



**Instituto LEICI, de Electrónica, Instrumentación,
Control y Procesamiento de Señales
Departamento de Electrotecnia- Facultad de Ingeniería-UNLP**
Grupo de Control Aplicado (GCA-LEICI)

***Simulador Dinámico Abierto de Cultivos Biológicos en
Fotobiorreactores Tipo Raceway***

Valenciaga Fernando y Nuñez Sebastián

fval@ing.unlp.edu.ar

sebastian.nuniez@ing.unlp.edu.ar

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”



Usos de Cultivos en Raceways

- Producción de ácidos grasos para biodiesel
- Producción de biomasa con fines energéticos (combustión)
- Producción de componentes para alimentos balanceados
- Tratamiento de aguas residuales
- Primer eslabón de cadena de alimentación en piscicultura

Ventajas:

- tienen una tasa de crecimiento superior comparada con granos (soja o maíz)
- requieren una menor ocupación del suelo
- no necesitan ubicaciones con suelo fértil
- no son fuente de alimentación humana
- fotosíntesis con alto consumo de carbono → cultivos complementarios de procesos fabriles como depuradores de emisiones de dióxido de carbono (CO_2)

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”



Usos de Cultivos en Raceways

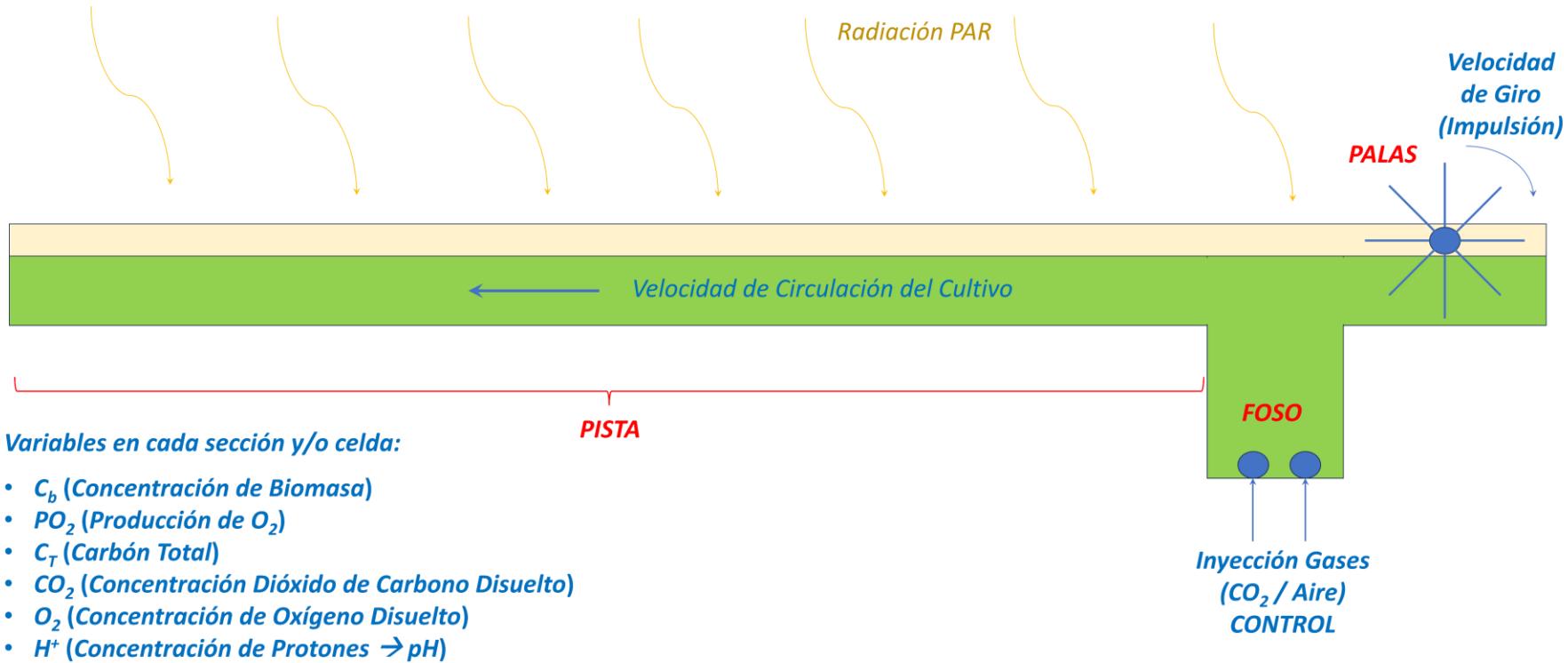
- Producción de ácidos grasos para biodiesel
- Producción de biomasa con fines energéticos (combustión)
- Producción de componentes para alimentos balanceados
- Tratamiento de aguas residuales
- Primer eslabón de cadena de alimentación en piscicultura

Reducción de Costos de Producción

- Diseño y disposición de los fotobiorreactores (geometría, altura de paredes, diseño de deflectores, eficiencia de impulsión, etc.)
- Determinación de variables operativas óptimas (caudales de inyección, velocidad de circulación, altura de los cultivos, horario y volumen de cosechas, etc.)
- Búsqueda/diseño de variedad de microalga específica para el clima/latitud de emplazamiento (variedades híbridas, modificación genética, etc.)
- **Control dinámico de variables operativas sensibles para la microalga seleccionada (control de pH y O₂ disuelto por inyección de burbujas de gases que contengan buenos porcentajes de CO₂ u O₂ respectivamente)**

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelos Dinámicos Orientados al Control



Modelo Orientado al Control

- Modelo dinámico biológico/químico del foso
- Modelo dinámico biológico/químico de la pista
- ~~Modelo dinámico biológico/químico de las palas~~

