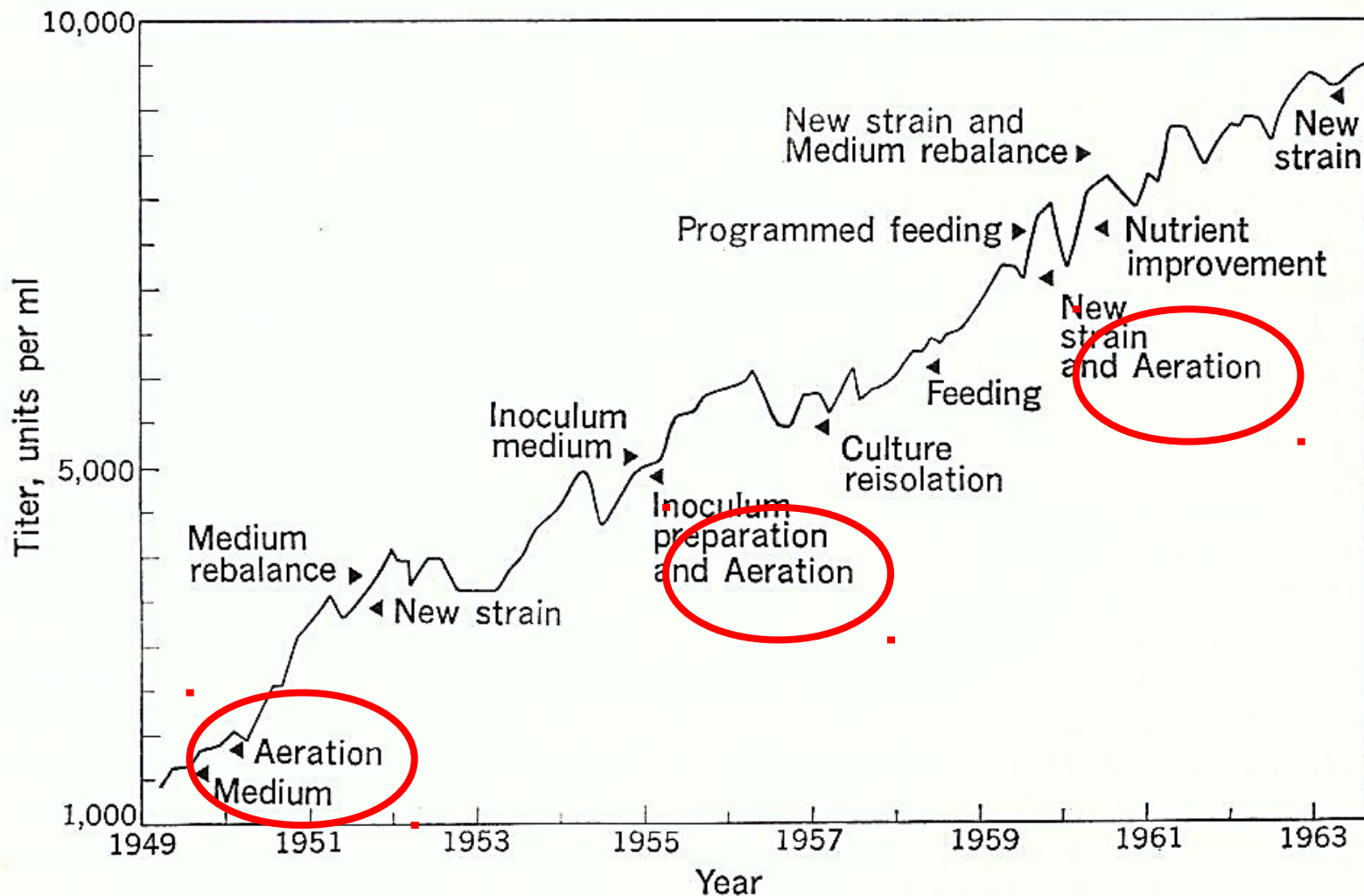




**Universidade Estadual de São Paulo**  
**Escola de Engenharia de Lorena**

---

# **Importância da Transferência de Oxigênio**



**Fig. 8.1.** Influence of fermentation development studies on a typical antibiotic. (Courtesy Bristol laboratories, Syracuse, N.Y., U.S.A.)

# Agitação e aeração

Operações que visam transferir oxigênio para um meio líquido continuamente, de forma a garantir o seu suprimento para células que realizam uma fermentação aeróbia (o que corresponde à maioria dos casos), ou seja:



Para todos os processos aeróbios é necessário o dimensionamento adequado do sistema de transferência de oxigênio.

