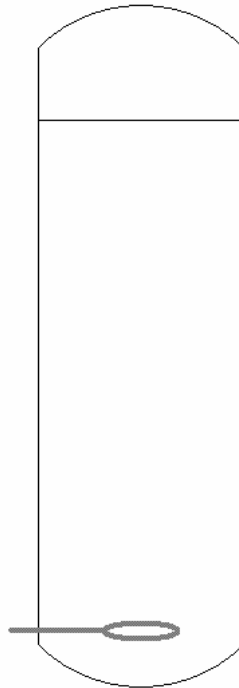


Columnas de burbujeo y Reactores de arrastre ("air-lift")

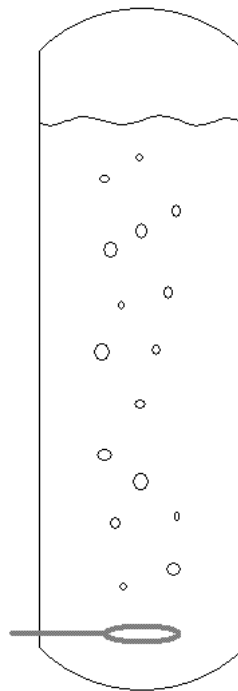
COLUMNA DE BURBUJEO Columna de Aireación



- La agitación es por un flujo neumático y es azarosa

COLUMNA DE BURBUJEO

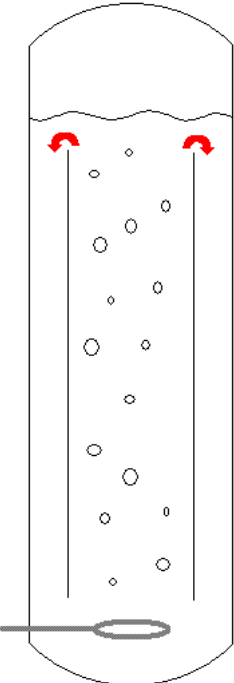
Columna de Aireación



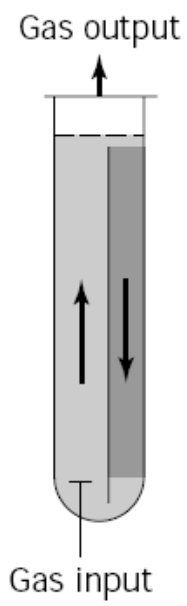
AIR LIFT

Tienen una geometría que determina un canal de ascenso y un canal de descenso conectados generándose un loop de recirculación.