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Radiación PAR → Radiacion promedio I_{av}

$$I_{av}(t, x) = \frac{I_o(t)}{h K_a C_b(t, x)} (1 - e^{-h K_a C_b(t, x)})$$

$$P_{O_2}(t, x) = \frac{\alpha_s \hat{P}_{O_2} I_{av}^n(t, x)}{K_i e^{m I_{av}(t, x)} + I_{av}^n(t, x)} F_{O_2} F_{pH} F_T - (1 - \alpha_s) R_{O_2} \quad \boxed{\text{Fotosíntesis}}$$

$$P_{CO_2}(t, x) = -P_{O_2}(t, x)$$

$$F_{O_2} = \left(1 - \left(\frac{[O_2(t, x)]}{K_{O_2}} \right)^z \right)$$

$$F_{pH} = B_1 e^{\frac{-C_1}{pH(t, x)}} - B_2 e^{\frac{-C_2}{pH(t, x)}}$$

$$F_T = \frac{(T - T_{max})(T - T_{min})^2}{(T_{opt} - T_{min})[(T_{opt} - T_{min})(T - T_{opt}) - (T_{opt} - T_{max})(T_{opt} + T_{min} - 2T)]}$$

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelo Dinámico de la Pista:

$$\frac{\partial C_b(t, x)}{\partial t} = -\nu \frac{\partial C_b(t, x)}{\partial x} + P_{O_2}(t, x)C_b(t, x)Y_{b/O_2} \longrightarrow \text{Concentración de Biomasa}$$

Oxígeno disuelto

$$\frac{\partial [O_2](t, x)}{\partial t} = -\nu \frac{\partial [O_2](t, x)}{\partial x} + \frac{P_{O_2}(t, x)C_b(t, x)}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2} p}([O_2^*](t, x) - [O_2](t, x))$$

Carbón Total

$$\frac{\partial [C_T](t, x)}{\partial t} = -\nu \frac{\partial [C_T](t, x)}{\partial x} + \frac{P_{CO_2}(t, x)C_b(t, x)}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2} p}([CO_2^*](t, x) - [CO_2](t, x))$$

$$[\dot{CO}_2](t, x) = [\dot{C}_T](t, x)/(P_2 - P_1P_3[CO_2](t, x)) \longrightarrow \text{Dióxido de Carbono disuelto}$$

$$[\dot{H}^+](t, x) = P_3[\dot{CO}_2](t, x) \longrightarrow pH = -\log([H^+])$$

$$P_1 = \frac{K_1}{[H^+](t, x)^2} + \frac{2K_1K_2}{[H^+](t, x)^3} \quad P_2 = 1 + \frac{K_1}{[H^+](t, x)} + \frac{K_1K_2}{[H^+](t, x)^2}$$

$$P_3 = \frac{\left(\frac{K_1}{[H^+](t, x)} + \frac{2K_1K_2}{[H^+](t, x)^2} \right)}{\left(1 + \frac{K_w}{[H^+](t, x)^2} + \frac{K_1[CO_2](t, x)}{[H^+](t, x)^2} + 4 \frac{K_1K_2[CO_2](t, x)}{[H^+](t, x)^3} \right)}$$

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelo Dinámico del Foso:

Parte Líquida:

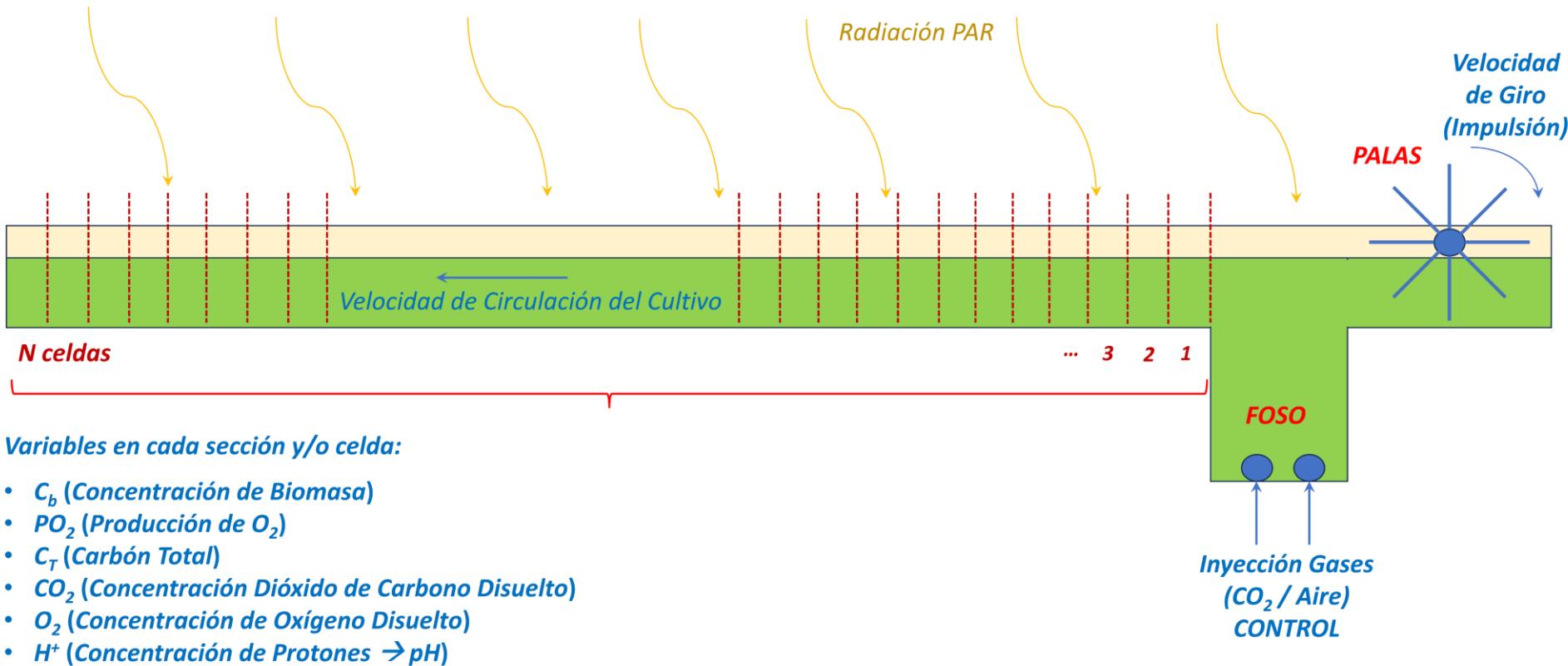
$$\begin{aligned}\dot{C}_{bf} &= -\frac{Q_{liq}}{V_{fc}}(C_{bf} - C_{bin}) + P_{O_2f} C_{bf} Y_{b/O_2} - \frac{Q_m}{V_s(1-\varepsilon_f)} C_{bf} \\ [\dot{O}_2]_f &= \frac{-Q_{liq}}{V_{fc}}([O_2]_f - [O_2]_{in}) + \frac{P_{O_2f} C_{bf}}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2f}} ([O_2^*]_g - [O_2]_f)_{lm} + \frac{Q_m}{V_{fc}} ([O_2]_m - [O_2]_f) \\ [\dot{C}_T]_f &= \frac{-Q_{liq}}{V_{fc}}([C_T]_f - [C_T]_{in}) + \frac{P_{CO_2f} C_{bf}}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2f}} ([CO_2^*]_g - [CO_2]_f)_{lm} \\ &\quad + \frac{Q_m}{V_{fc}} ([C_T]_m - [C_T]_f) \\ [\dot{CO}_2](t, x) &= [\dot{C}_T](t, x) / (P_2 - P_1 P_3 [CO_2](t, x)) \\ [\dot{H}^+](t, x) &= P_3 [\dot{CO}_2](t, x) \longrightarrow pH = -\log([H^+])\end{aligned}$$