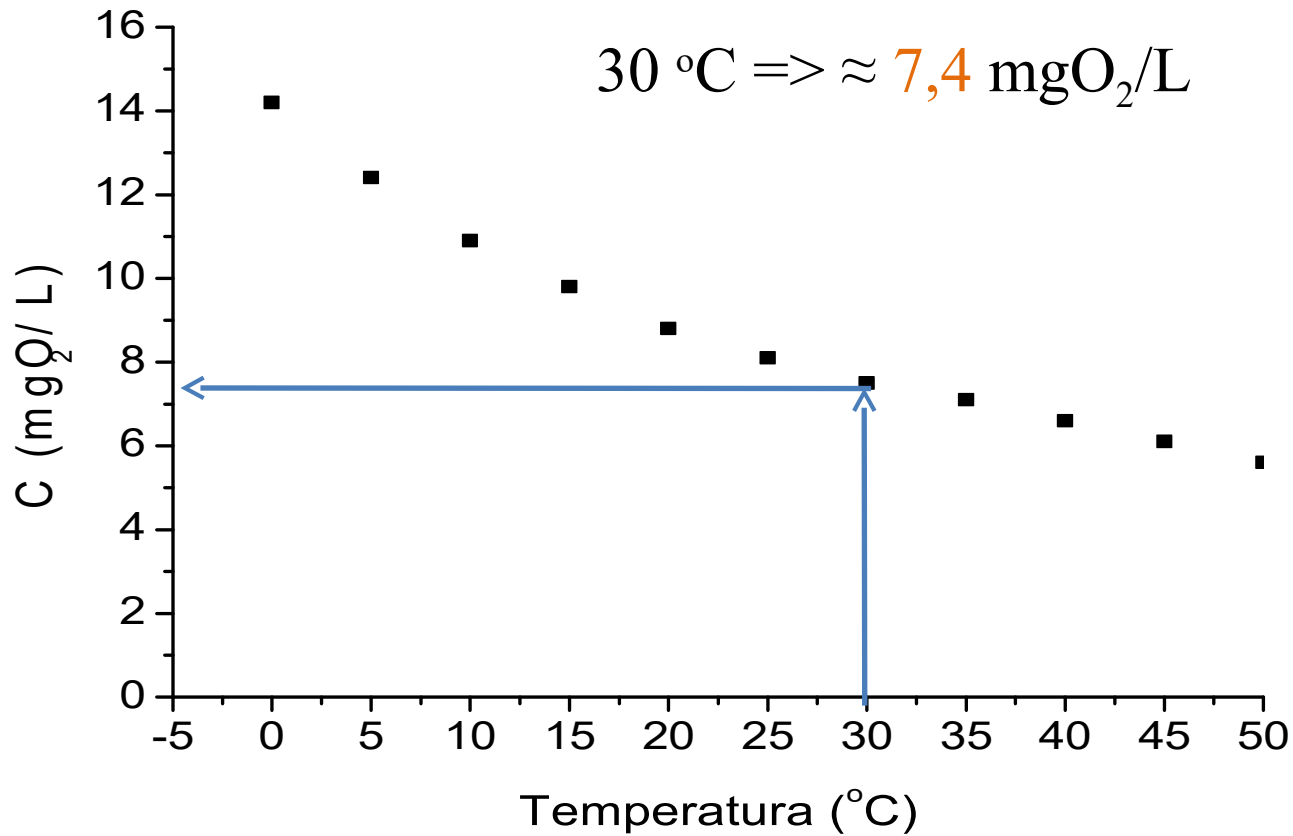
Fontes de carbono podem ser solubilizadas em concentrações da ordem de centenas de gramas por litro de solução e, os demais nutrientes, cerca de dezenas de gramas por litro

O oxigênio só pode ser solubilizado em quantidades da ordem de 0,007 grama por litro, nas temperaturas típicas de realização dos processos fermentativos

Considerando a reação de oxidação de 1 mol de glicose, qual seria a massa de oxigênio necessária para a oxidação completa de 120 g desta fonte de carbono?



$$m_{\text{O}_2} = 128 \text{ g}$$




**Solubilidade do oxigênio (concentração de *saturação*) em água em função da temperatura.**

**Tabela 14.1** – Valores da concentração de oxigênio dissolvido na saturação, em diferentes condições.

Temp (°C)	Conc, NaCl (M)	P. Parc. O <sub>2</sub> (atm)	Conc. O <sub>2</sub> na sat. (mg/L)	Cte. Henry (mg/L. atm)
25	—	0,209	8,10	38,8
35	—	0,209	6,99	33,4
25	—	1,0	40,3	
25	0,5	1,0	34,2	
25	1,0	1,0	28,5	
25	2,0	1,0	22,7	

