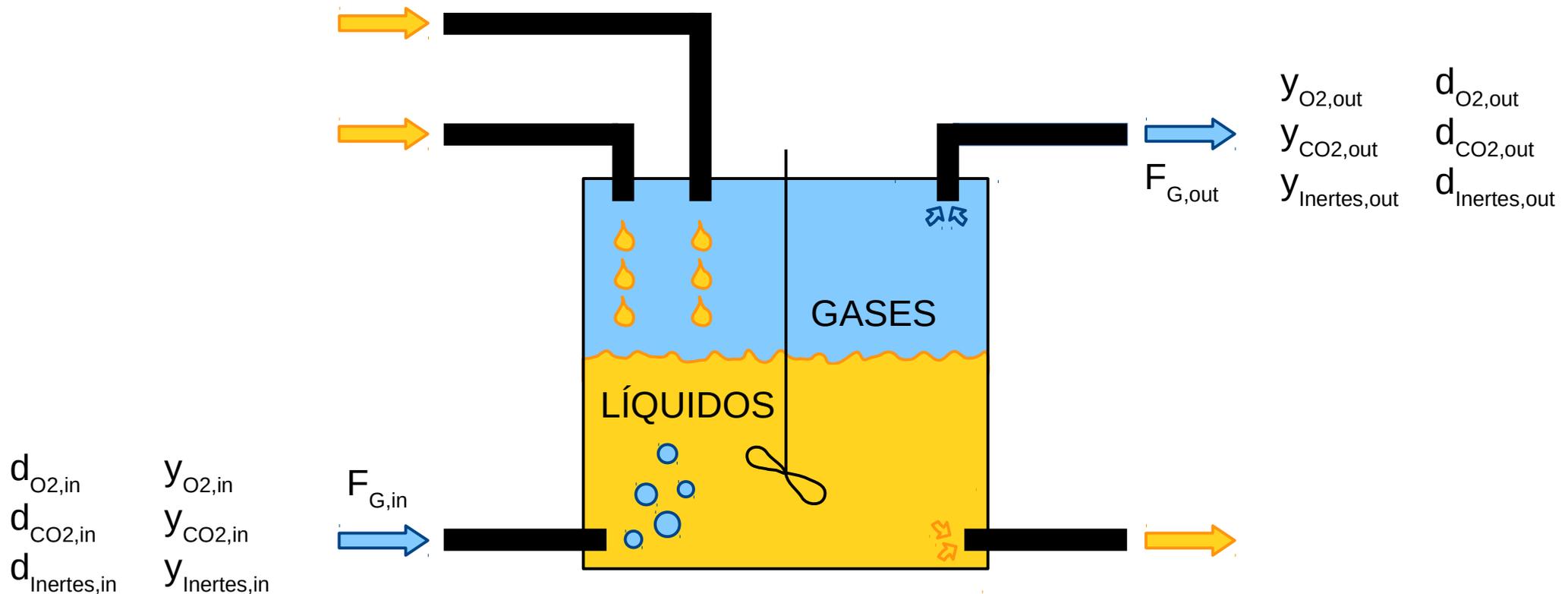


Cálculos experimentais

Agora vamos analisar os gases

Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os GASES:



Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os GASES:

$d_{A,in}$:

d é densidade (g/L)

A é uma substância

in é entrada (out é saída)

F_G :

F de "Flow" (L/h)

G de "Gasoso"

$y_{A,in}$:

y é fração volumétrica (L/L)

A é uma substância

in é entrada (out é saída)

$d_{O_2,in}$

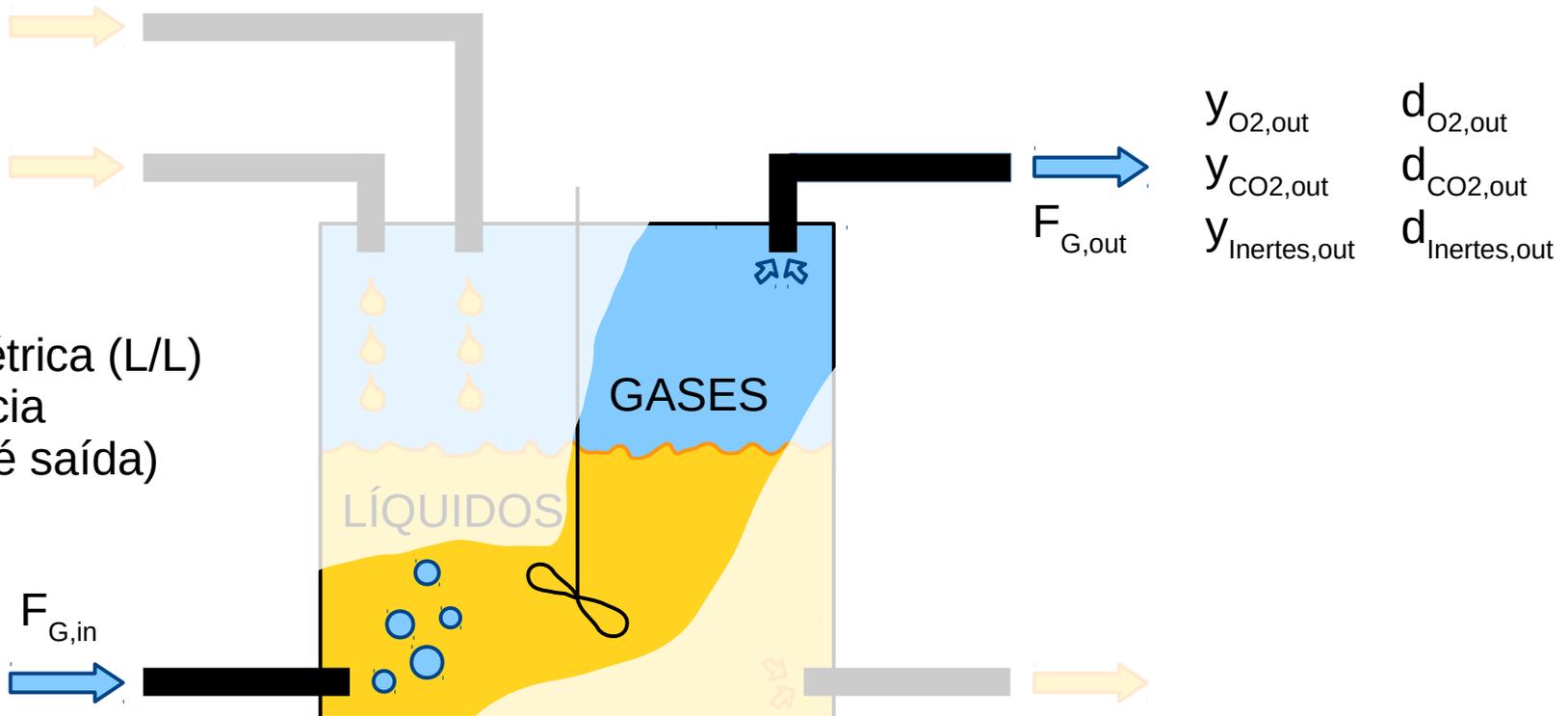
$y_{O_2,in}$

$d_{CO_2,in}$

$y_{CO_2,in}$

$d_{Inertes,in}$

$y_{Inertes,in}$



Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

$d_{A,in}$:

d é densidade (g/L)
 A é uma substância
 in é entrada (out é saída)

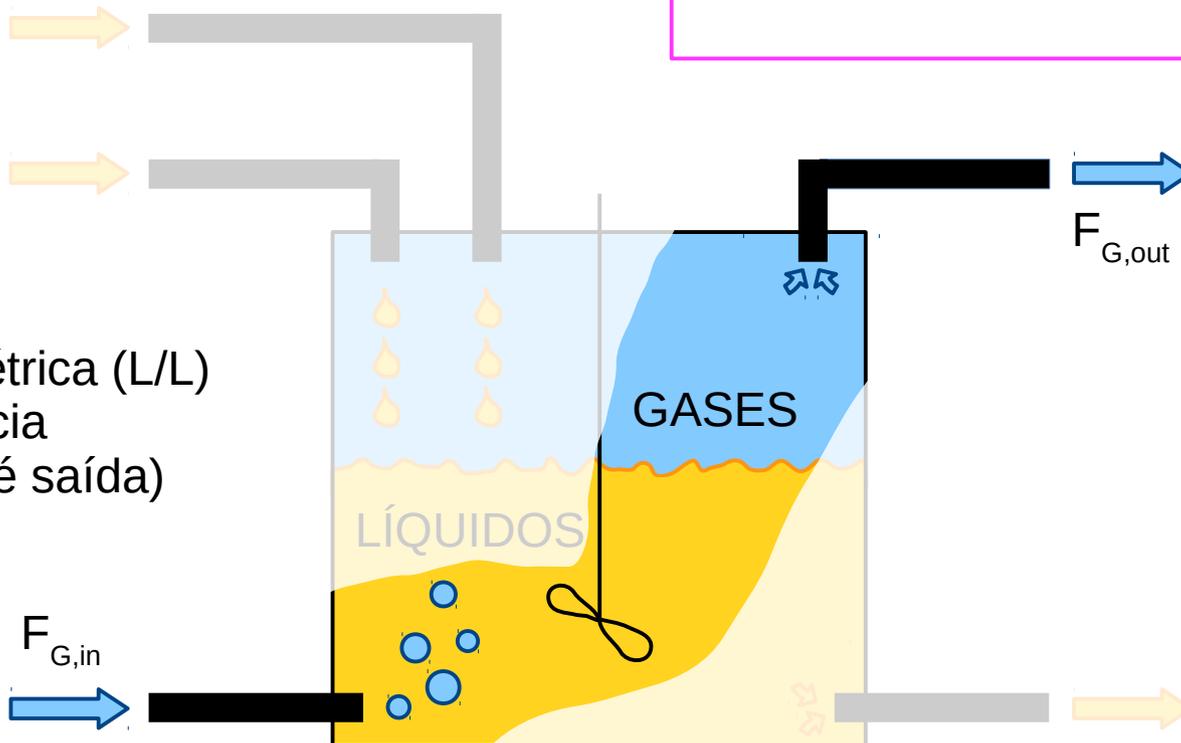
F_G :