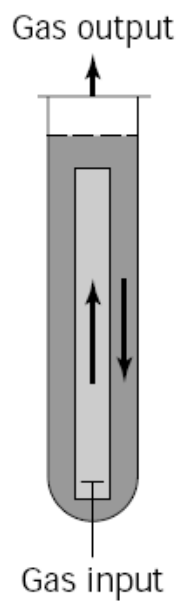
AIR LIFT



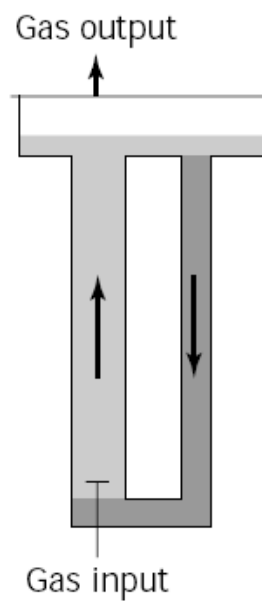
Internal-loop split
ALR



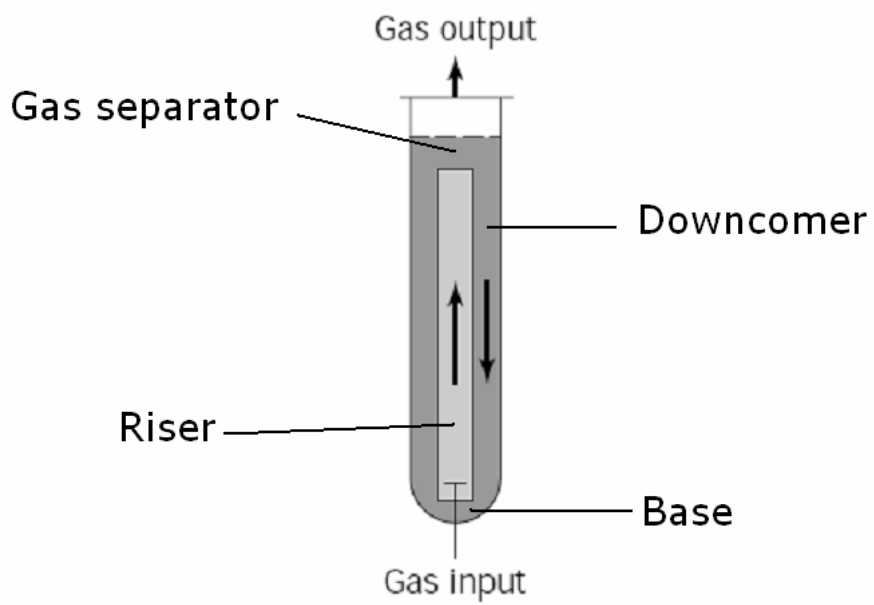
Internal-loop
concentric
tube reactor



External-loop
ALR



4 Partes diferenciadas



RISER: Donde se inyecta el aire y sube junto al líquido

DOWNCOMER: paralelo al riser. El líquido fluye hacia abajo

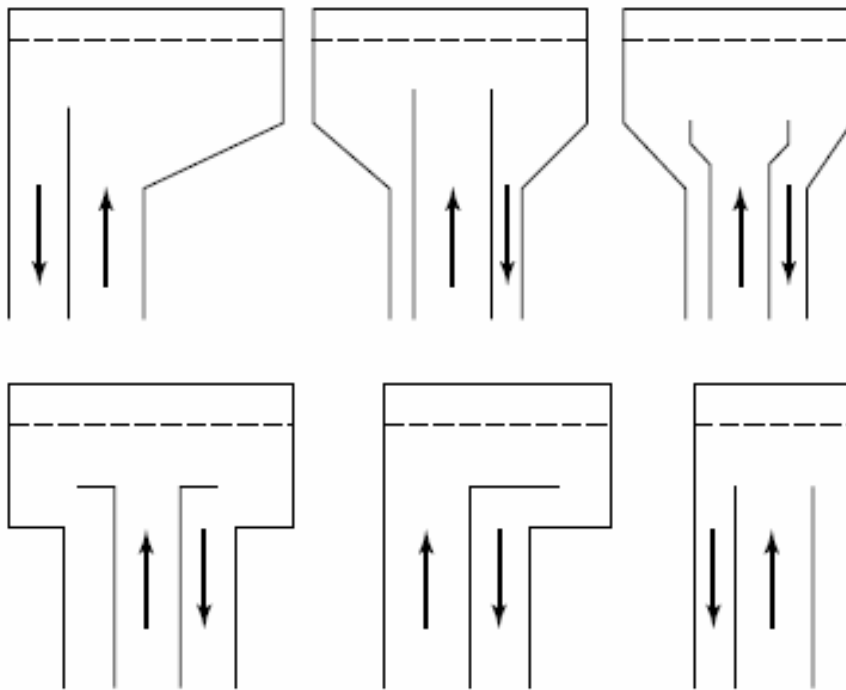
BASE: Conecta al riser con el downcomer en la base del reactor, su diseño impacta en:

- gas holdup
- velocidad del líquido
- flujo de fase sólida

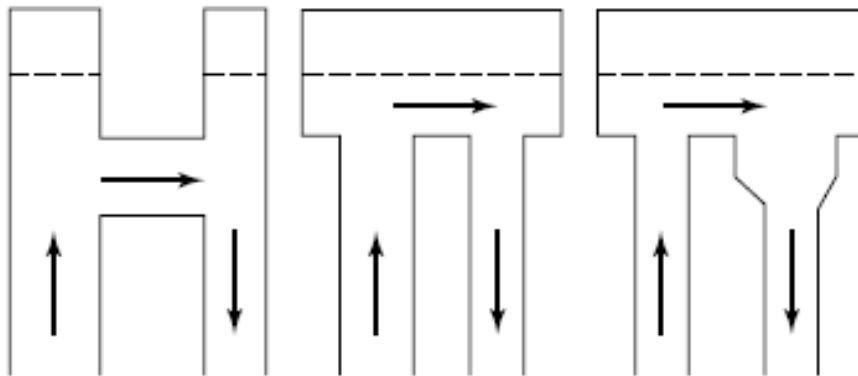
GAS SEPARATOR: Conecta al riser con el downcomer en la parte superior, su diseño impacta en:

- la recirculación
- separación de las burbujas

Gas separator configurations of internal-loop ALRs



Gas separator configurations of external-loop ALRs



Airlift vs CSTR

CSRT, cumple con la mayoría de los requerimientos:

- Transferencia de Oxígeno
- Remoción de gases de desecho
- Distribución homogénea de nutrientes
- Rápido mezclado de bases, ácidos concentrados
- Transferencia de calor
- Ambiente libre de contaminación

Pero, la Energía se aplica muy localizada generando un gradiente de Fuerza de corte (shear).

AIRLIFT - Tiene una mayor simplicidad mecánica.

- La circulación es debido a diferencia de holdup que genera diferencia de Presión. No hay un foco de disipación.