## Algumas considerações: Visando aumentar a concentração de saturação:

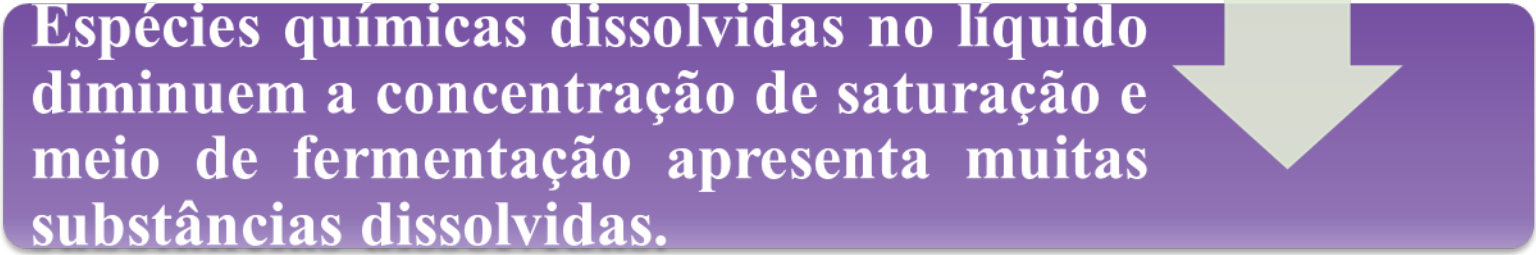
**Trabalhar com temperaturas mais baixas (inviável).**



**Empregar pressões parciais mais levadas (viável, porém deve-se ter cautela, pois oxigênio pode ser tóxico para as células).**



**Espécies químicas dissolvidas no líquido diminuem a concentração de saturação e meio de fermentação apresenta muitas substâncias dissolvidas.**



**Tabela 14.1** – Valores da concentração de oxigênio dissolvido na saturação, em diferentes condições.

Temp (°C)	Conc, NaCl (M)	P. Parc. O <sub>2</sub> (atm)	Conc. O <sub>2</sub> na sat. (mg/L)	Cte. Henry (mg/L. atm)
25	—	0,209	8,10	38,8
35	—	0,209	6,99	33,4
25	—	1,0	40,3	
25	0,5	1,0	34,2	
25	1,0	1,0	28,5	
25	2,0	1,0	22,7	



## Algumas considerações: Visando aumentar a concentração de saturação:

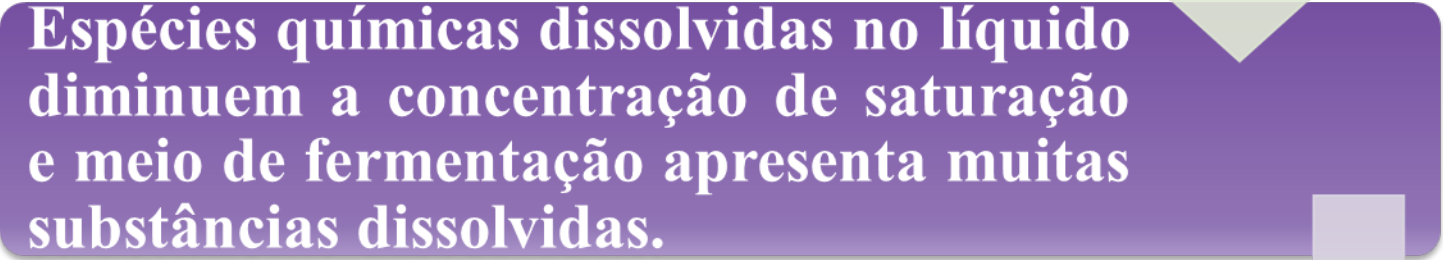
**Trabalhar com temperaturas mais baixas (inviável).**



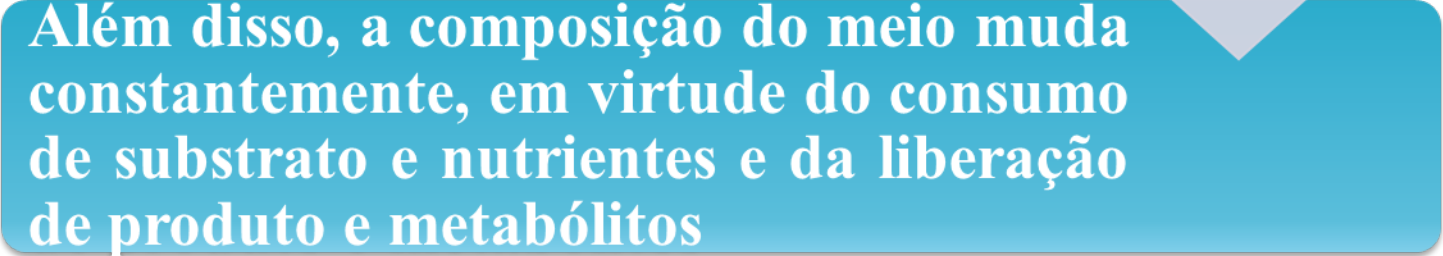
**Empregar pressões parciais mais levadas (viável, porém deve-se ter cautela, pois oxigênio pode ser tóxico para as células).**