F de "Flow" (L/h)
 G de "Gasoso"

$y_{A,in}$:

y é fração volumétrica (L/L)
 A é uma substância
 in é entrada (out é saída)

$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$



Vazão mássica de um gás A:

$$v_A = F_G \times y_A \times d_A$$

$y_{O_2,out}$	$d_{O_2,out}$
$y_{CO_2,out}$	$d_{CO_2,out}$
$y_{Inertes,out}$	$d_{Inertes,out}$

Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

$d_{A,in}$:

d é densidade (g/L)
 A é uma substância
 in é entrada (out é saída)

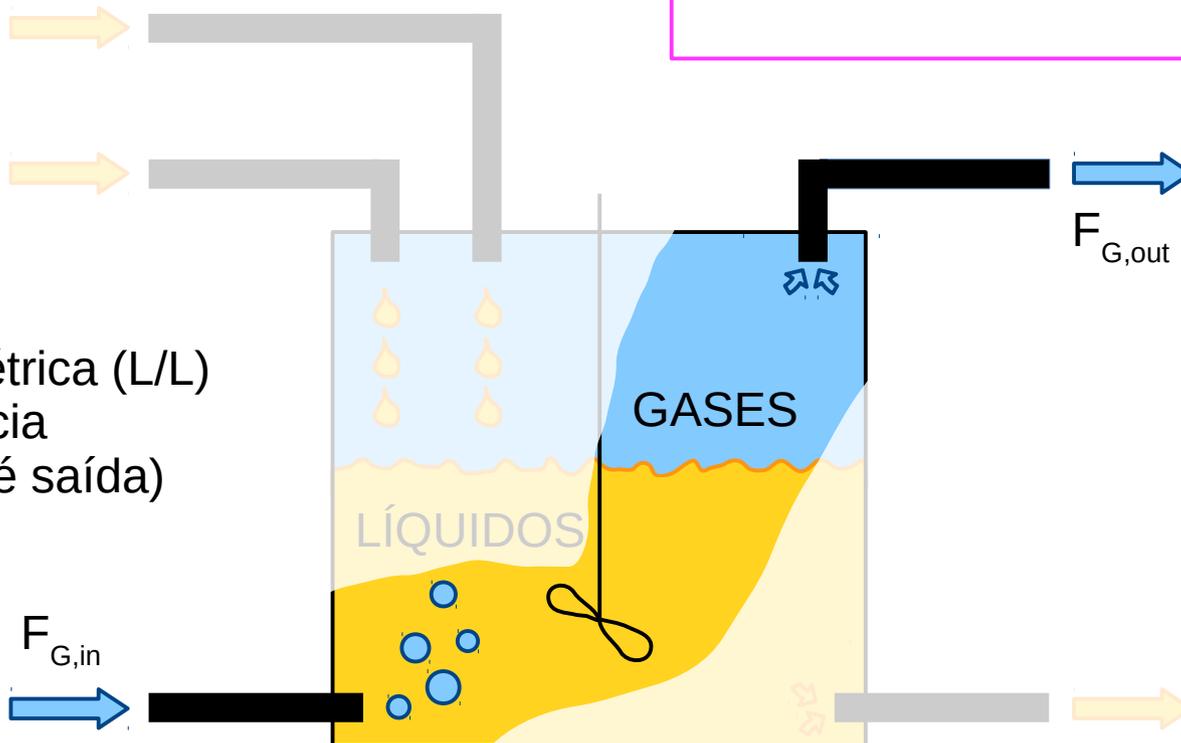
F_G :

F de "Flow" (L/h)
 G de "Gasoso"

$y_{A,in}$:

y é fração volumétrica (L/L)
 A é uma substância
 in é entrada (out é saída)

$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$



Vazão mássica de um gás A:

$$v_A = F_G \times y_A \times d_A$$

C_A (g/L)
 Vazão volumétrica de A (L/h)

$y_{O_2,out}$	$d_{O_2,out}$
$y_{CO_2,out}$	$d_{CO_2,out}$
$y_{Inertes,out}$	$d_{Inertes,out}$

Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

$d_{A,in}$:  depende fortemente da temperatura

d é densidade (g/L)
A é uma substância
in é entrada (out é saída)

Vazão mássica de um gás A:

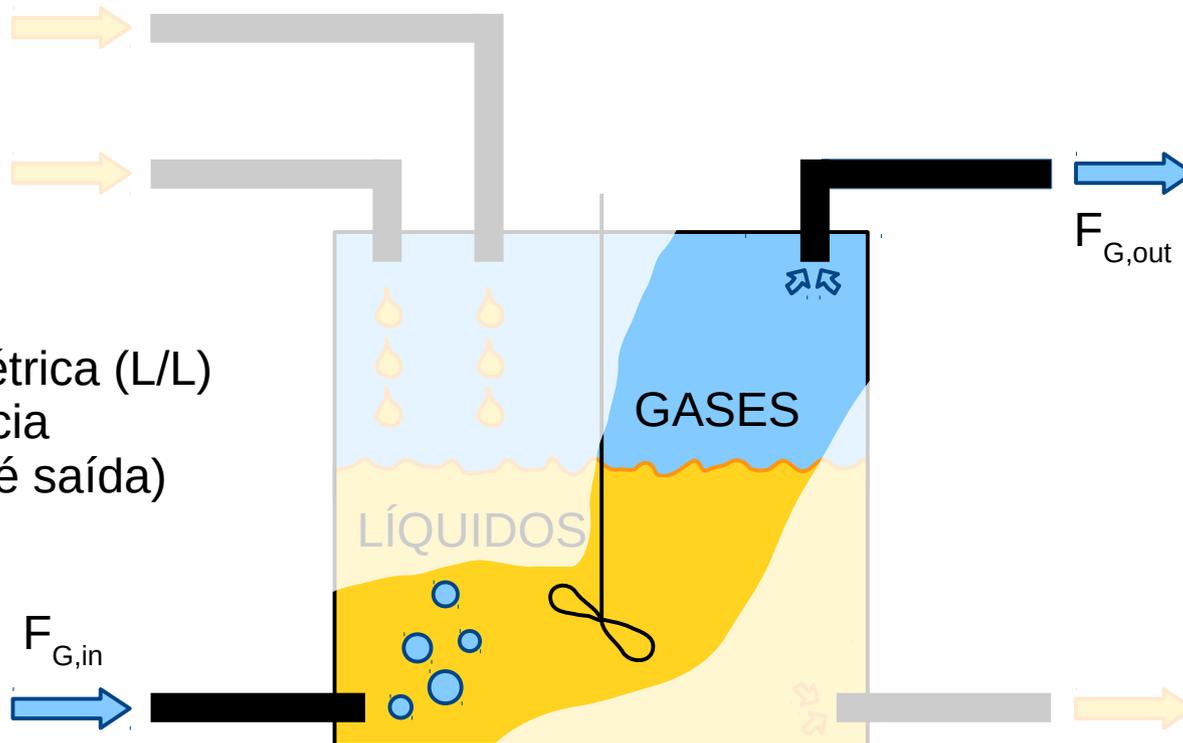
$$v_A = F_G \times y_A \times d_A$$

Vazão volumétrica de A (L/h)

F_G :
F de "Flow" (L/h)
G de "Gasoso"

$y_{A,in}$:
y é fração volumétrica (L/L)
A é uma substância
in é entrada (out é saída)

$d_{O_2,in}$ $y_{O_2,in}$
 $d_{CO_2,in}$ $y_{CO_2,in}$
 $d_{Inertes,in}$ $y_{Inertes,in}$



