

# Sintonización de controladores para la regulación de oxígeno disuelto en biorreactores

Paloma Martínez Barreda, M. Teresita Castañeda, Martín Jamilis\*,

Grupo de Control aplicado, Instituto LEICI, Facultad de Ingeniería, UNLP-CONICET.

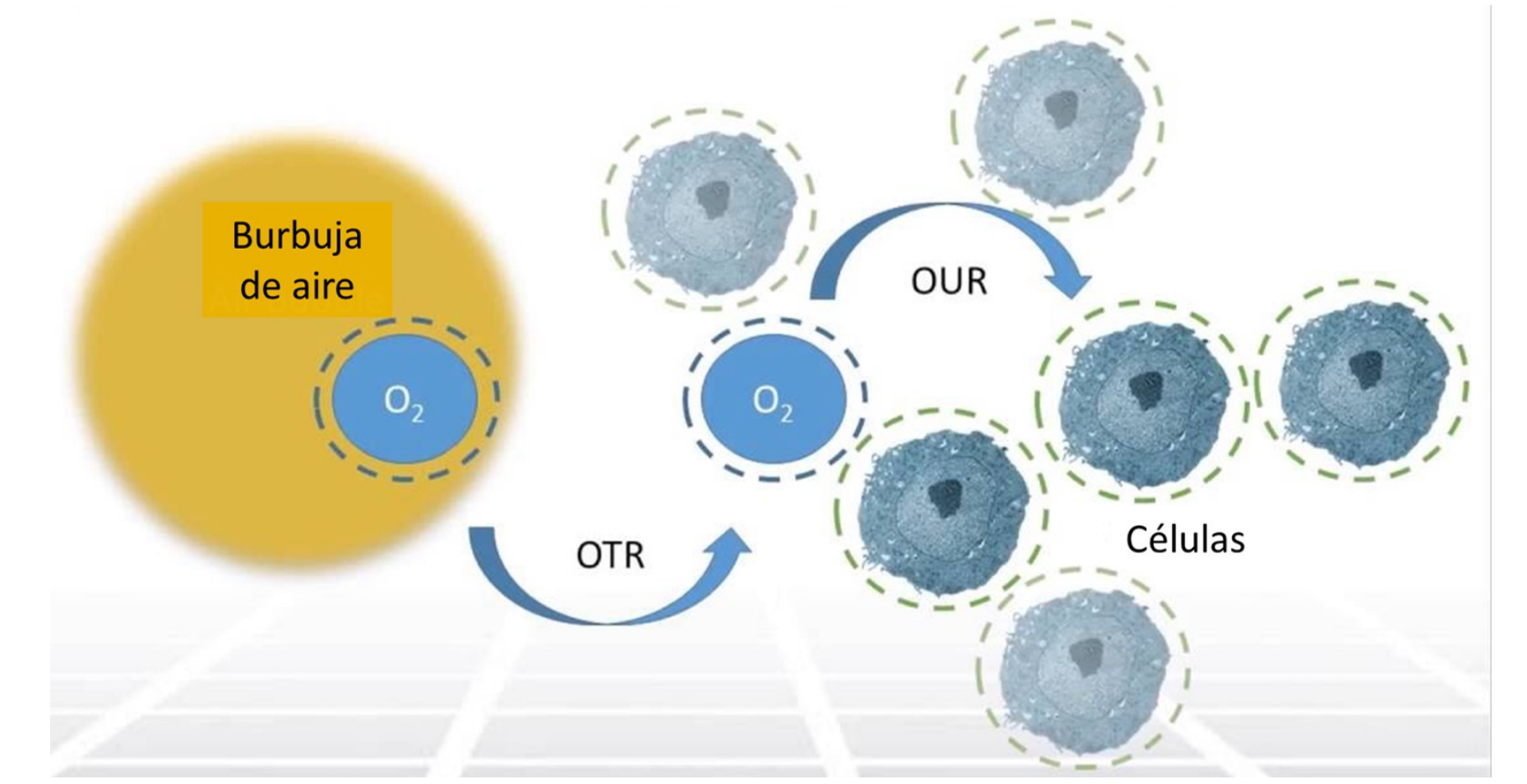
martin.jamilis@ing.unlp.edu.ar, <http://gca.ing.unlp.edu.ar>

## 1. Introducción

- La concentración de oxígeno disuelto es una variable clave a controlar en múltiples bioprocesos en todas sus escalas.
- Su deficiencia puede producir limitaciones en las tasas de producción o la activación de rutas metabólicas indeseadas, dando lugar a la generación de metabolitos no deseados y a bajos rendimientos, impactando en la rentabilidad.
- El  $O_2$  tiene baja solubilidad en medios líquidos, lo

que genera la necesidad de un suministro constante en valores compatibles con el consumo, a priori desconocido.