Parte Gaseosa:

$$\begin{aligned}\frac{dY_{O_2out}}{dt} &= -\frac{Q_g}{V_{fc}}(Y_{O_2out} - Y_{O_2in}) + K_{la_{O_2f}} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} ([O_2^*]_g - [O_2])_{lm} \\ \frac{dY_{CO_2out}}{dt} &= -\frac{Q_g}{V_{fc}}(Y_{CO_2out} - Y_{CO_2in}) + K_{la_{CO_2f}} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} ([CO_2^*]_g - [CO_2])_{lm}\end{aligned}$$

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Resolución con “Celdas Viajeras” → Flujo Pistón

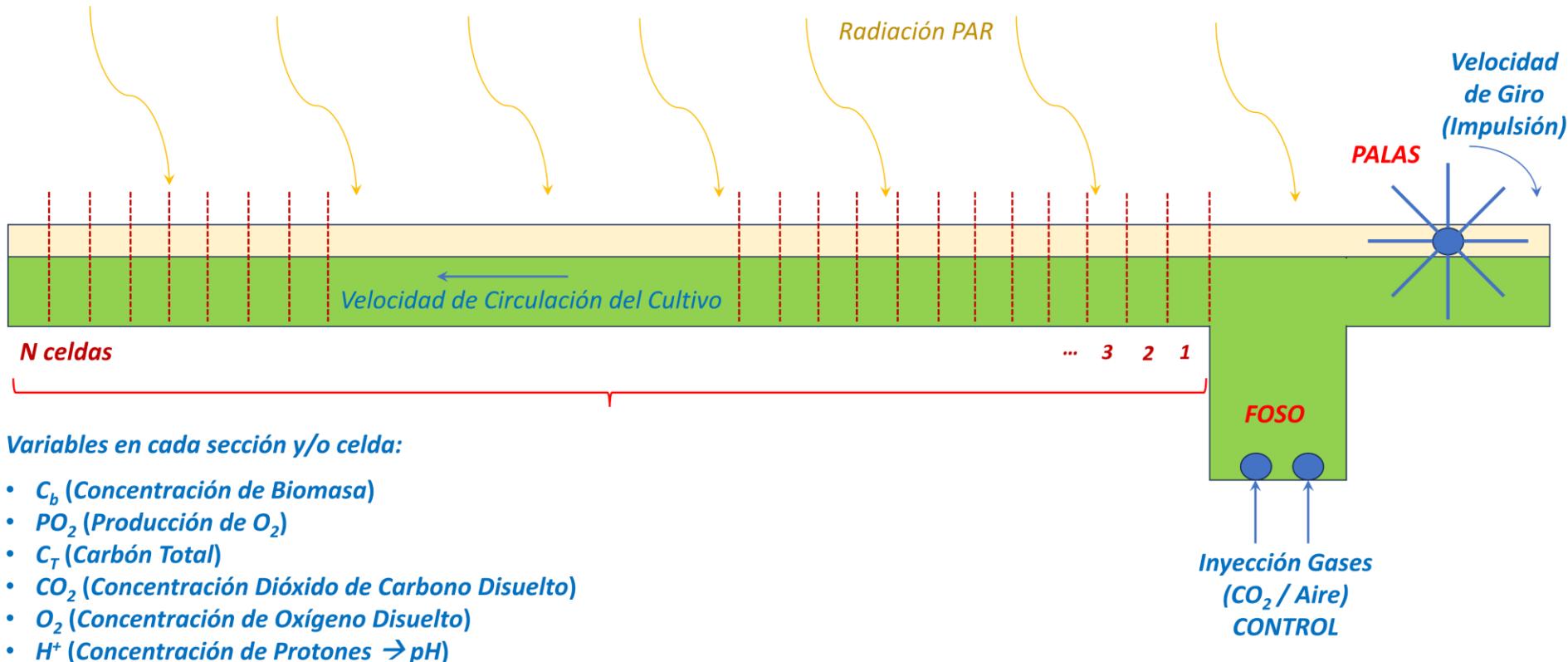


Celdas Viajeras

En cada paso de cálculo la posición de cada celda es ocupada completamente por el volumen de fluido de la celda anterior, sin mezclarse. La dinámica de las concentraciones de cada una de las celdas se mantiene aislada de las adyacentes.