$y_{O_2,out}$ $d_{O_2,out}$
 $y_{CO_2,out}$ $d_{CO_2,out}$
 $y_{Inertes,out}$ $d_{Inertes,out}$

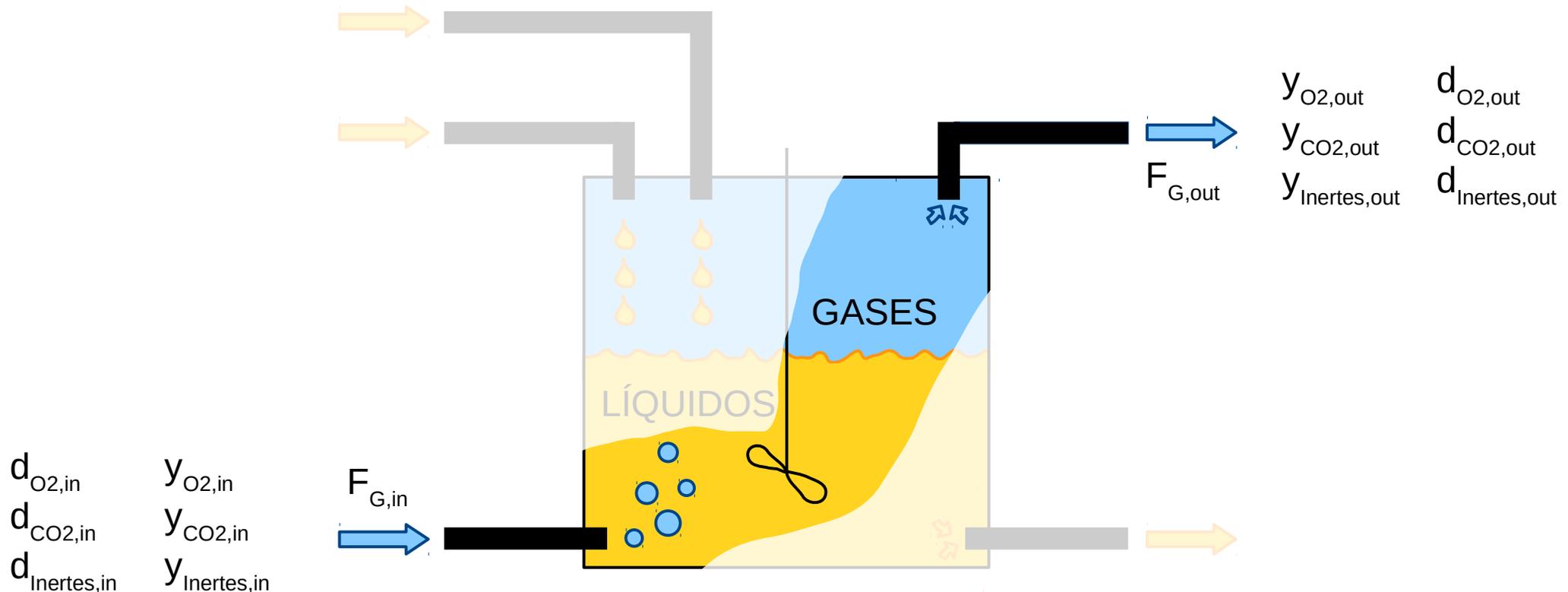
Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$



Cálculos experimentais

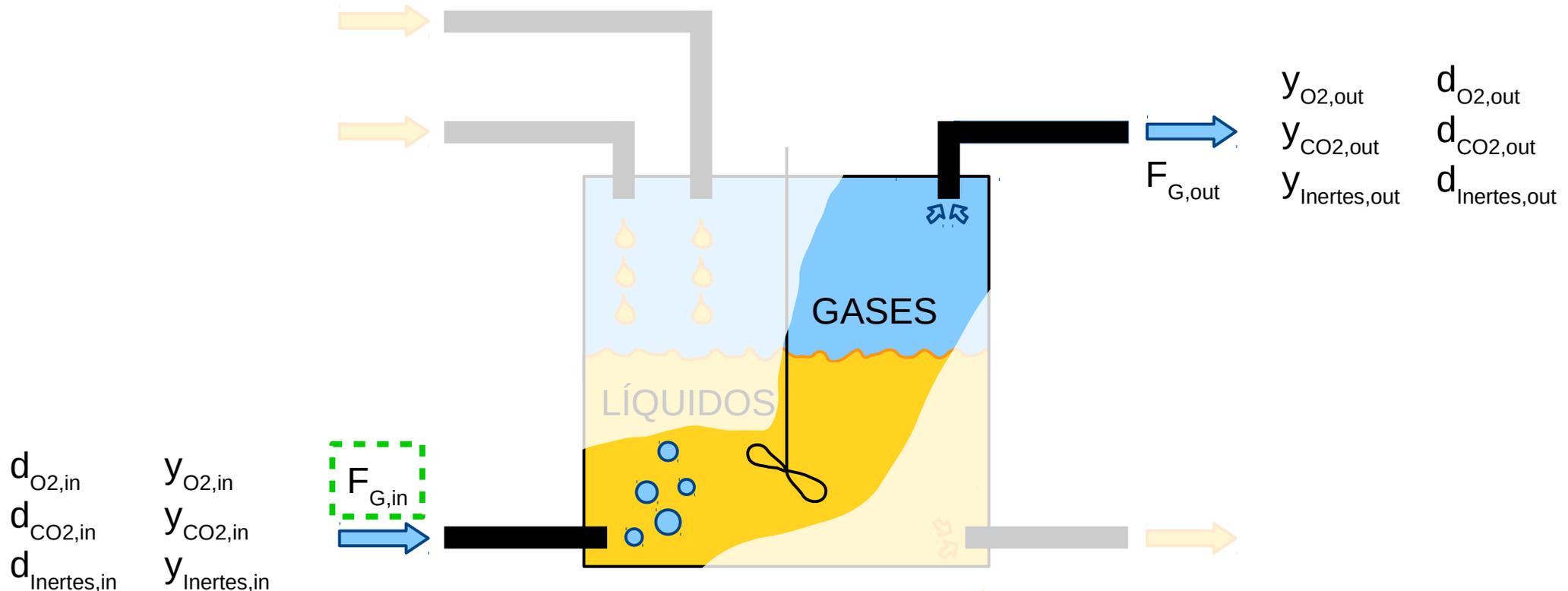
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$F_{G,in}$ é dado pois é uma variável manipulada (o gás que estamos alimentando ao biorreator)



Cálculos experimentais

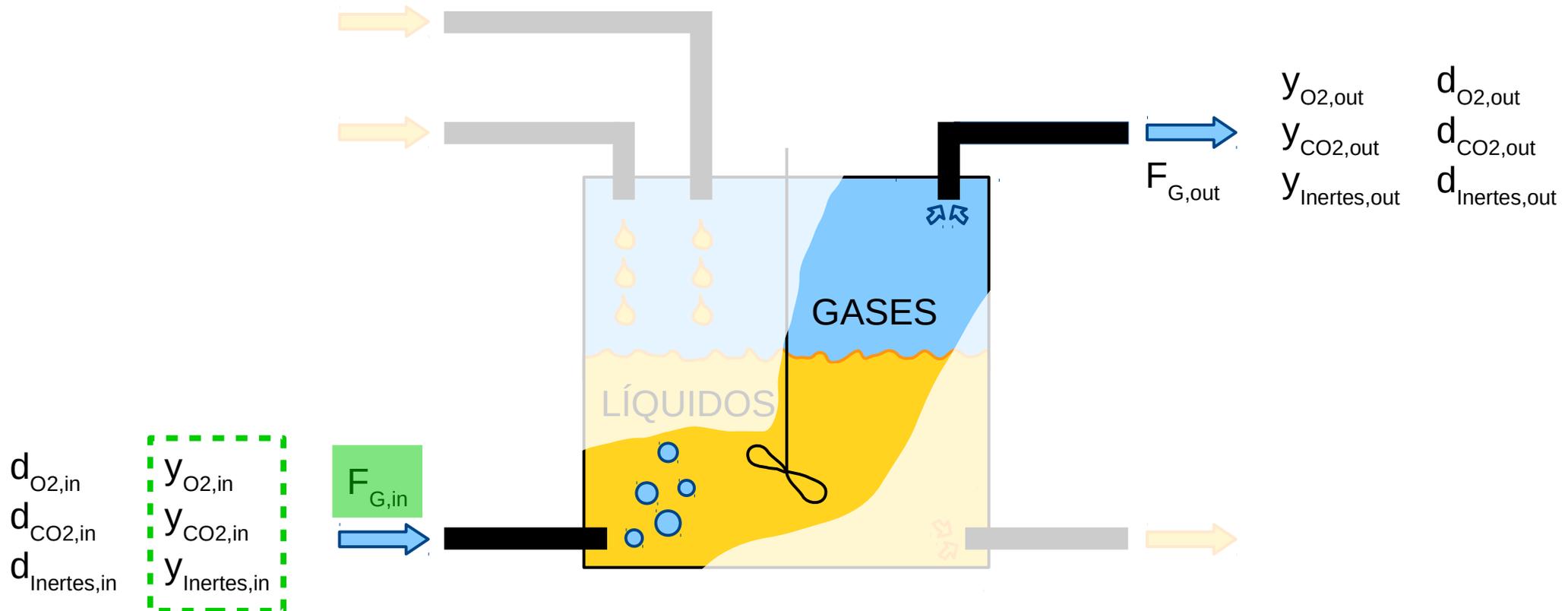
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$y_{A,in}$ é dada pois é uma variável manipulada (a composição do gás que estamos alimentando ao biorreator)