- Su dinámica es no lineal y fuertemente dependiente de la velocidad de agitación y flujo de aire suministrado.
- El objetivo es regular su concentración, priorizando la estabilidad sobre los tiempos de respuesta.



## 2. Modelo del proceso

El modelo dinámico de la concentración del oxígeno disuelto ( $c$ ) es:

$$\dot{c} = k_L a(N, Q)(c^* - c) - r_{O_2} = OTR - OUR \quad (1)$$

donde  $c^*$  es su valor de saturación,  $r_{O_2}$  es su tasa de consumo volumétrica (perturbación) y  $k_L a$  es el coeficiente de transferencia de masa que es función no lineal de la agitación ( $N$ ) y el caudal de aire ( $Q$ ).

Al linealizar en una concentración  $c_0$ , tomando como entradas a  $N$ ,  $Q$  y  $r_{O_2}$ :

$$M(s) = \left[ 3\alpha \frac{k_L a_0}{N_0} \quad \beta \frac{k_L a_0}{Q_0} \quad \frac{-1}{(c^* - c_0)} \right] \frac{c^* - c_0}{k_L a_0 + s} \quad k_L a_0 = \frac{r_{O_2}}{(c^* - c_0)} \quad (2)$$

A través de ensayos experimentales se ha hallado que además existe un retardo. En este caso, se trabajará con la entrada de agitación, quedando el modelo lineal:

$$P_m(s) = \frac{\Delta c}{\Delta N} = \frac{K}{1 + sT} e^{-Ls} \cong \frac{K}{1 + sT} \frac{1 - 0,5Ls}{1 + 0,5Ls} \quad (3)$$

donde  $K = 0,28$ ,  $T = 45$  s y  $L = 30$  s, para un proceso *batch* con tasa de crecimiento máxima.

## 3. Controladores

Se comparan 4 métodos de sintonización de controladores PID para sistemas con retardo (Normey-Rico 2007):

- Ziegler y Nichols (ZN).
- Control por Modelo Interno (IMC) basado en el predictor de Smith.
- Control por Modelo Interno con asignación de polos de lazo cerrado (IMC-PP).
- PID de 2 grados de libertad (2DOF), donde el controlador primario es el IMC-PP.

El PID-ZN se implementó con una estructura paralela, mientras que el resto se implementó con una estructura serie:

$$C_p(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \frac{1}{1 + sT_f} \quad C_s(s) = \frac{k_p(1 + T_I s)(1 + T_D s)}{T_I s(1 + \alpha T_D s)} \quad (4)$$