$$\Delta P_b = \rho_L g (\varphi_r - \varphi_d)$$

ΔP_b : Diferencia de presión en la base

ρ_L : Densidad del líquido

g : Cte gravitacional

φ_r : Gas holdup en el riser

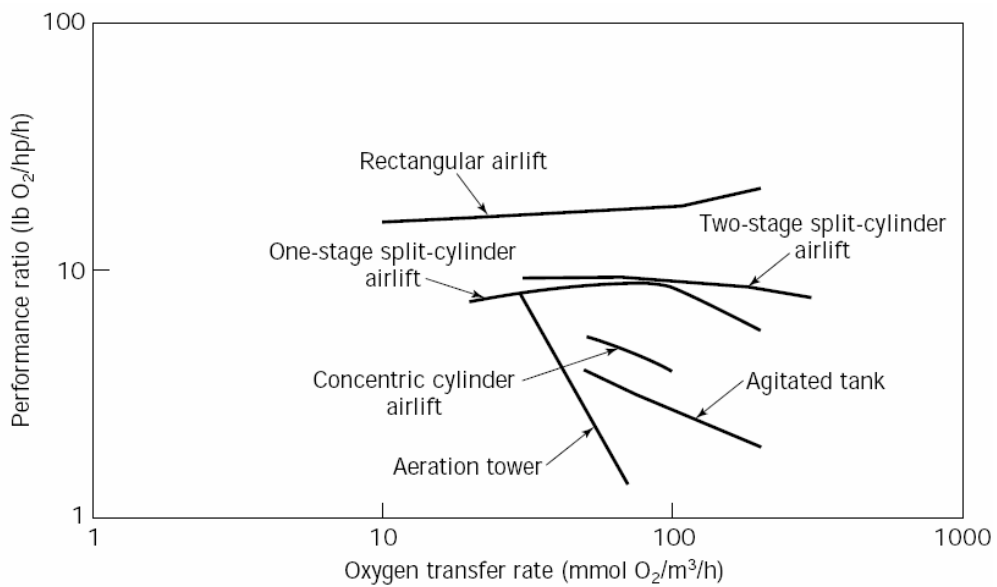
φ_d : Gas holdup en el downcomer

De esta manera se logra una Fuerza de corte bastante homogénea y baja

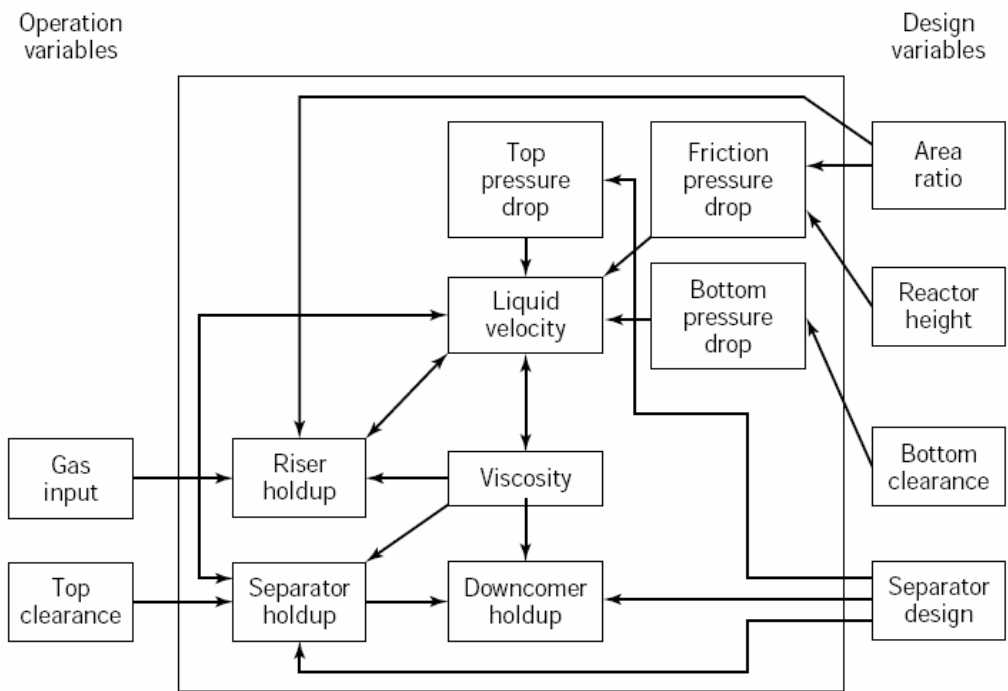
Menores costos de Energía

La eficiencia de la OTR (masa de O_2 absorbida por unidad de Energía dada el sistema por unidad de T) es mayor