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Resolución con “Celdas Viajeras” → Flujo Pistón



Celdas Viajeras → $N \approx L/(v\Delta t)$ $\Delta x = v\Delta t$

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelo dinámico de la pista para cada celda (*i*) en el instante (*k*):

$$[C_{b,i}^{(k)}] = [C_{b,i}^{(k-1)}] + P_{O_2,i}^{(k-1)} [C_{b,i}^{(k-1)}] Y_{b/O_2} \Delta t \quad \text{Concentración de Biomasa}$$

$$[O_{2,i}^{(k)}] = [O_{2,i}^{(k-1)}] + \left(\frac{P_{O_2,i}^{(k-1)} [C_{b,i}^{(k-1)}]}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2}p} ([O_2^*] - [O_{2,i}^{(k-1)}]) \right) \Delta t \quad \text{Oxígeno disuelto}$$

$$[C_{T,i}^{(k)}] = [C_{T,i}^{(k-1)}] + \left(\frac{P_{CO_2,i}^{(k-1)} [C_{b,i}^{(k-1)}]}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2}p} ([CO_2^*] - [CO_{2,i}^{(k-1)}]) \right) \Delta t \quad \text{Carbón Total}$$

$$[CO_{2,i}^{(k)}] = [CO_{2,i}^{(k-1)}] + ([C_{T,i}^{(k)}] - [C_{T,i}^{(k-1)}]) / (P_2 - P_1 P_3 [CO_{2,i}^{(k-1)}]) \quad \text{Dióxido de Carbono}$$

$$[H_i^{+(k)}] = [H_i^{+(k-1)}] + P_3 ([CO_{2,i}^{(k)}] - [CO_{2,i}^{(k-1)}]) \quad \text{Protones}$$

$$\longrightarrow pH = -\log([H^+])$$

P₁, P₂ y P₃ con las mismas expresiones anteriores

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelo Dinámico del Foso en cada instante (k):

Parte Líquida:

$$[C_{b,f}^{(k)}] = [C_{b,f}^{(k-1)}] + P_{O_2f}^{(k-1)} [C_{b,f}^{(k-1)}] Y_{b/O_2} \Delta t$$

$$[O_{2,f}^{(k)}] = [O_{2,f}^{(k-1)}] + \left(\frac{P_{O_2f}^{(k-1)} [C_{b,f}^{(k-1)}]}{M_{O_2}} + K_{la_{O_2f}} ([O_2^*]_f^{(k-1)} - [O_{2,f}^{(k-1)}])_{lm} \right) \Delta t$$

$$[C_{T,f}^{(k)}] = [C_{T,f}^{(k-1)}] + \left(\frac{P_{CO_2f}^{(k-1)} [C_{b,f}^{(k-1)}]}{M_{CO_2}} + K_{la_{CO_2f}} ([CO_2^*]_f^{(k-1)} - [CO_{2,f}^{(k-1)}])_{lm} \right) \Delta t$$

$$[CO_{2,f}^{(k)}] = [CO_{2,f}^{(k-1)}] + ([C_{T,f}^{(k)}] - [C_{T,f}^{(k-1)}]) / (P_2 - P_1 P_3 [CO_{2,f}^{(k-1)}])$$

$$[H_f^{+(k)}] = [H_f^{+(k-1)}] + P_3 ([CO_{2,f}^{(k)}] - [CO_{2,f}^{(k-1)}]) \longrightarrow pH_f = -\log ([H_f^{+(k)}])$$

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Modelo Dinámico del Foso en cada instante (k):

Parte Gaseosa:

$$Y_{O_2out}^{(k)} = Y_{O_2out}^{(k-1)} + \left(-\frac{Q_g}{V_f(1-\varepsilon)} (Y_{O_2out}^{(k-1)} - Y_{O_2in}^{(k-1)}) + K_{laO_2f} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} ([O_2^*]_g - [O_{2,f}^{(k-1)}]) \right)_{lm} \Delta t$$

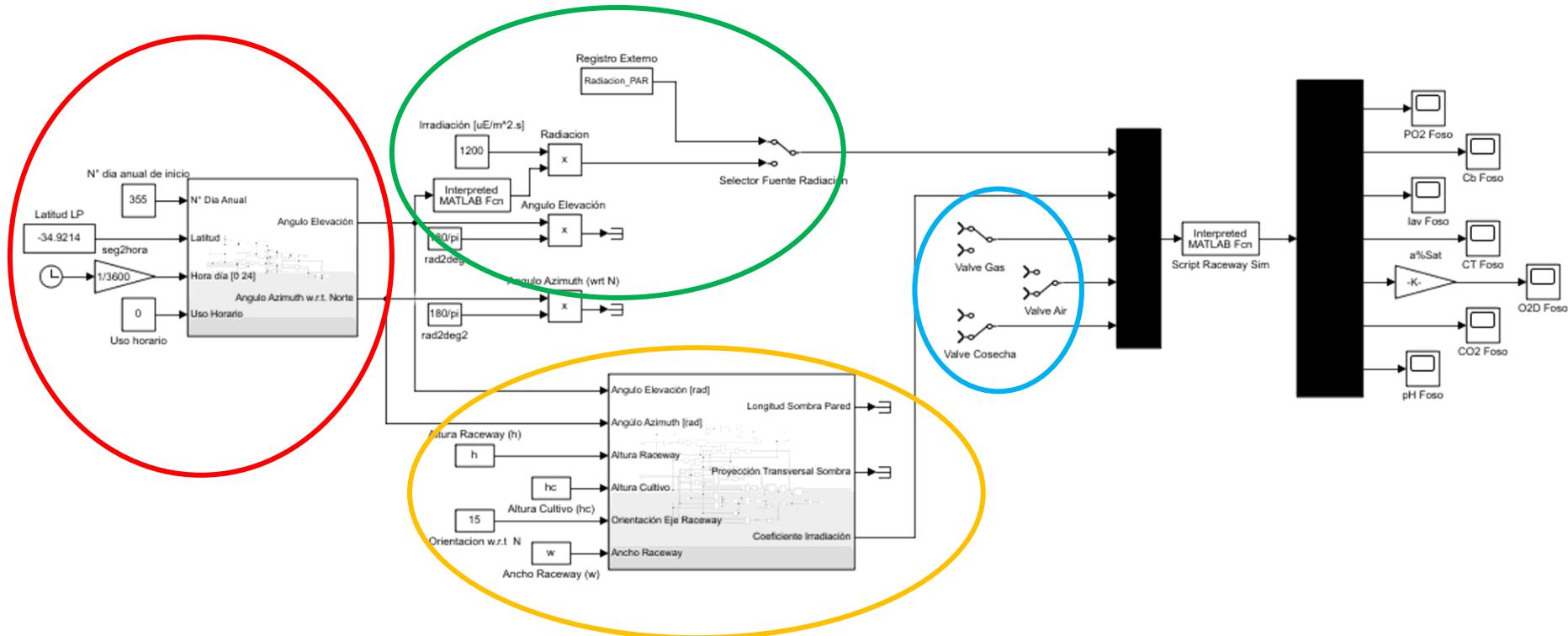
Relación Molar de O_2 a N_2 del gas escapando al ambiente

$$Y_{CO_2out}^{(k)} = Y_{CO_2out}^{(k-1)} + \left(-\frac{Q_g}{V_f(1-\varepsilon)} (Y_{CO_2out}^{(k-1)} - Y_{CO_2in}^{(k-1)}) + K_{laCO_2f} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{V_{mol}}{y_{N_2}} ([CO_2^*]_g - [CO_{2,f}^{(k-1)}]) \right)_{lm} \Delta t$$