Cálculos experimentais

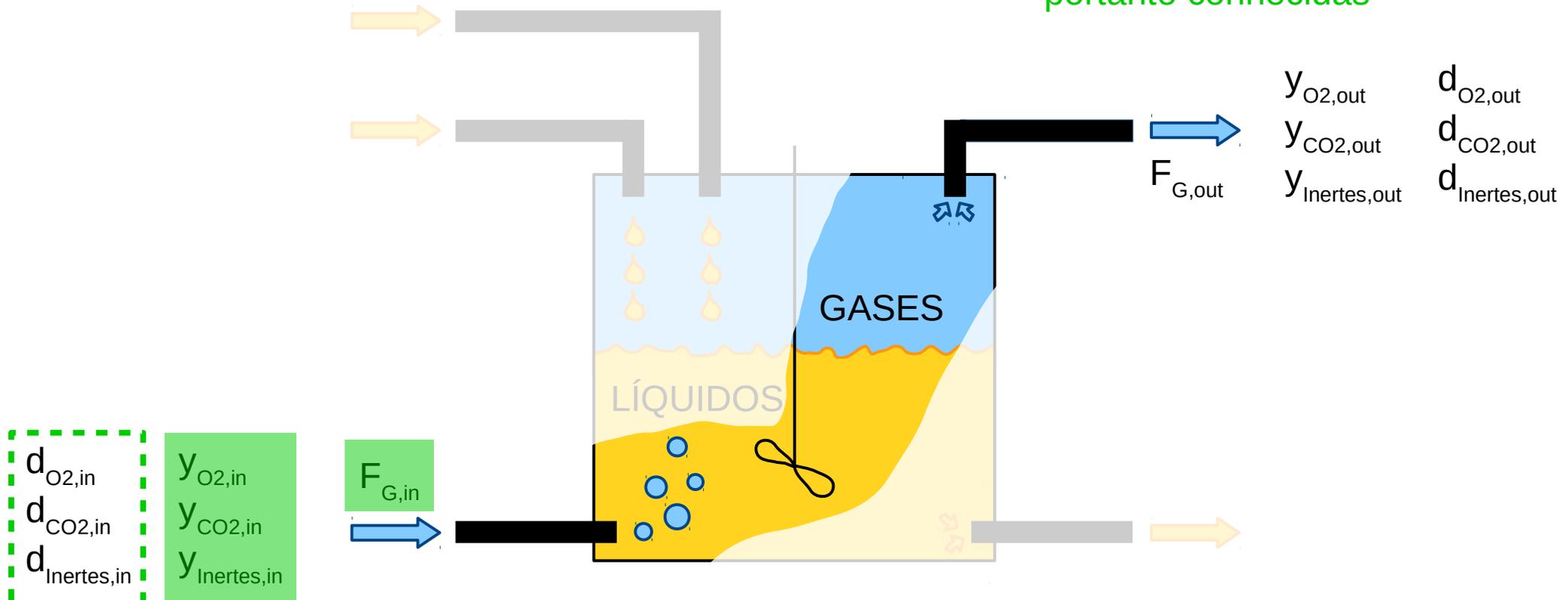
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$d_{A,in}$ é dada ou calculada em função da temperatura e pressão do gás de entrada, variáveis manipuladas e portanto conhecidas



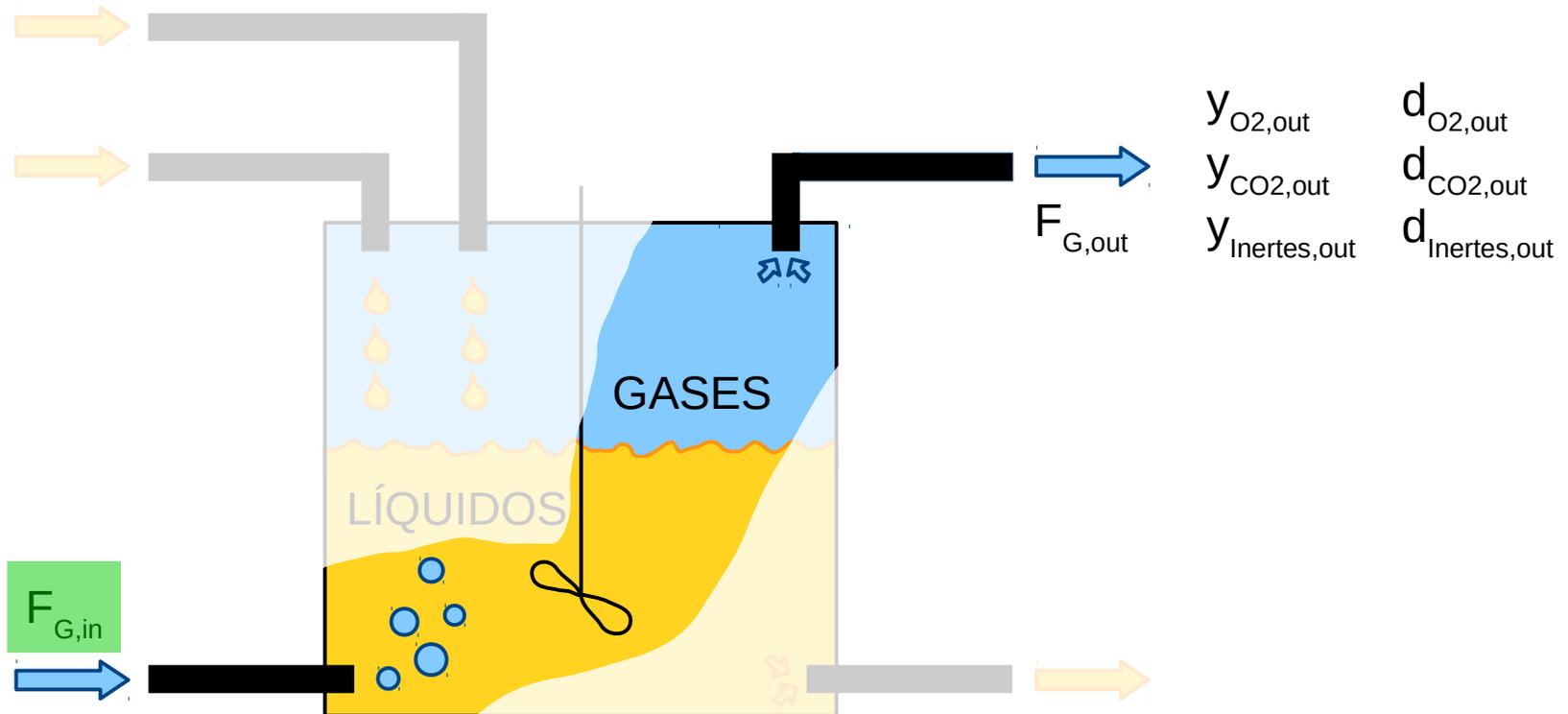
Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$ $v_{A,in}$ é então calculada