**Espécies químicas dissolvidas no líquido diminuem a concentração de saturação e meio de fermentação apresenta muitas substâncias dissolvidas.**



**Além disso, a composição do meio muda constantemente, em virtude do consumo de substrato e nutrientes e da liberação de produto e metabólitos**



Para o caso de soluções diluídas, pode-se aplicar a Lei de Henry (a concentração de oxigênio na saturação é proporcional à pressão parcial do oxigênio no gás)

$$C_s = H \cdot p_g$$

onde:

$C_s$  = concentração de oxigênio na saturação ( $\text{gO}_2/\text{m}^3$ )


$H$  = constante de Henry ( $\text{gO}_2/\text{m}^3 \cdot \text{atm}$ )

$p_g$  = pressão parcial de  $\text{O}_2$  na fase gasosa ( $\text{atm}$ ) =  $x_{\text{O}_2} \cdot P$


$x_{\text{O}_2}$  = fração molar ou volumétrica do  $\text{O}_2$  no gás

$P$  = pressão total do gás ( $\text{atm}$ )

**Além do aspecto quantitativo, a cinética de consumo é de grande importância, sobretudo levando em conta as altas concentrações celulares que podem ser atingidas durante o processo.**



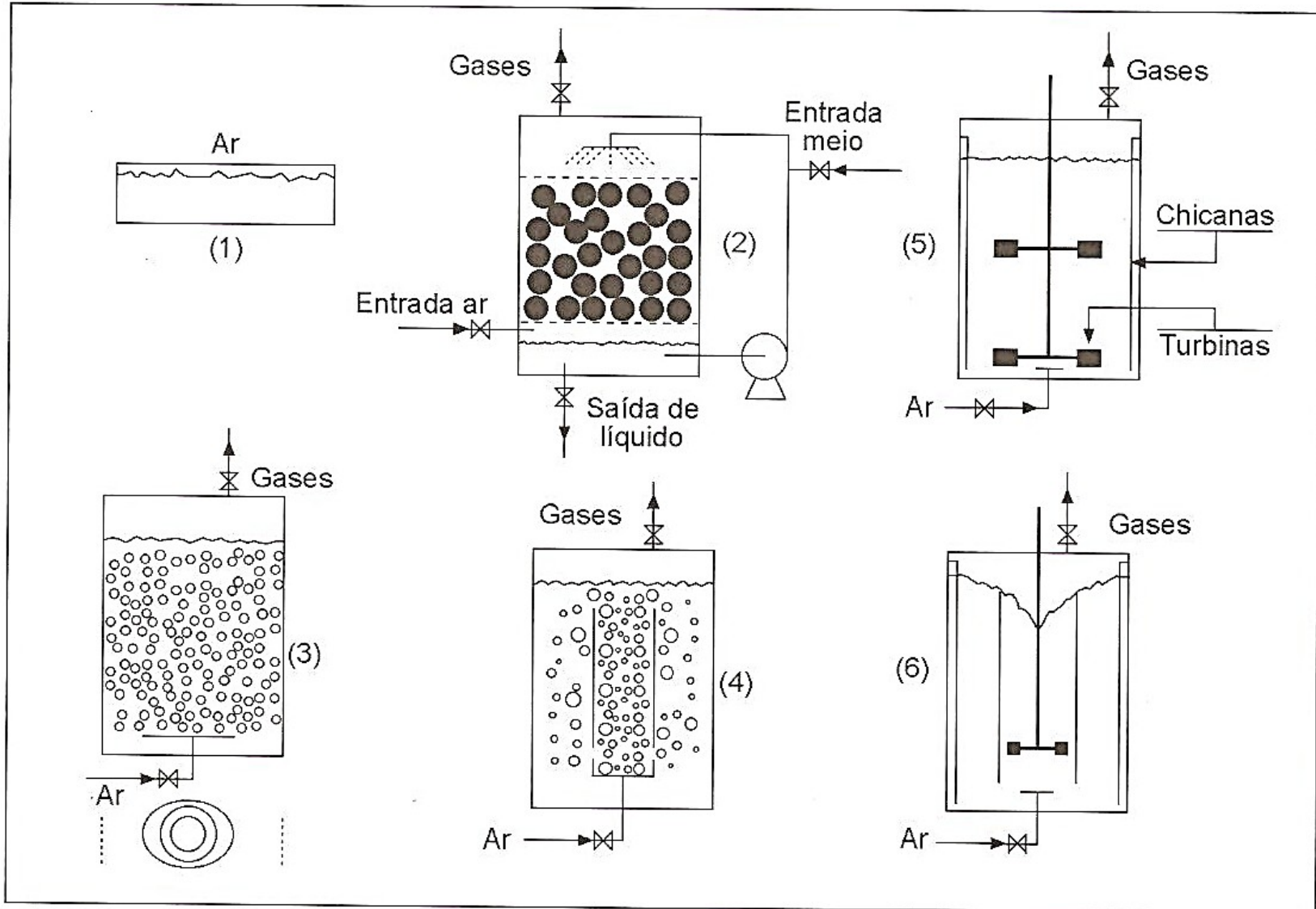
**Neste caso, é de grande relevância o conhecimento da velocidade de respiração do microrganismo, o que implica maior ou menor velocidade de transferência de oxigênio para o meio. Isso, por sua vez, reflete no dimensionamento do sistema de agitação e aeração do meio.**