Relación Molar de CO_2 a N_2 del gas escapando al ambiente

Fotobiorreactores Tipo “Raceway”

Primera Versión Operativa del Simulador en MATLAB®



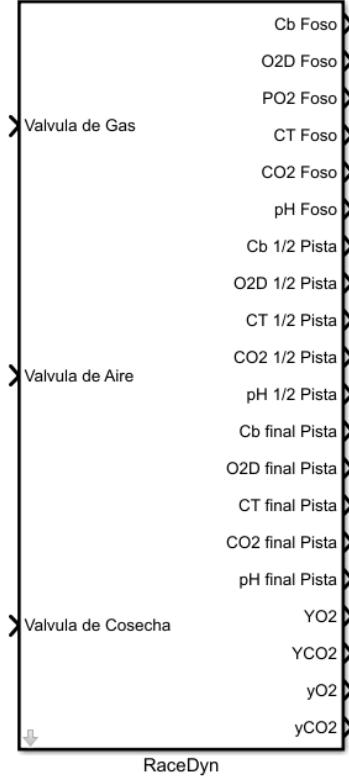
Posición, Orientación, Dia Anual y Huso Horario

Coeficiente de Sombra sobre el Cultivo

Radiación PAR senoidal o Archivo Externo

Controles (Q_g , Q_a , Q_m)

Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

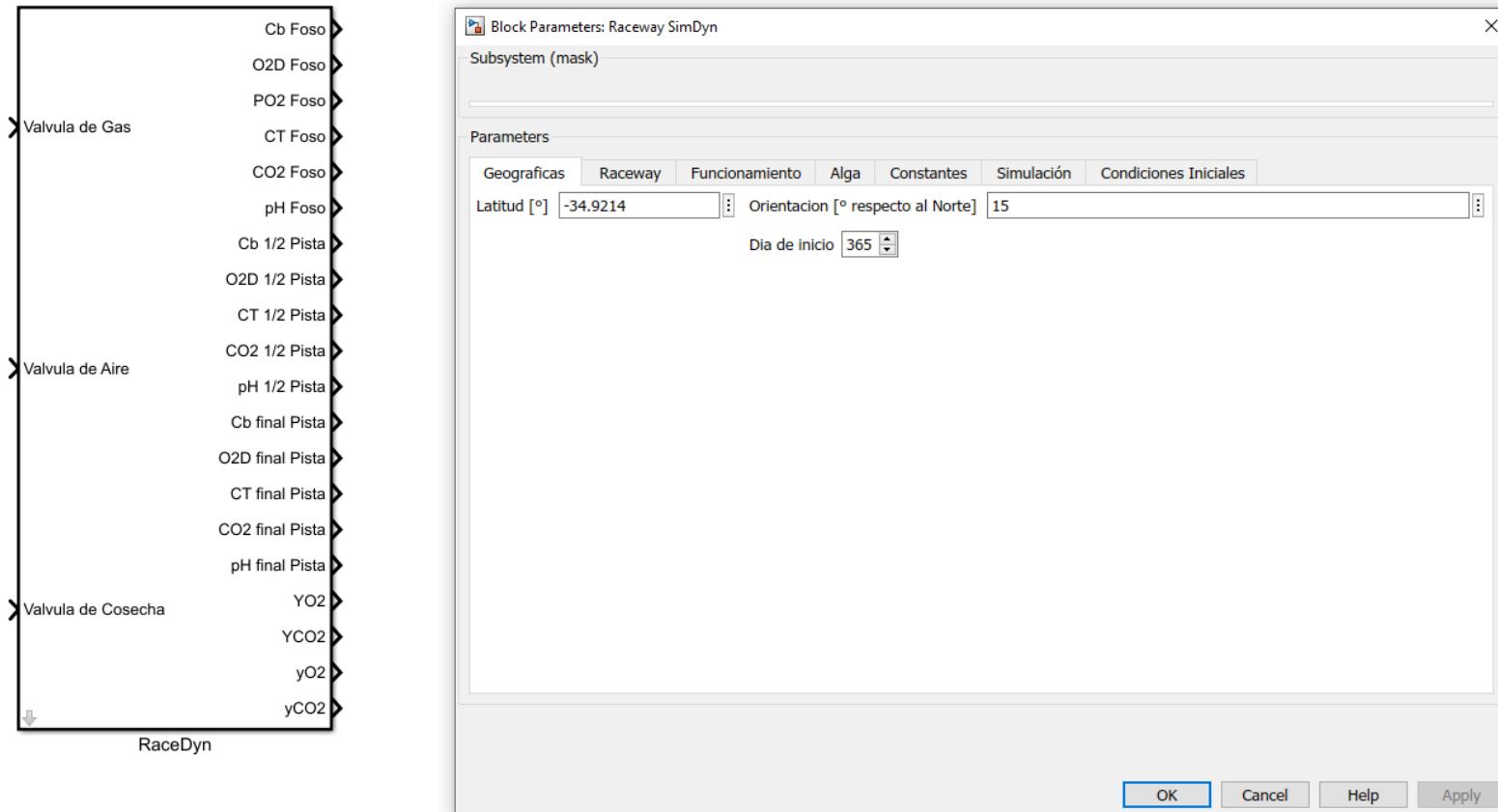


Entradas (Control) : *Válvula Gas*
Válvula Aire
Válvula Cosecha

Salidas : *Concentración de biomasa en foso, media pista y final de pista*
Concentración de O₂ disuelto en foso, media pista y final de pista
Concentración de CO₂ disuelto en foso, media pista y final de pista
Concentración de C_T en foso, media pista y final de pista
pH en foso, media pista y final de pista
Fracciones molares de O₂ y CO₂ de los gases de salida (venteo a atmósfera)