Es independiente a los cambios operacionales, no en los CSTR



Variables de diseño y Variables operacionales



Configuración del Flujo



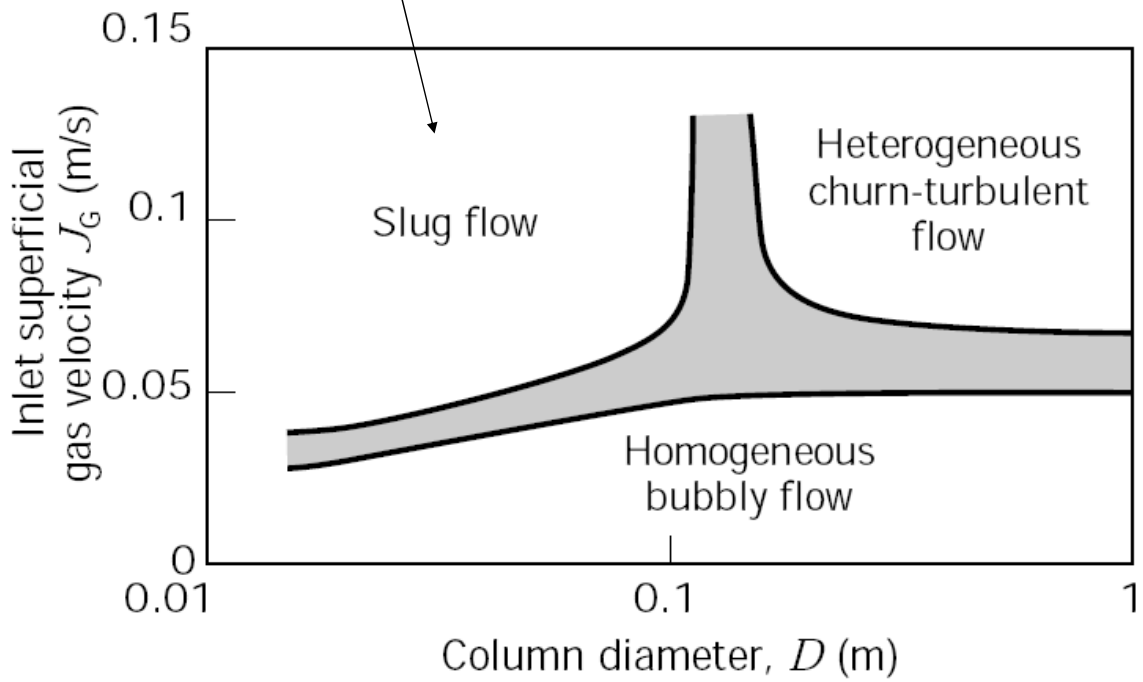
RISER, el gas fluye a \geq velocidad. A burbujas mas pequeñas se van igualando las velocidades.

Mas de 12 configuraciones, las mas importantes:

- 1- Flujo homogéneo: burbujas pequeñas, uniformes en diámetro, resultando en baja turbulencia.
- 2- Flujo turbulento: Burbujas de diversos tamaños.

La 1 puede pasar a 2 aumentando el flujo de aire o zonalmente con \neq diámetros

Burbujas grandes en canal de bajo diámetro



Configuración del Flujo

DOWNCOMER, el líquido fluye a \geq velocidad.

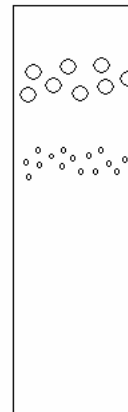
Arrastre de burbujas – Velocidad

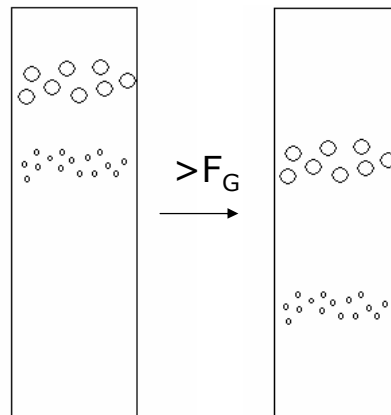
A baja -- tiempo de residencia suficiente en el separador.

Al aumentar -- se van arrastrando burbujas

Mayor tamaño a mayor velocidad

Las grandes reducen el paso del líquido y este aumenta su velocidad, hacia abajo este efecto es menor y la fuerza de arrastre también. Se genera una estratificación





Al aumentar la velocidad la
estratificación va bajando

Hasta llegar a una distribución homogénea – Flujo deseado

La relación del área seccional del riser en fc del downcomer
determina la configuración del flujo

Configuración del Flujo

GAS SEPARATOR, de su diseño depende el escape de burbujas.

El grado de escape influye en:

- Gas Holdup
- Velocidad del líquido

Gas Holdup

- Da idea de la capacidad de transferencia de masas
- La diferencia entre el gas holdup del riser y el downcomer es la fuerza motriz que genera la recirculación del líquido. Importa la fracción total de gas no cuan particionado esté.
- Aumenta con la disminución de la relación área seccional del downcomer y del riser

$$\langle A_d / A_r \rangle \text{ > Gas holdup}$$

$$\phi_r = a(J_G)^\alpha \left(\frac{A_d}{A_r}\right)^\beta (\mu_{ap})^\gamma$$

ϕ_r : Gas holdup en el riser

J_G : Velocidad del gas por unidad de sección

A_d / A_r : Relación área seccional del downcomer y del riser

μ_{ap} : Viscosidad del líquido

A, α, β, γ : constantes

El J_G depende de la geometría del separador, ya que si hay reflujo de burbujas:

$$J_{G,true} = \left(\frac{Q_{in} + Q_d}{A_r} \right)$$

También se puede agregar términos que representan la liberación de las burbujas

$$M = \frac{D_s}{4D}$$

D_s : Diámetro del separador de gas

D : Diámetro del reactor

Table 1. Gas Hold-Up in Internal-Loop ALR

No.	Formula
1	$\varphi_r = 0.441 \frac{\rho_{Gr}^{0.341} \mu_{sp}^{-0.135}}{\rho_{Gr} \mu_{sp}}$ $\varphi_d = 0.297 \frac{\rho_{Gr}^{0.935} \mu_{sp}^{-0.107}}{\rho_{Gr} \mu_{sp}}$
2	$\varphi_r = 2.47 \frac{\rho_{Gr}^{0.97}}{\rho_{Gr}}$
3	$\varphi_r = 0.465 \rho_{Gr}^{0.62} \left(1 + \frac{A_d}{A_r}\right)^{-1.66} \mu_{sp}^{-0.103}$
4	$\varphi_r = 0.65 \rho_{Gr}^{0.603 + 0.078 C_d} \left(1 + \frac{A_d}{A_r}\right)^{-0.258}$ $\varphi_d = 0.46 \varphi_r - 0.0244$
5	$\varphi_r = (0.491 - 0.498) \rho_{Gr}^{0.706} \left(\frac{A_d}{A_r}\right)^{-0.254} D \mu_{sp}^{-0.0684}$
6	$\varphi_r = 0.16 \left(\frac{\rho_{Gr}}{\rho_r}\right)^{0.57} \left(1 + \frac{A_d}{A_r}\right)$ $\varphi_d = 0.79 \varphi_r - 0.057$
7	$\varphi_r = 0.364 J_{Gr}$
8	$\frac{\varphi_r}{1 - \varphi_r} = \frac{\rho_{Gr}^{2.2(2n+1)}}{2^{3n+1/n+1} \rho_r^{2.2(2n+1)} \left(\frac{K}{\rho_l}\right)^{1.2(2n+1)} e^{n(2n+1)} \left(1 + \frac{A_d}{A_r}\right)^{2n+2.74(2n+1)}}$
9	$\frac{\varphi}{(1 - \varphi)^4} = \frac{0.124 \left(\frac{J_{Gr} \mu_1}{\sigma_1}\right)^{0.936} \left(\frac{\rho_1 \sigma_1}{\mu_1}\right)^{0.204} \left(\frac{D_1}{D}\right)^{0.114}}{1 - 0.276(1 - e^{-0.0958 M_a})}$
10	$\varphi_r = \frac{Fr}{0.415 + 4.27 \left(\frac{J_{Gr} + J_{Lr}}{\sqrt{g D_r}}\right) \left(\frac{\rho_1 D_r}{\sigma_1}\right)^{-0.188} + 1.13 Fr^{1.22} M_a^{0.0386} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_1}\right)^{0.0386}}$
11	$\frac{\varphi}{(1 - \varphi)^4} = 0.16 \left(\frac{J_{Gr} \mu_1}{\sigma_1}\right) M_a^{-0.283} \left(\frac{D_1}{D}\right)^{-0.222} \left(\frac{\rho_1}{\Delta \rho}\right)^{0.283} \cdot (1 - 1.61(1 - e^{-0.0958 M_a}))^{-1}$
12	$\varphi_d = 4.51 \cdot 10^6 M_a^{0.115} \left(\frac{A_r}{A_d}\right)^{4.2} \varphi_r$ when $\varphi_r < 0.0133 \left(\frac{A_d}{A_r}\right)^{-1.32}$ and $\varphi_d = 0.05 M_a^{-0.22} \left[\left(\frac{A_r}{A_d}\right)^{0.6} \varphi_r\right]^{0.31 M_a^{-0.0271}}$ when $\varphi_r > 0.0133 \left(\frac{A_d}{A_r}\right)^{-1.32}$
13	$\varphi_r = 0.0057 \left[(\mu_1 - \mu_2)^{2.75} - 161 \frac{73.3 - \sigma}{79.3 - \sigma} \right] \cdot \frac{\rho_{Gr}^{0.88}}{J_{Gr}}$
14	$\varphi_r = \frac{0.4 Fr}{1 + 0.4 Fr \left(1 + \frac{J_1}{J_{Gr}}\right)}$
15	$\varphi = 0.24 n^{-0.6} Fr^{0.84 - 0.14 n} C_d$