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$



Cálculos experimentais

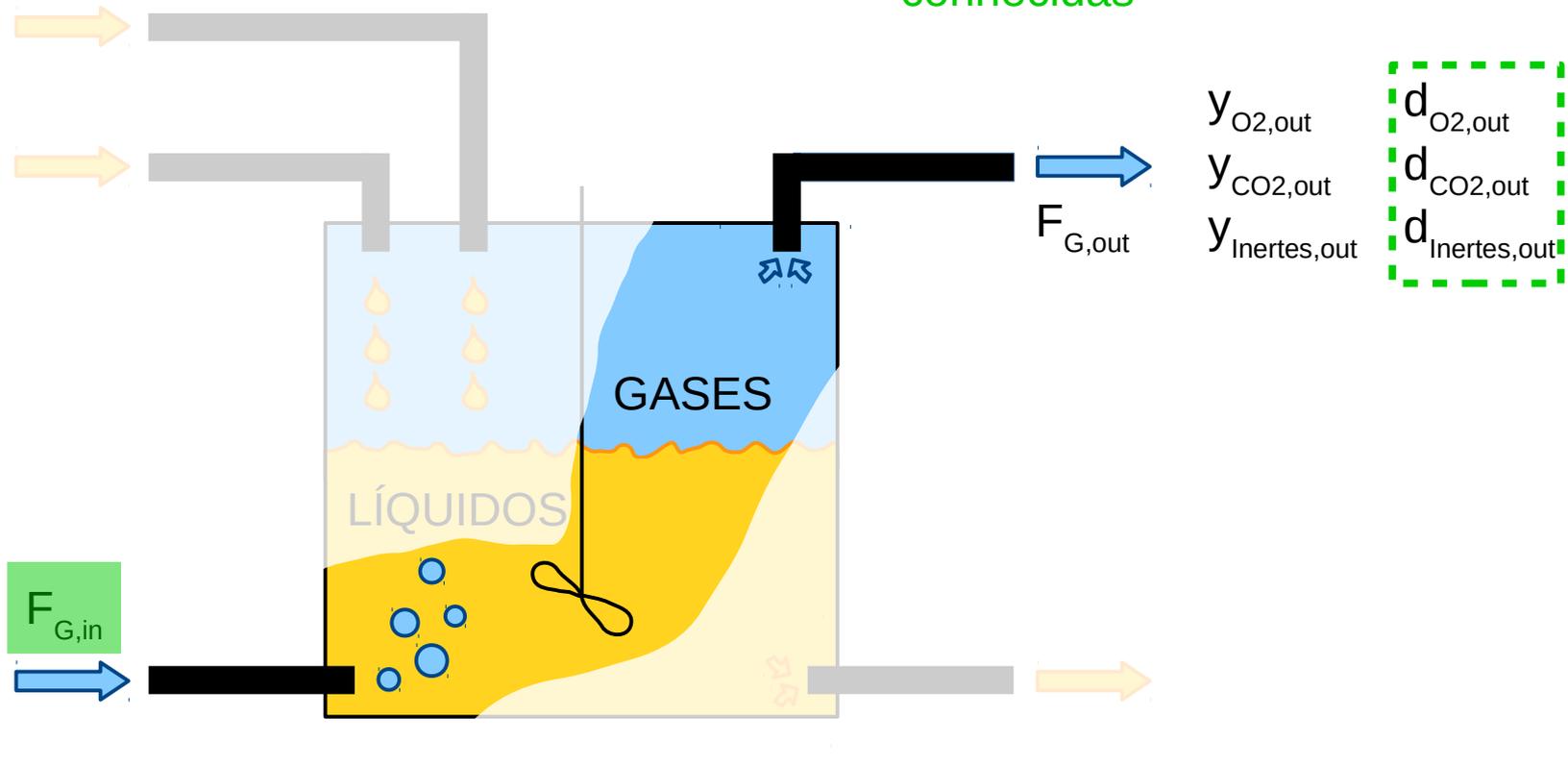
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $V_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $V_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$d_{A,out}$ é dada ou calculada em função da temperatura e pressão do gás de saída, variáveis medidas e portanto conhecidas



Cálculos experimentais

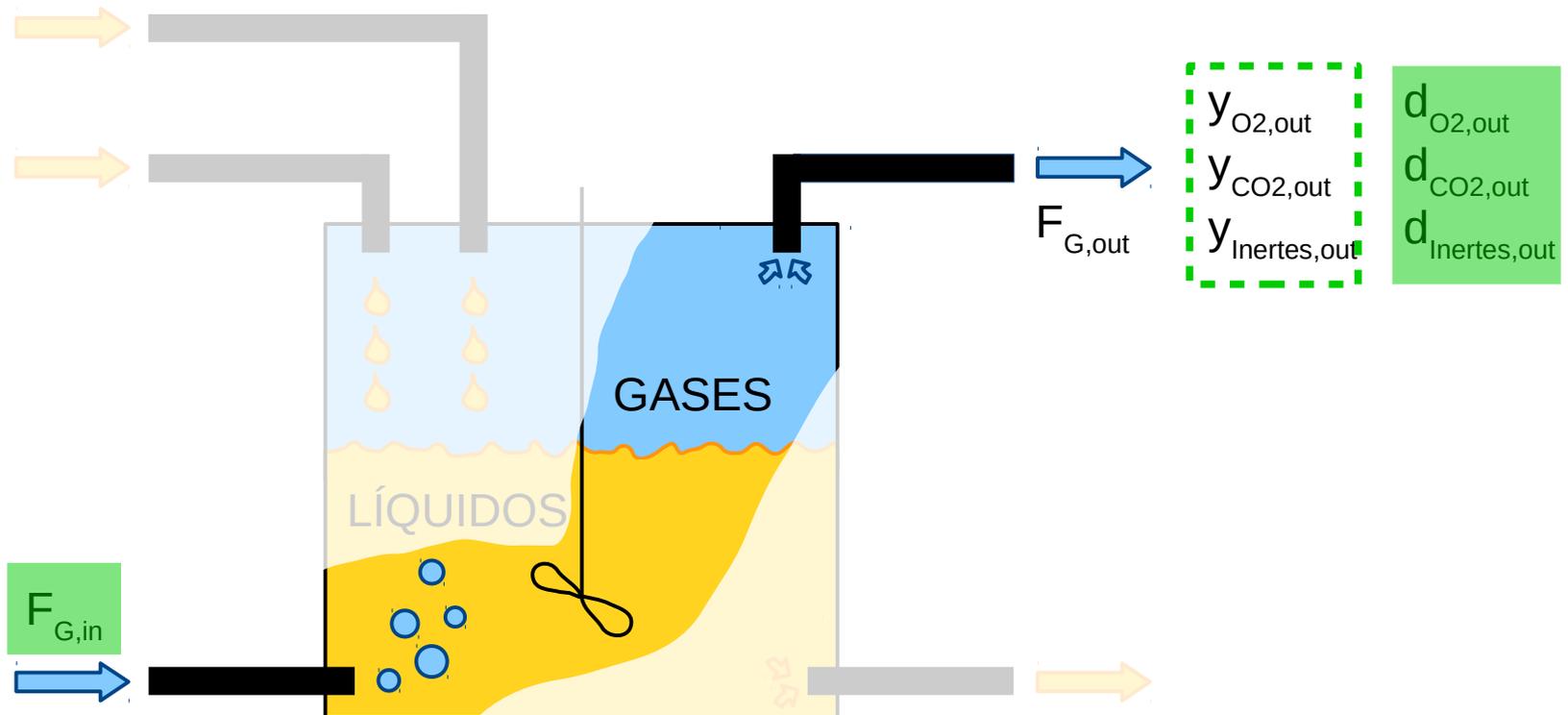
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $V_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $V_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$y_{A,out}$ é medida por equipamentos como analisadores de gás



$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$

Cálculos experimentais

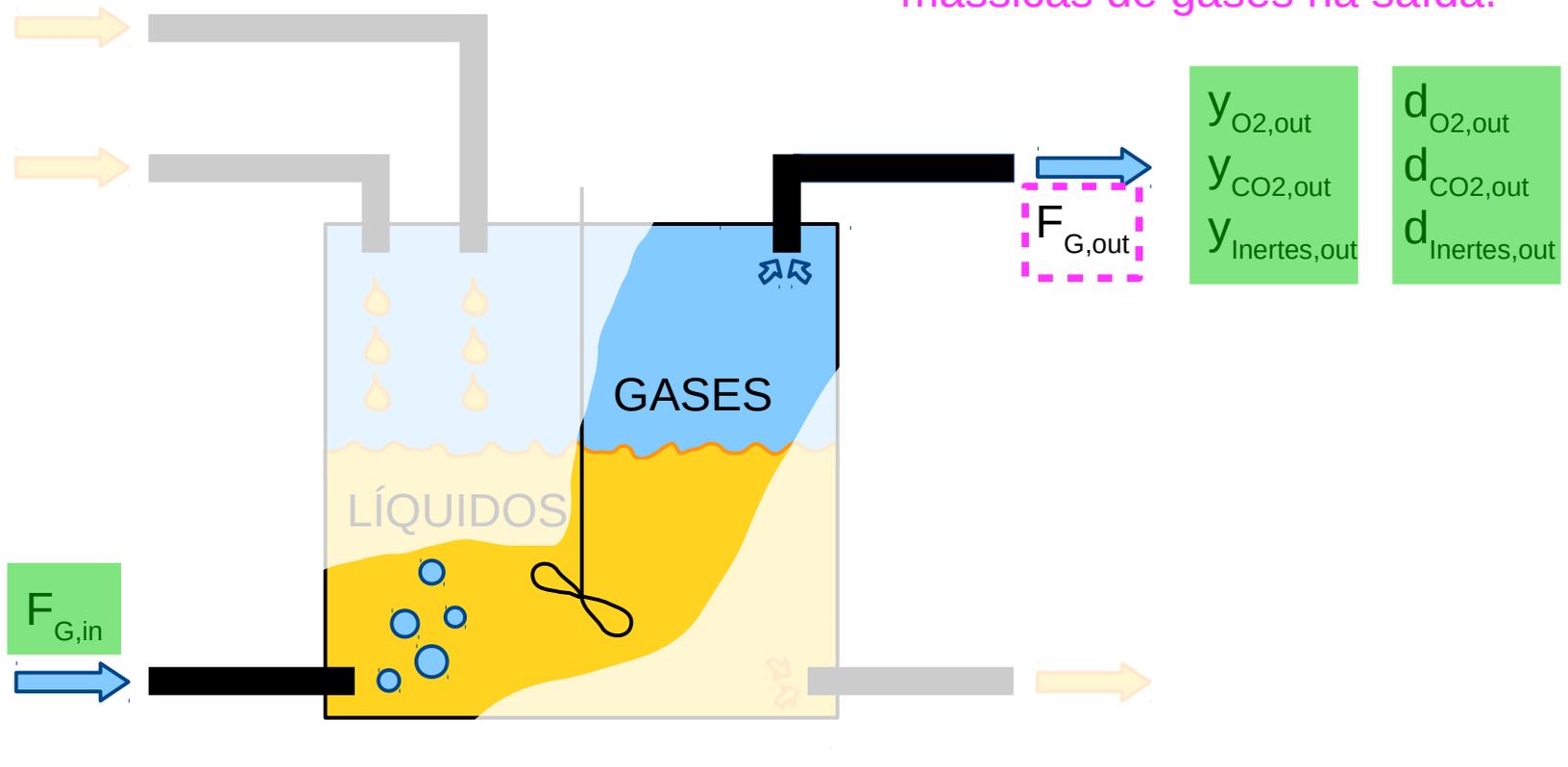
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $V_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $V_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$F_{G,out}$ é calculada a partir do balanço de gases inertes. Este cálculo é o **primeiro passo** para calcular as vazões mássicas de gases na saída.