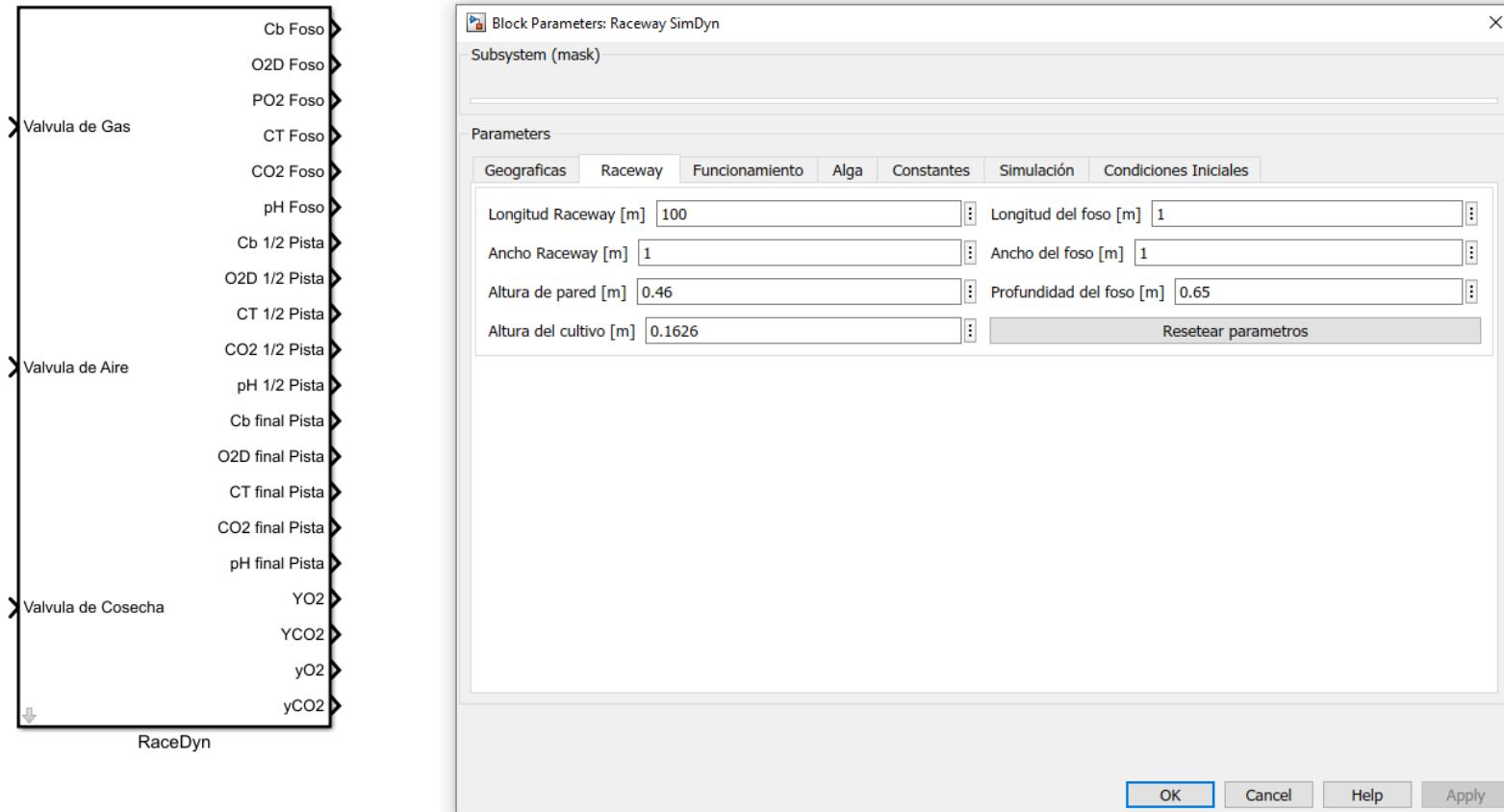
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de parámetros geográficos, orientación y estacionalidad



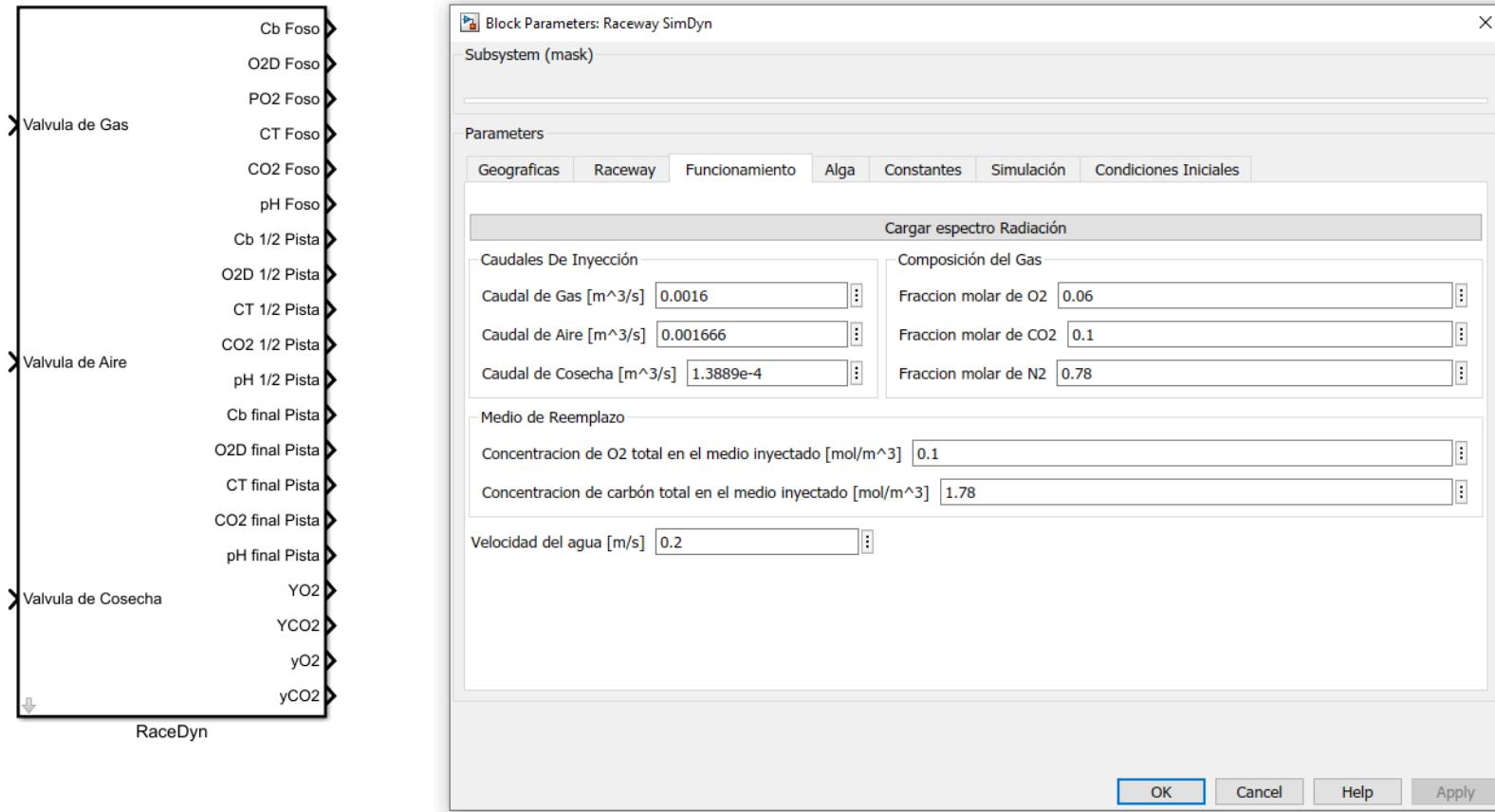
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de parámetros dimensionales del Fotobiorreactor