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad de Buenos Aires

Centro
de Estudios
CITE

CARRERA DE ESPECIALIZACIÓN EN
BIOTECNOLOGÍA INDUSTRIAL

φ_d es despreciable a bajos flujos

> φ_r aumenta el φ_d

El gas holdup en el separador es el promedio de todo el sistema, con un topclearance corto (1-2 diámetros). Sino el separador se asemeja a un reactor de burbujas.

< A_d / A_r > Gas holdup

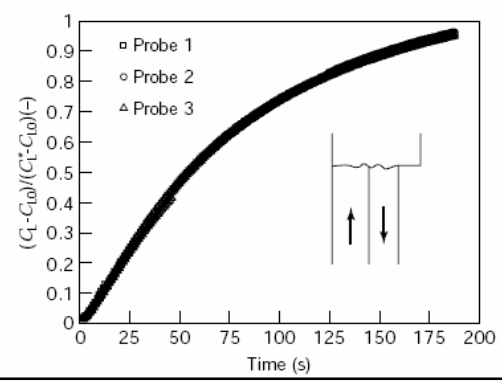
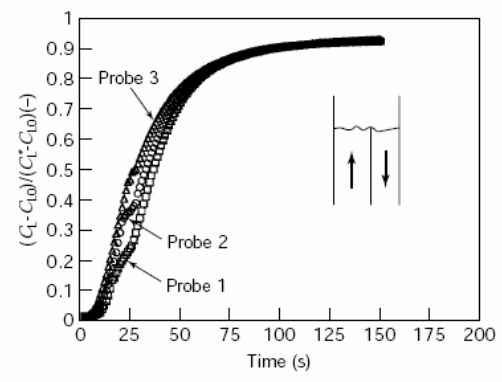
En un airlift de loop externo, el separador de gas es más efectivo
Y no hay retorno de burbujas

OTR : $K_L a (C^* - C)$ válido para sist homogeenos

Como varía el $K_L a$ en distintas partes de un airlift.

Depende de su geometría

A mayor diferencia de holdup
 Mayor velocidad
 Mejor mezclado
 Mas homogeenos



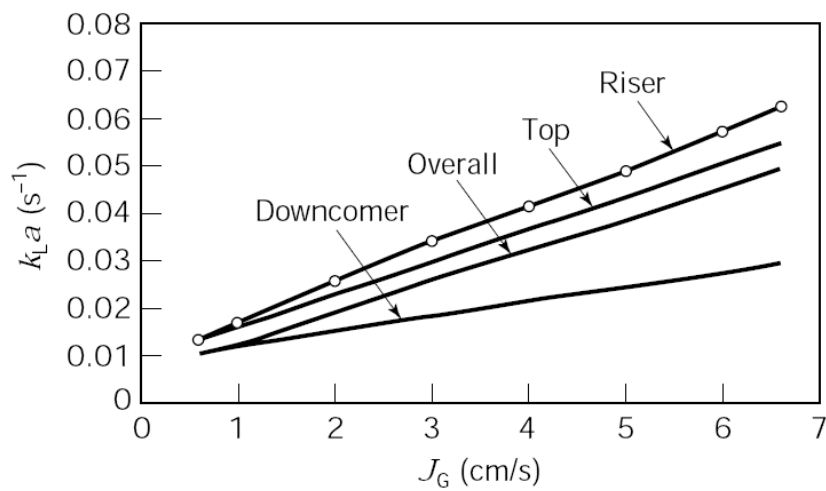
TRANSFERENCIA DE O₂



Columnas de burbujeo y Reactores de arrastre (“air-lift”)