**Todas essas considerações caracterizam a necessidade de se entender as bases fundamentais da transferência de oxigênio em meios líquidos.**

# **Sistemas de Transferência de Oxigênio**

# Sistemas de transferência de oxigênio



**Figura 14.1** – Sistemas diversos para a transferência de oxigênio em biorreatores. (1) bandeja ou lagoa; (2) reator de leito fixo; (3) coluna de bolhas; (4) "air-lift"; (5) tanque agitado e aerado; (6) "draught-tube".

# Algumas considerações

(1) e (2) – chamados reatores de aeração superficial; os demais, reatores de aeração em profundidade (borbulhamento de ar).

(3) e (4) – aeração apenas por borbulhamento de ar.

- - adequados para o cultivo de células sensíveis ao cisalhamento.
- - costumam ser construídos com altura bastante superior ao diâmetro, para permitir maior tempo de residência do ar em contato com o líquido.

(5) e (6) – reatores agitados e aerados.

(5) ainda é o mais frequente na indústria (93% das aplicações).

- (6) é o que causa maior cisalhamento das células



# Biorreator Agitado e Aerado de Baixo Cisalhamento

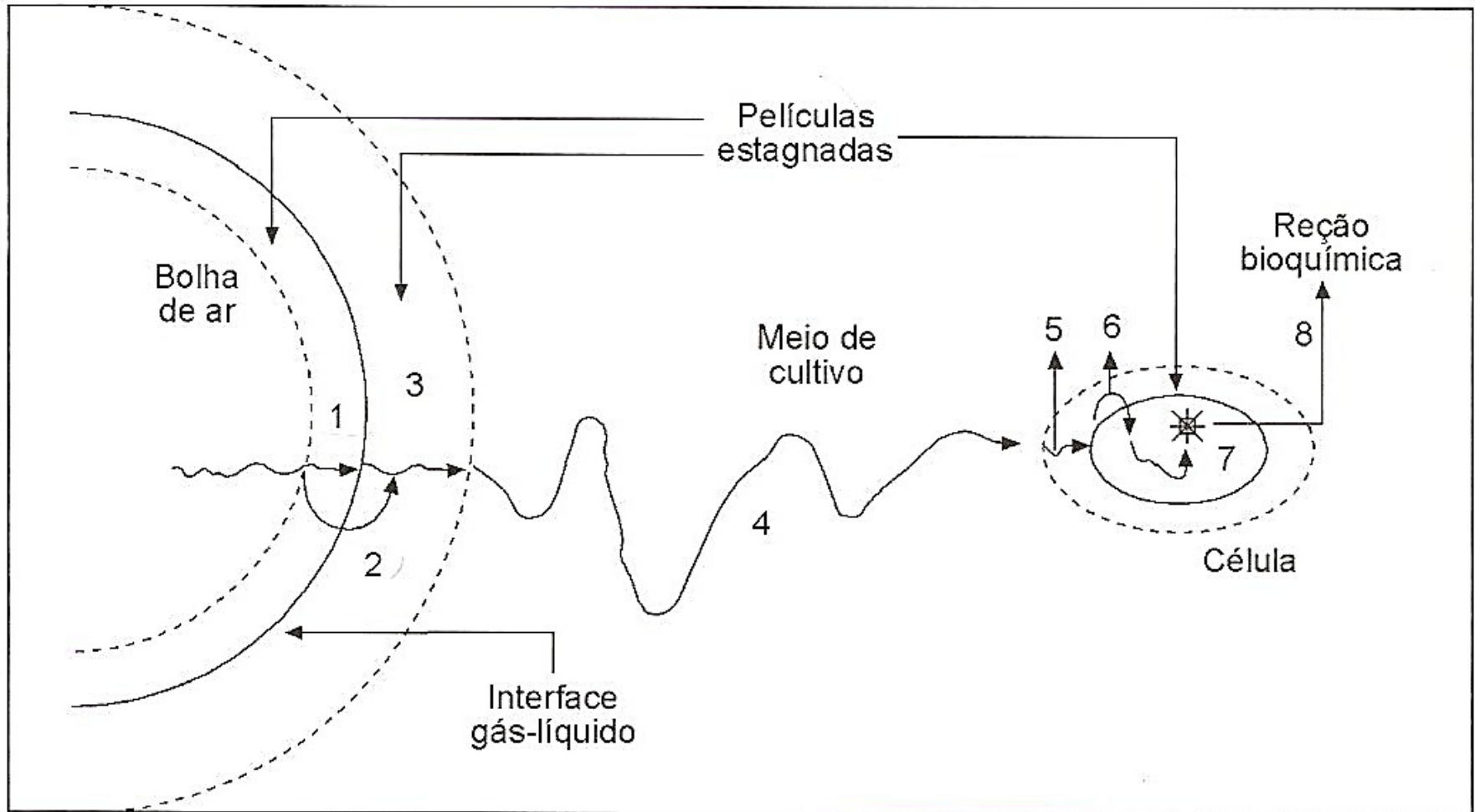
BAABC



# **Transferência de oxigênio e respiração microbiana**



# Transferência de oxigênio e respiração



**Figura 14.2** – Resistências associadas à dissolução e ao consumo do oxigênio.