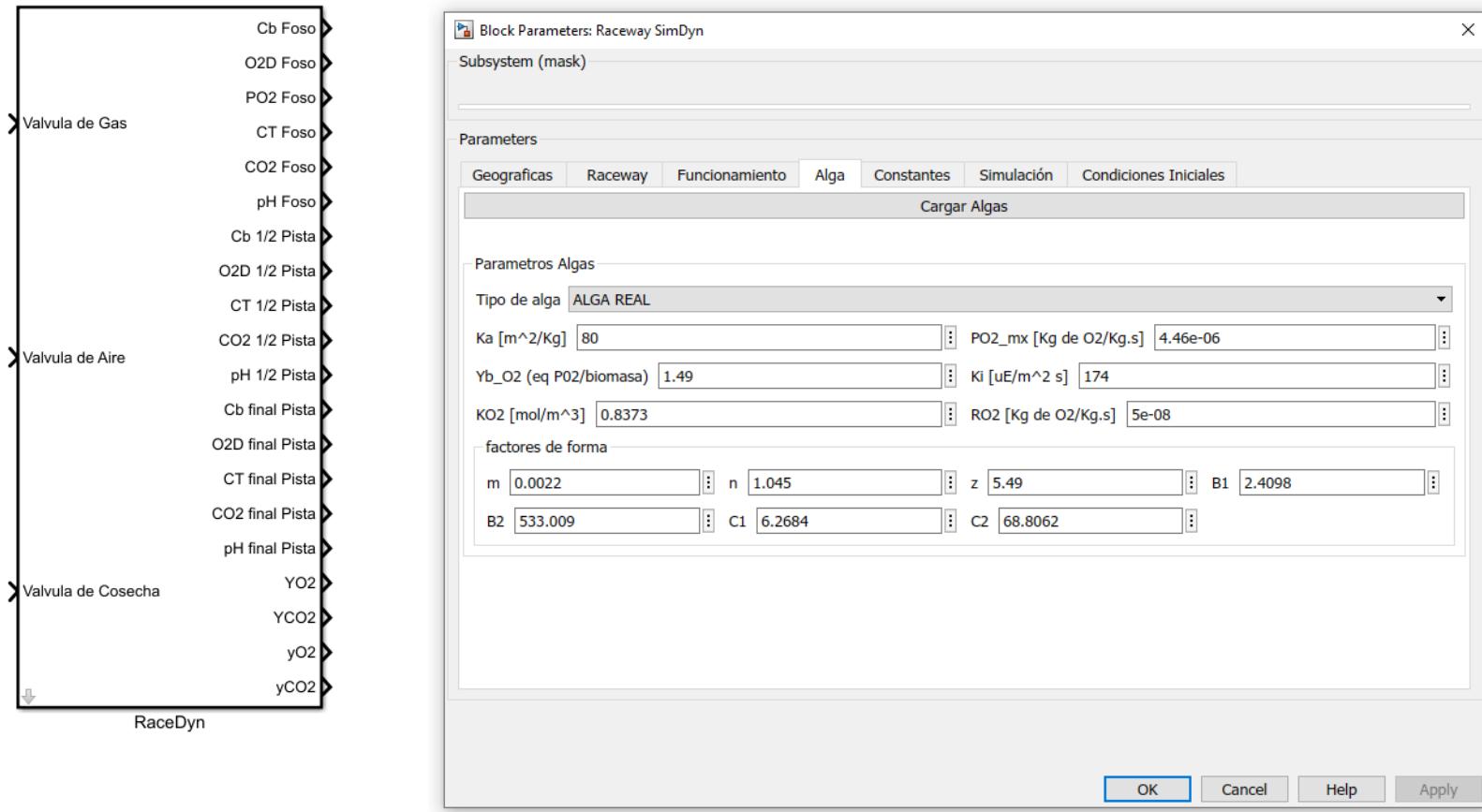
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de parámetros operativos del Fotobiorreactor