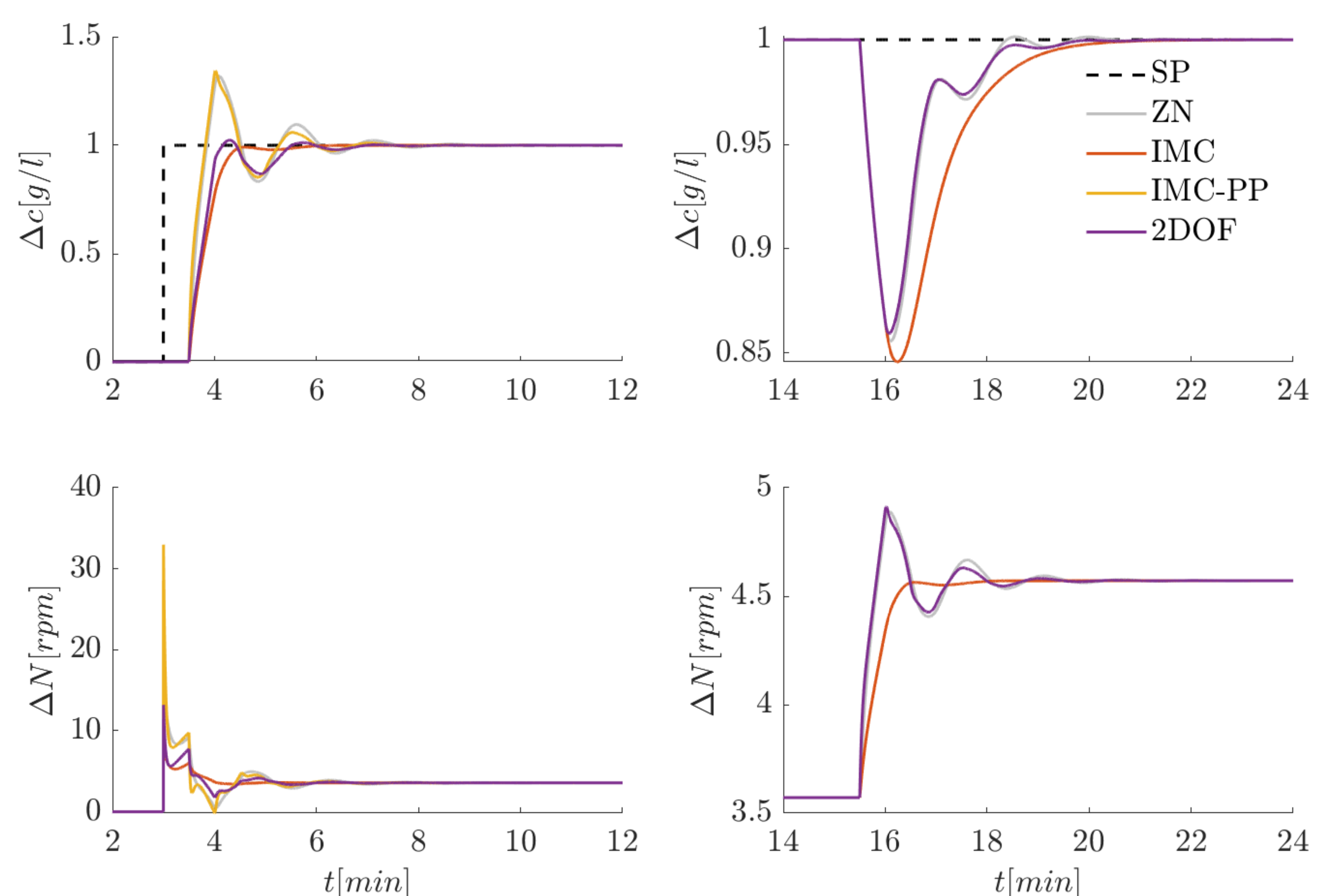
J. E. Normey-Rico, Control of dead-time processes. Springer Science & Business Media, 2007.

## 4. Resultados

Los gráficos muestran resultados de simulación de los controladores sobre el modelo linealizado (3). Se evalúa la respuesta al escalón de set-point (izquierda) y de perturbación (derecha).

Los gráficos superiores muestran los cambios en el oxígeno disuelto (salida) y los inferiores en la velocidad de agitación (acción de control). La tabla muestra métricas e índices de performance: tiempo de subida ( $t_r$ ), tiempo de establecimiento ( $t_s$ ), e índices IAE e ITAE.

- PID-ZN e IMC-PP tienen los tiempos de subida más cortos. Sin embargo, debido a las oscilaciones, sus tiempos de establecimiento son los más grandes.
- PID-IMC y PID-2DOF, a pesar de tener tiempos de subida un poco mayores, tienen mejores tiempos de establecimiento, ya que las respuestas son más amortiguadas.
- PID-IMC presenta los mejores IAE e ITAE para la respuesta al set point, pero los peores para la perturbación (respuesta más suave y lenta).
- PID-2DOF tiene los mejores IAE e ITAE para la perturbación, siendo sus valores comparables a los del PID-IMC en la respuesta al set point.



	$t_r$ [seg]	$t_s$ [seg]	IAE (sp)	ITAE (sp)	IAE (pert.)	ITAE (pert.)
PID - ZN	17	143	26.13	7.1	9.3	9.25
IMC	38	48	20.66	4.8	14.1	14.22
IMC-PP	14	129	21.55	5.6	9.0	8.93
2DOF	28	107	21.59	5.3	9.0	8.93

## 5. Conclusiones

- Siendo que el objetivo principal es la estabilidad por sobre la velocidad de respuesta, los controles IMC y 2DOF son los más indicados para la implementación.
- El PID 2DOF logra un compromiso entre velocidad de respuesta y amortiguamiento. Sin embargo, requiere del filtro de referencia, que puede no ser

una opción en algunos dispositivos de control comerciales.

- A partir de estos resultados, se realizará la validación experimental de los controladores en el laboratorio de bioprocesos del Instituto LEICI (UNLP-CONICET).