**1. Resistência devido à película estagnada de gás**



**2. Resistência devido à interface gás-líquido**



**3. Resistência devido à película estagnada de líquido**



**4. Resistência devido à difusão no líquido**



**5. Resistência devido à película de líquido em torno da célula**



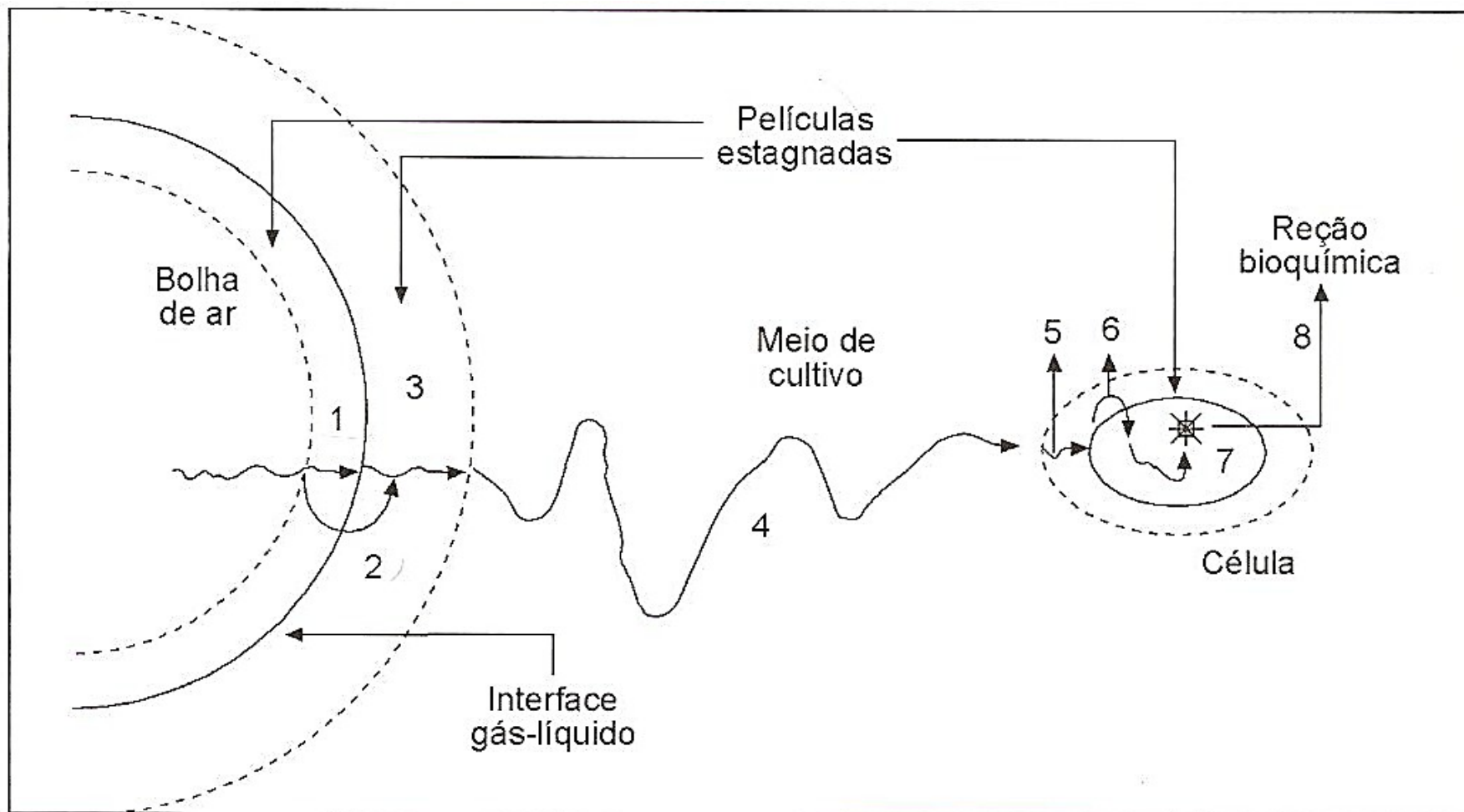
**6. Resistência da membrana celular**



**7. Resistência devido à difusão no citoplasma**



**8. Resistência relacionada à velocidade das reações de consumo do oxigênio**



**Figura 14.2** – Resistências associadas à dissolução e ao consumo do oxigênio.

## Principal resistência para o fornecimento

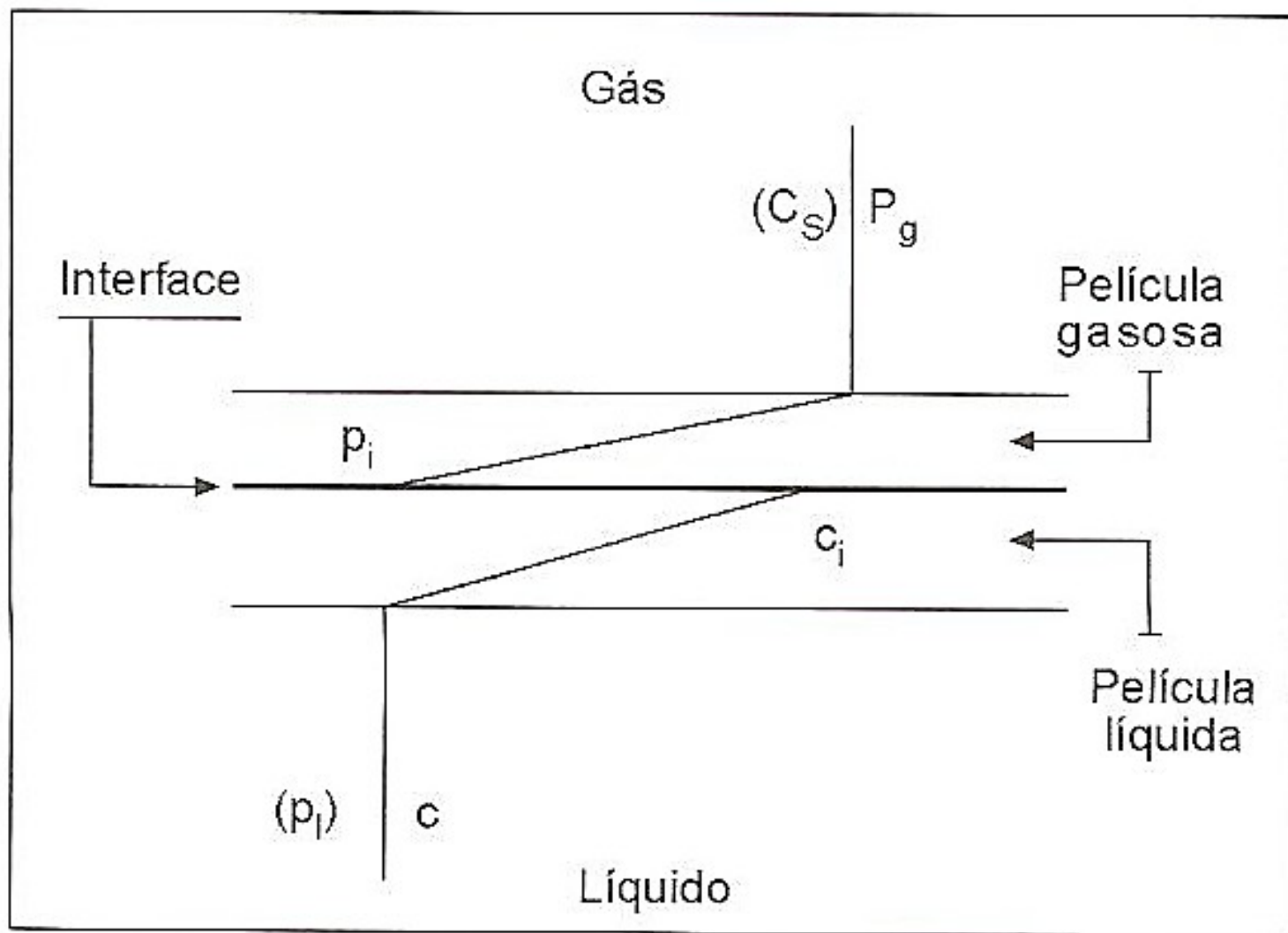
- Com relação ao fornecimento, a resistência relevante é a associada à película estagnada de líquido em torno da bolha de ar