Cálculos experimentais

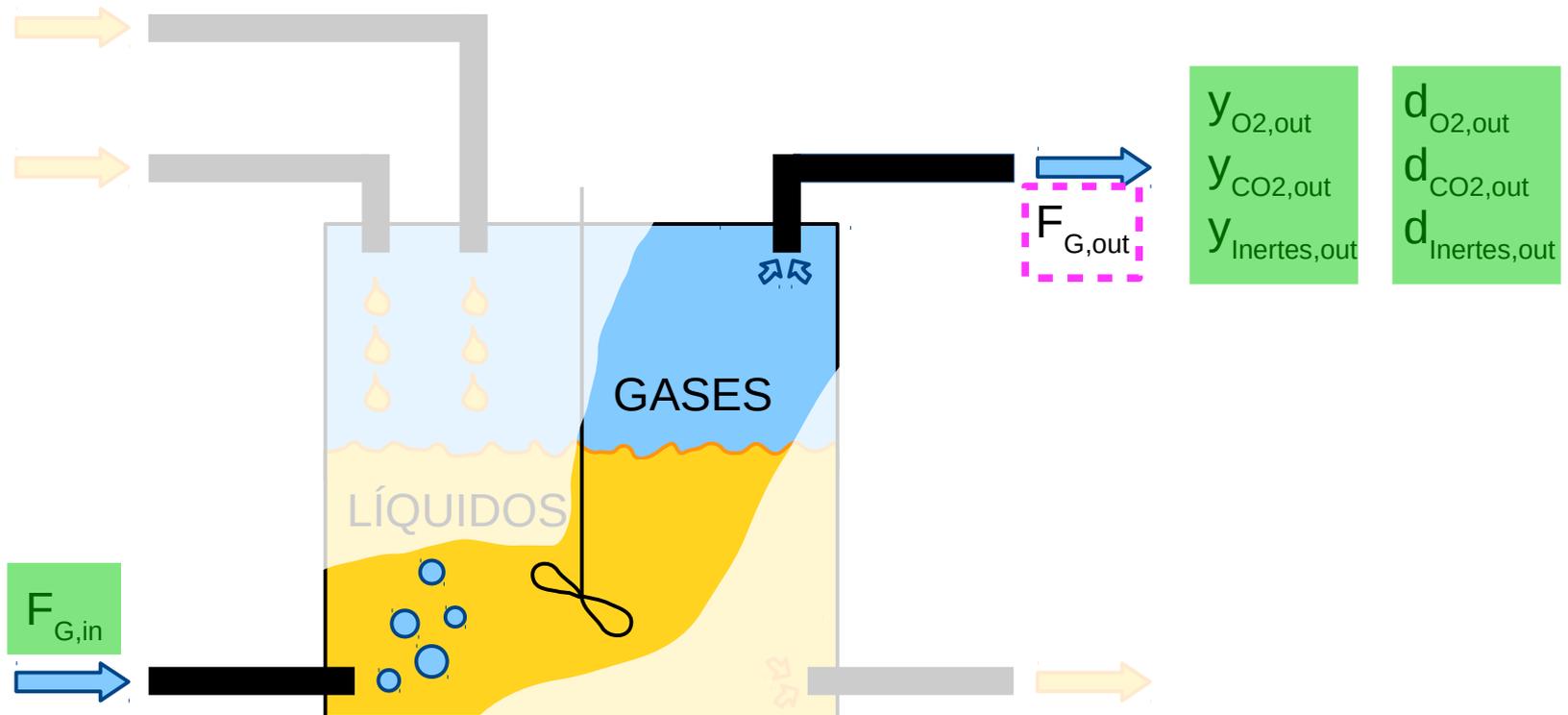
Vamos completar a tabela com os GASES:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $V_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $V_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

Como calcular $F_{G,out}$?



Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

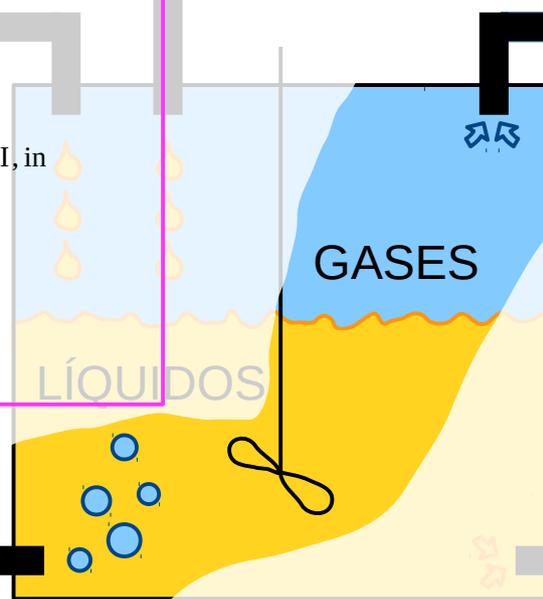
Como calcular $F_{G,out}$?

1) Gases inertes por definição não são consumidos nem produzidos:

$$v_I = 0 \rightarrow v_{I,in} = v_{I,out}$$

$$F_{G,out} \times y_{I,out} \times d_{I,out} = F_{G,in} \times y_{I,in} \times d_{I,in}$$

$$F_{G,out} = \frac{F_{G,in} \times y_{I,in} \times d_{I,in}}{y_{I,out} \times d_{I,out}}$$



$y_{O_2,out}$	$d_{O_2,out}$
$y_{CO_2,out}$	$d_{CO_2,out}$
$y_{Inertes,out}$	$d_{Inertes,out}$

$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$

$F_{G,in}$

Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os GASES:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

Como calcular $F_{G,out}$?

1) Gases inertes por definição não são consumidos nem produzidos:

$$F_{G,out} = \frac{F_{G,in} \times y_{I,in} \times d_{I,in}}{y_{I,out} \times d_{I,out}}$$

2) Soma de todas as frações é 1:

$$y_{I,in} + y_{O_2,in} + y_{CO_2,in} = 1$$

$$y_{I,out} + y_{O_2,out} + y_{CO_2,out} = 1$$

$y_{O_2,out}$	$d_{O_2,out}$
$y_{CO_2,out}$	$d_{CO_2,out}$
$y_{Inertes,out}$	$d_{Inertes,out}$