R_{O_2} : Coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (OTR)

Cómo varía el $K_L a$ con el flujo de aire según zonas del airlift



Si $T_c \cdot K_L a < 0,5$

T_c : Tiempo de circulación

Se puede considerar perfectamente mezclado

Transferencia de Calor

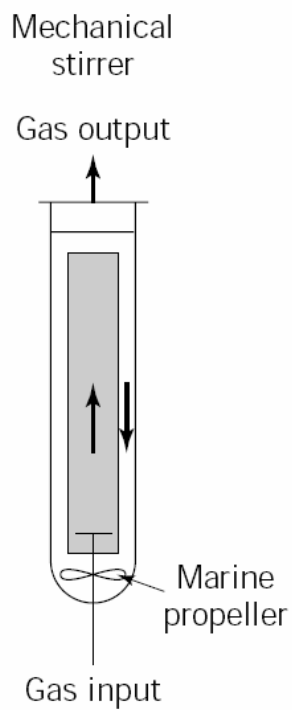
Para reactores No-Newtonianos

$$Nu = 0.075(10.3n^{-0.63})^\beta n^{1/3} (Pr^*) \frac{1}{3} Fr^{-\beta} (Re^*)^{\beta+3(n+1)}$$

Para reactores Newtonianos

$$Nu = 0.134^{1/3} (Pr)^{1/3} Fr^{-1/4} (Re)^{3/4}$$

Mejoras de Diseño



- Mayor recirculación, cultivos muy viscosos

- Distribución más uniforme del O_2 disuelto

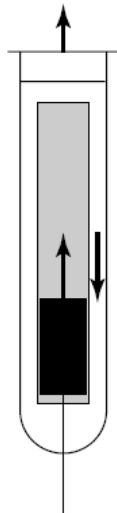
- > OTR

Pero > Fuerza de corte

Mejoras de Diseño

Static stirrer

Gas output



Gas input

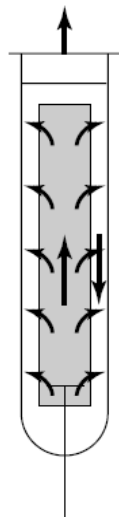
- Aumenta el gas holdup
- > área interfacial gas/líquido
- > $K_L a$



Mejoras de Diseño

Perforated
draft tube

Gas output

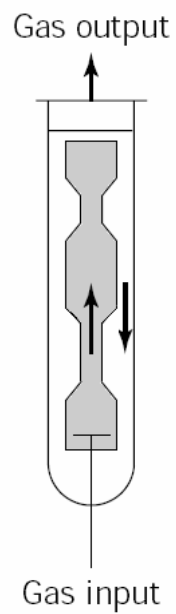


Gas input

- Mejora la transferencia de masa en el downcomer aun con menor velocidad de flujo.

Mejoras de Diseño

Converging
Diverging tube

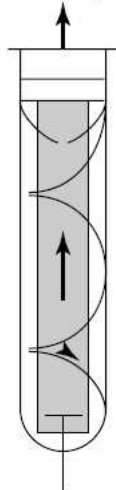


- Aumenta el hold up
- Aumenta la velocidad de circulación

Mejoras de Diseño

Helical flow
promoter

Gas output



-El flujo en el downcomer sigue un patrón helicoidal. Generado por pequeños baffles

-Mejor transferencia de calor

-Óptimo para fotosintéticos por mayor exposición de todas las células