## Principal resistência para o consumo

- Com relação ao consumo, a resistência mais significativa é a velocidade da reação de respiração

## Eficiência de um sistema

- Portanto, um sistema adequado de transferência de oxigênio é o que permite uma eficiente dissolução do oxigênio no meio líquido



**Figura 14.3** – Interface gás-líquido com as películas estagnadas.

# Transferência de oxigênio para o meio líquido

A teoria de maior utilidade para o equacionamento da transferência de oxigênio é a que considera a existência de duas películas estagnadas

Considerando que a difusão do oxigênio depende do gradiente de pressão ou concentração associados às películas define-se  $n_{O_2}$  como o fluxo de oxigênio por unidade de área interfacial ( $g_{O_2}/m^2.h$ ), o qual é dado por:

$$n_{O_2} = k_L \cdot H (p_i - p_1) = k_L (C_i - C)$$

$$n_{O_2} = k_L \cdot H (p_i - p_l) = k_L (C_i - C)$$

**Onde:**

$k_L$  é o coeficiente de transferência de massa da película líquida (m/h)

$H$  é a constante de Henry

$p_i$  é a pressão parcial de  $O_2$  na interface

$p_l$  é a pressão parcial de  $O_2$  em um gás em equilíbrio com a concentração de oxigênio  $C$  no líquido, segundo a lei de Henry (atm)

$C_i$  é a concentração de oxigênio dissolvido em equilíbrio com  $p_i$  ( $g_{O_2}/m^3$ )

$C$  é a concentração de oxigênio no seio do líquido ( $g_{O_2}/m^3$ )

Simplificação: desconsiderar a resistência da película gasosa, o que significa fazer  $p_i = p_g$

Assim,  $C_i = C_s$  e

$$n_{O_2} = k_L \cdot H (p_g - p_l) = k_L (C_s - C)$$

**Tendo em vista a dificuldade de quantificação da área interfacial de troca de oxigênio, define-se:**

$$a = \frac{\text{área interfacial de troca de massa (m}^2\text{)}}{\text{volume total de líquido (m}^3\text{)}}$$

Podendo-se, então, escrever:

$$n_{O_2} a = k_L a \cdot H (p_g - p_l) = k_L a (C_s - C)$$

**Onde:**

$n_{O_2} a$  = Velocidade de transferência de oxigênio ( $g_{O_2}/m^3 \cdot h$ )

$k_L a$  = Coeficiente volumétrico de transferência de  $O_2$  ( $h^{-1}$ )



Caso não se esteja em estado estacionário em termos de fluxo de  $O_2$ ,  $n_{O_2}a$  pode ser escrito como sendo a variação da concentração de oxigênio dissolvido ( $C$ ) em função do tempo:

$$dC/dt = k_L a (C_s - C)$$

Esta equação permite a exata compreensão de todas as formas de que se dispõe para o controle da concentração de oxigênio dissolvido em um meio.

**Avaliar:** Aumento da pressão parcial de  $O_2$  no gás de entrada  
Aumento da pressão na cabeça do fermentador  
Aumento da frequência de agitação  
Condição de transferência máxima

Métodos de determinação do  
 $k_L a$  em meio isento de células

Os dados a seguir se referem ao procedimento de determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio num sistema de cultivo em frasco agitado. Calcule  $K_v$  e  $k_L a$ .

$$V_{\text{meio}} = 50 \text{ mL}; H = 33,4 \text{ mg}_{\text{O}_2}/\text{L}\cdot\text{atm}.$$

$$C_{(\text{Na}_2\text{SO}_3)_t} = 2,288 \times 10^{-3} \text{ mol/L}; C_{(\text{Na}_2\text{SO}_3)_{t+5\text{min}}} = 0,851 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$$

Os dados da tabela abaixo foram obtidos durante a aplicação do método de determinação do  $k_L a$  por medida da concentração de  $\text{O}_2$  no meio isento de células. Calcule o  $k_L a$  sabendo que, neste caso, a concentração de saturação era igual a  $7,7 \text{ mg}_{\text{O}_2}/\text{L}$ .

Tempo (s)	0	7	14	22	31	43	58	77
$C(\text{mg}_{\text{O}_2}/\text{L})$	0	1,54	2,31	3,08	3,85	4,62	5,39	6,16