$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$



Cálculos experimentais

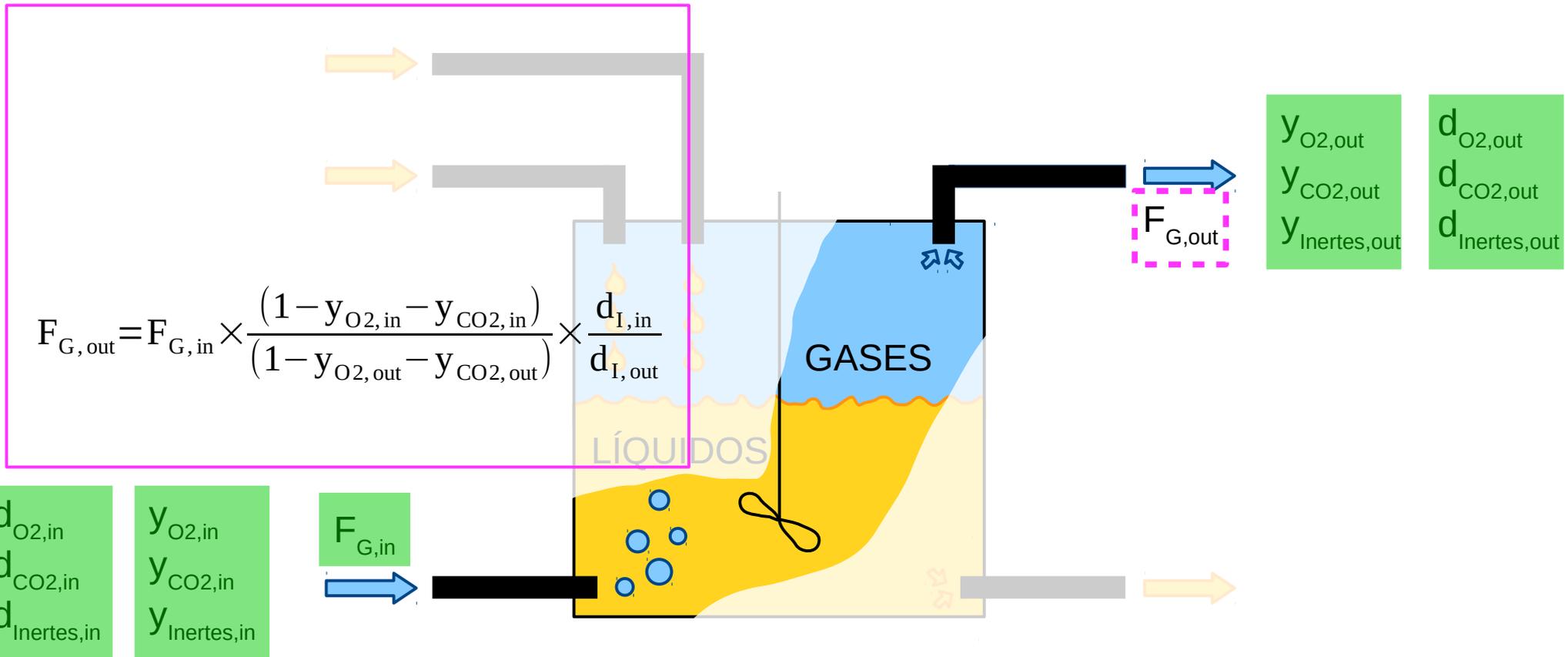
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

Como calcular $F_{G,out}$?



Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os GASES:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $v_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $v_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

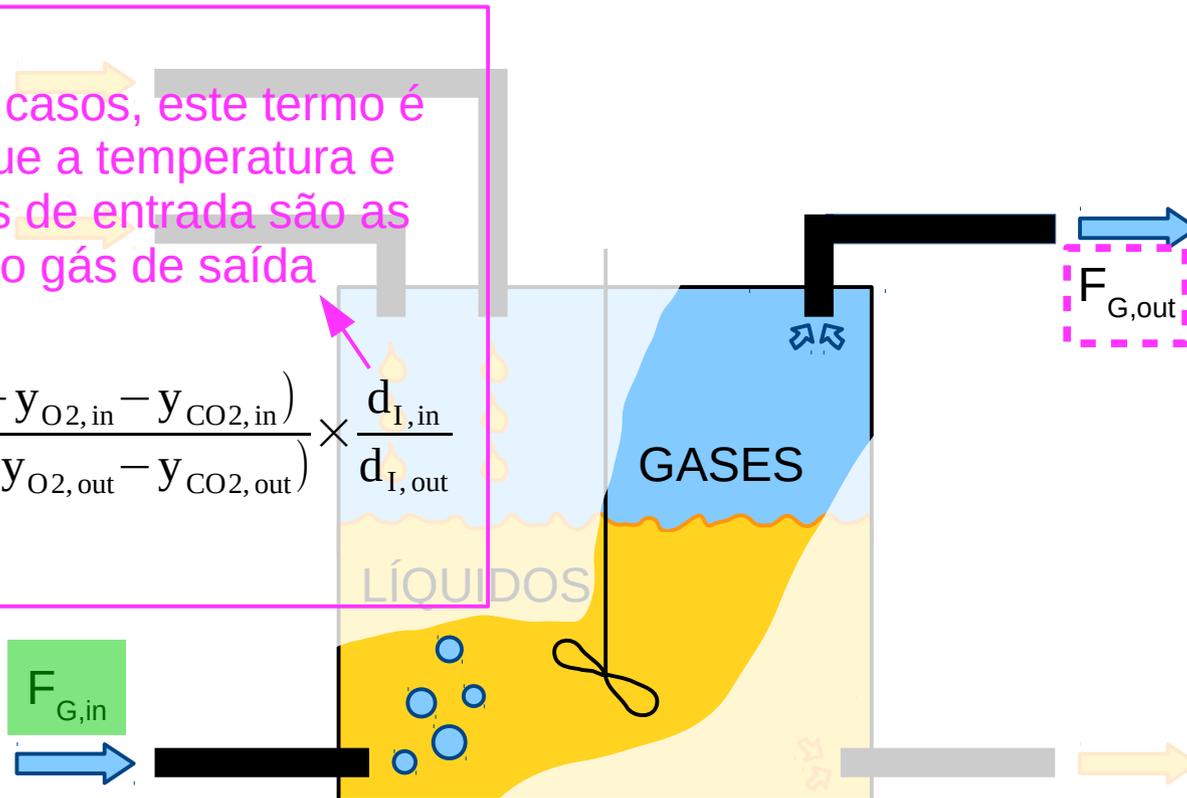
Como calcular $F_{G,out}$?

Na maioria dos casos, este termo é igual a 1 porque a temperatura e pressão do gás de entrada são as mesmas do gás de saída

$$F_{G,out} = F_{G,in} \times \frac{(1 - y_{O_2,in} - y_{CO_2,in})}{(1 - y_{O_2,out} - y_{CO_2,out})} \times \frac{d_{I,in}}{d_{I,out}}$$

$y_{O_2,out}$	$d_{O_2,out}$
$y_{CO_2,out}$	$d_{CO_2,out}$
$y_{Inertes,out}$	$d_{Inertes,out}$

$d_{O_2,in}$	$y_{O_2,in}$
$d_{CO_2,in}$	$y_{CO_2,in}$
$d_{Inertes,in}$	$y_{Inertes,in}$



Cálculos experimentais

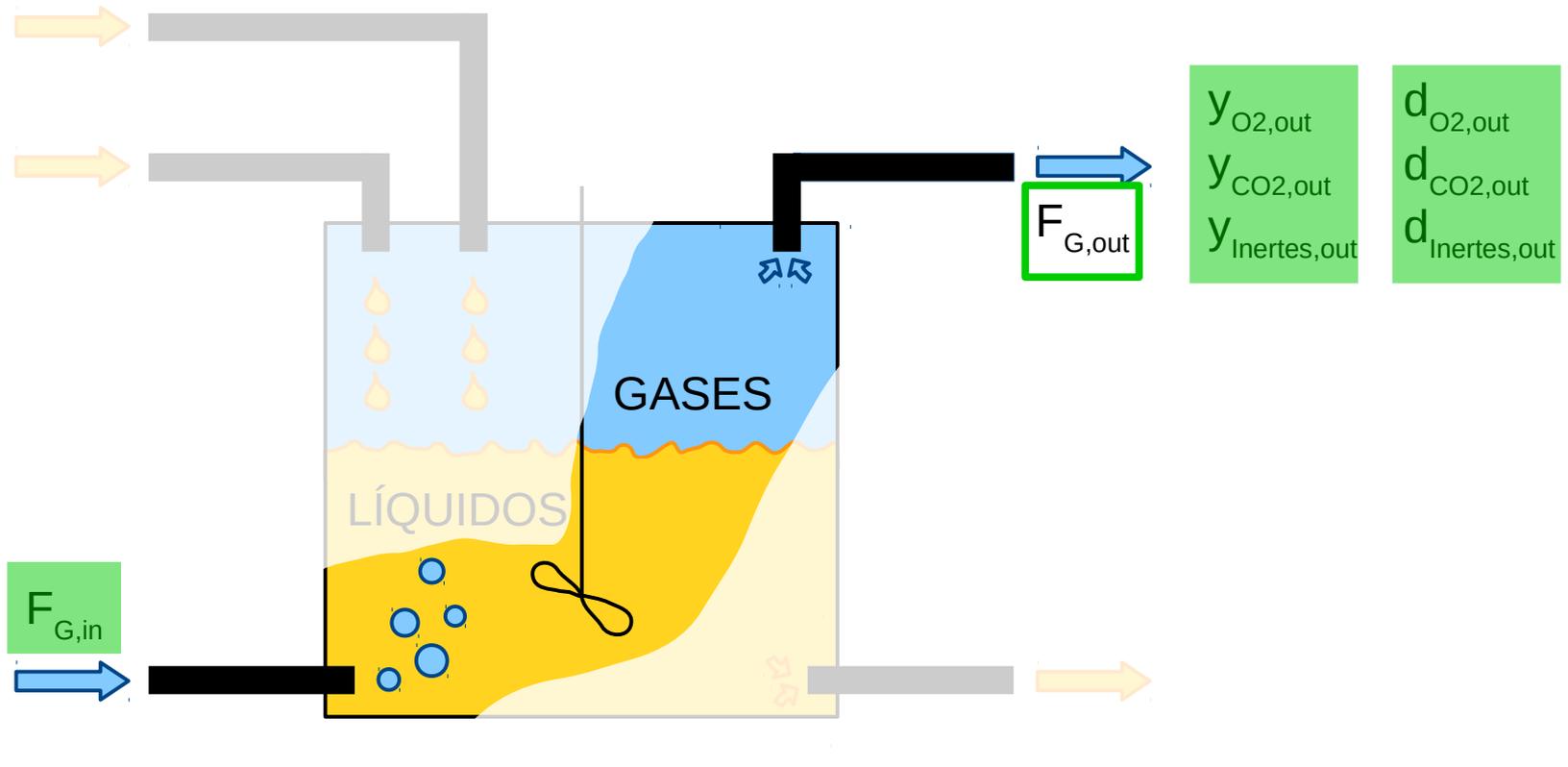
Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazão mássica de um gás A passando pelo biorreator:

Entrada: $V_{A,in} = F_{G,in} \times y_{A,in} \times d_{A,in}$

Saída: $V_{A,out} = F_{G,out} \times y_{A,out} \times d_{A,out}$

$$F_{G,out} = F_{G,in} \times \frac{(1 - y_{O_2,in} - y_{CO_2,in})}{(1 - y_{O_2,out} - y_{CO_2,out})} \times \frac{d_{I,in}}{d_{I,out}}$$



Cálculos experimentais

Vamos completar a tabela com os **GASES**:

Vazões mássicas de O_2 e CO_2 passando pelo biorreator:

1) calcular $v_{O_2,in}$ e $v_{CO_2,in}$:

$$\begin{aligned}v_{O_2,in} &= F_{G,in} \times y_{O_2,in} \times d_{O_2,in} \\v_{CO_2,in} &= F_{G,in} \times y_{CO_2,in} \times d_{CO_2,in}\end{aligned}$$

2) calcular $F_{G,out}$:

$$F_{G,out} = F_{G,in} \times \frac{(1 - y_{O_2,in} - y_{CO_2,in})}{(1 - y_{O_2,out} - y_{CO_2,out})} \times \frac{d_{I,in}}{d_{I,out}}$$

3) calcular $v_{O_2,out}$ e $v_{CO_2,out}$:

$$\begin{aligned}v_{O_2,out} &= F_{G,out} \times y_{O_2,out} \times d_{O_2,out} \\v_{CO_2,out} &= F_{G,out} \times y_{CO_2,out} \times d_{CO_2,out}\end{aligned}$$

PERGUNTA SURPRESA

Imagine um bioprocesso contínuo de purificação de biogás onde uma comunidade de bactérias oxidantes de enxofre recebem uma mistura gasosa de CH_4 , CO_2 , H_2S e O_2 junto com um meio de cultura líquido complexo, ambos não-estéreis.

a) Quais gases são inertes?

b) Qual é o conjunto mínimo de variáveis que precisam ser medidas para possibilitar o cálculo do consumo de H_2S ?

c) Esse processo é contínuo. Mas é um quimiostato?

Cálculos experimentais

Exercício 2: Usando a planilha “quimiostato_cru”, preencha as colunas de vazão mássica de entrada e saída de **gases** na aba “quimiostato_tratado”.

$$V_{O_2, in} = F_{G, in} \times y_{O_2, in} \times d_{O_2, in}$$

$$V_{CO_2, in} = F_{G, in} \times y_{CO_2, in} \times d_{CO_2, in}$$

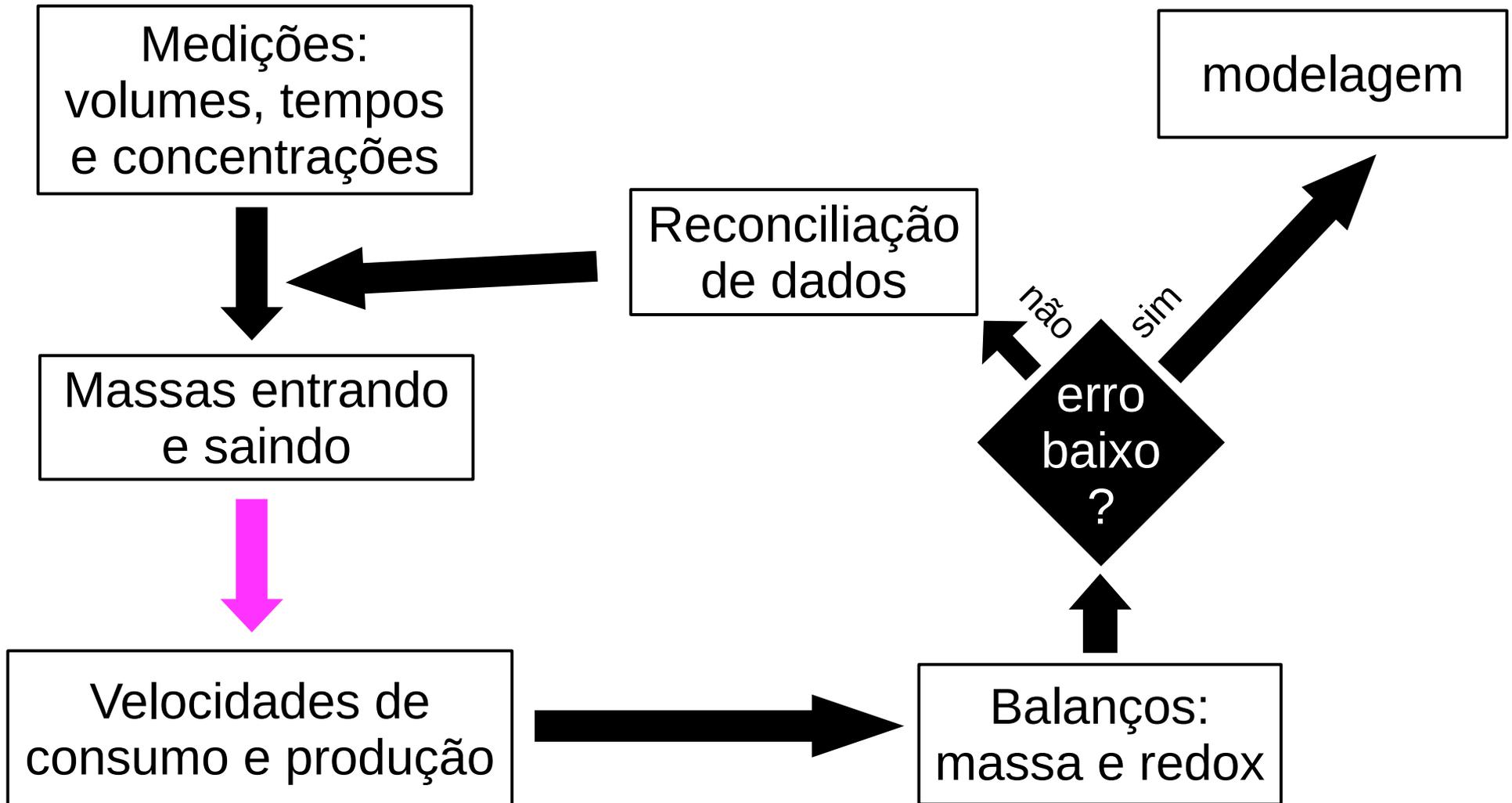
$$F_{G, out} = F_{G, in} \times \frac{(1 - y_{O_2, in} - y_{CO_2, in})}{(1 - y_{O_2, out} - y_{CO_2, out})} \times \frac{d_{I, in}}{d_{I, out}}$$

$$V_{O_2, out} = F_{G, out} \times y_{O_2, out} \times d_{O_2, out}$$

$$V_{CO_2, out} = F_{G, out} \times y_{CO_2, out} \times d_{CO_2, out}$$

Processo de tratamento de dados

Estamos na etapa **destacada**



Cálculos experimentais

Exercício 3: Agora que você tem todas as vazões mássicas de entrada e saída tanto para os líquidos quanto para os gases:

- a)** preencha as colunas de v_S , v_X , v_P , v_{O_2} e v_{CO_2} , adotando a convenção de que sinal negativo significa consumo e positivo significa formação;
- b)** plote em 1 único gráfico as velocidades do item a em função do tempo. Responda: o cultivo atingiu um estado estacionário? Se sim, entre quais instantes de tempo?