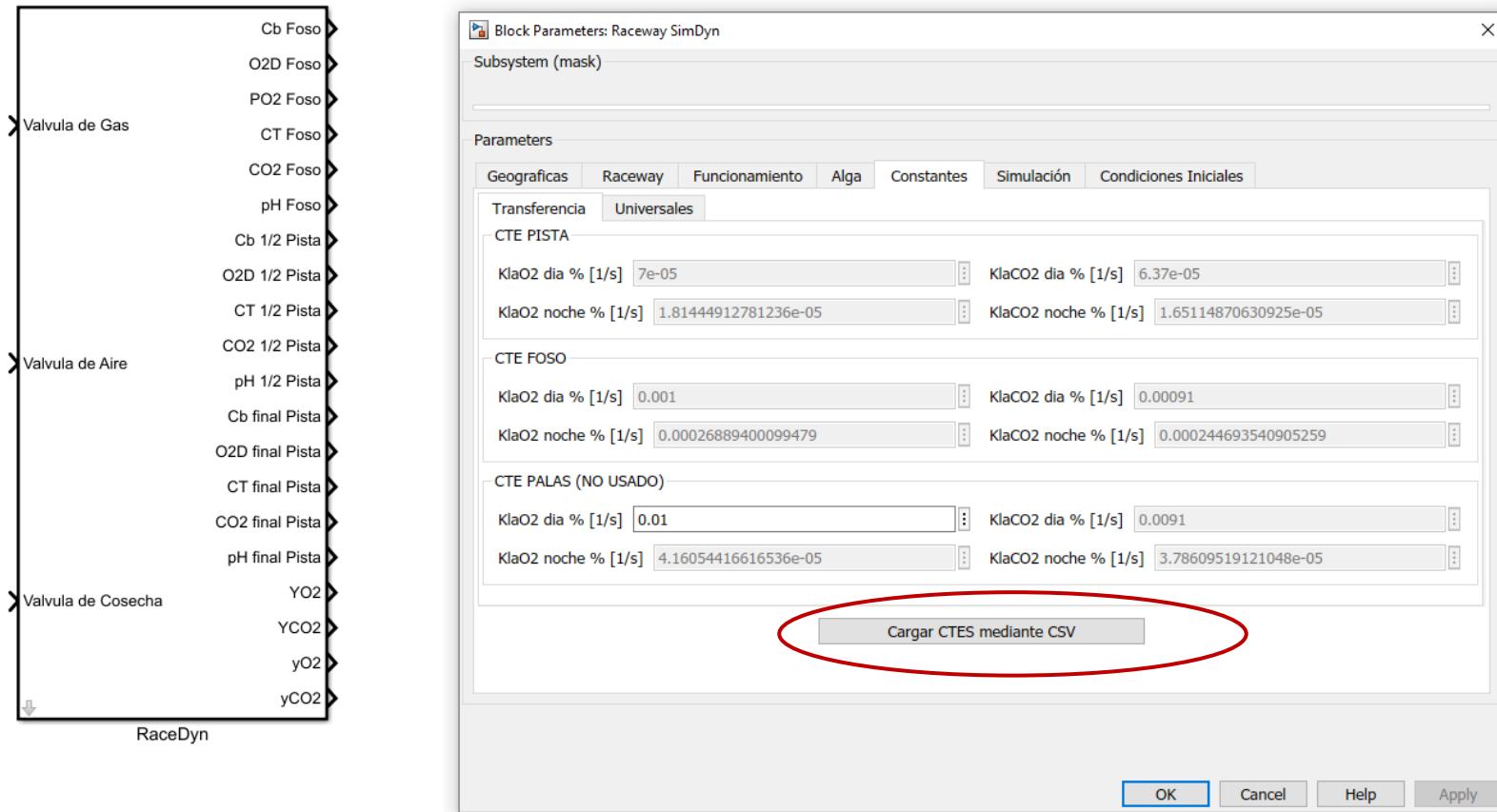
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de parámetros de la μ Alga seleccionada



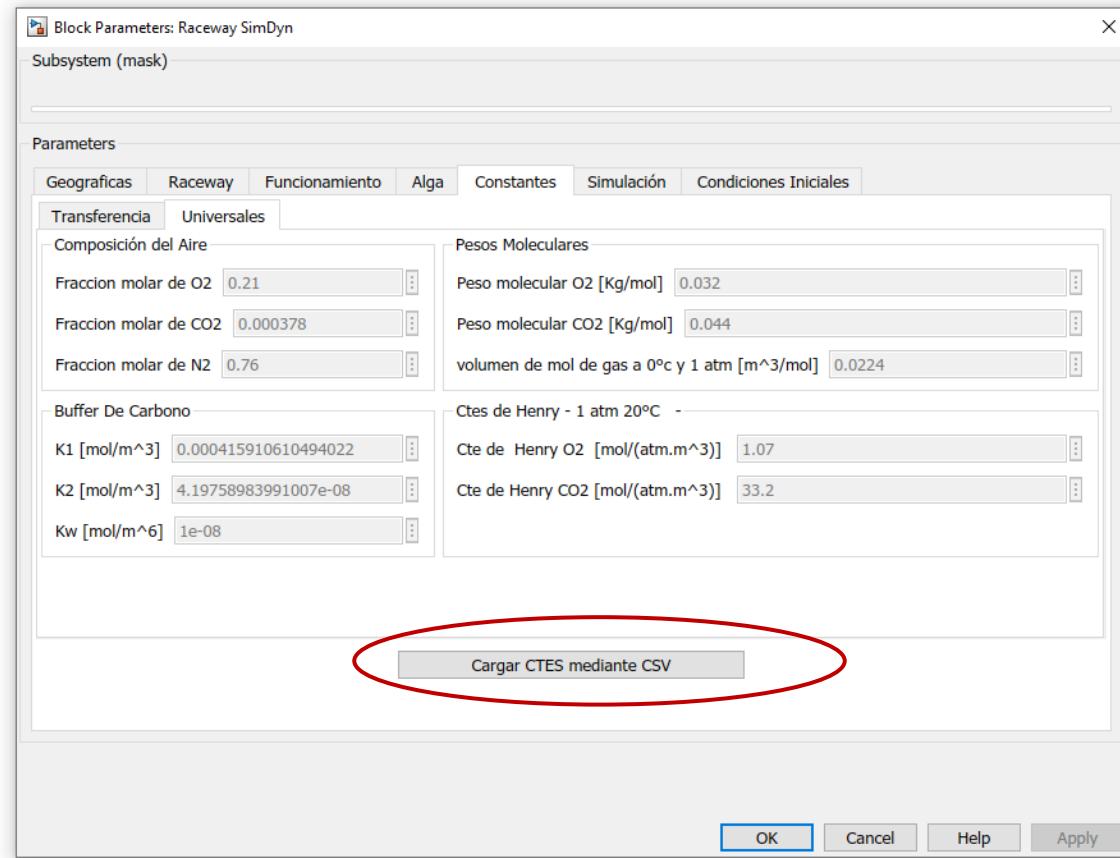
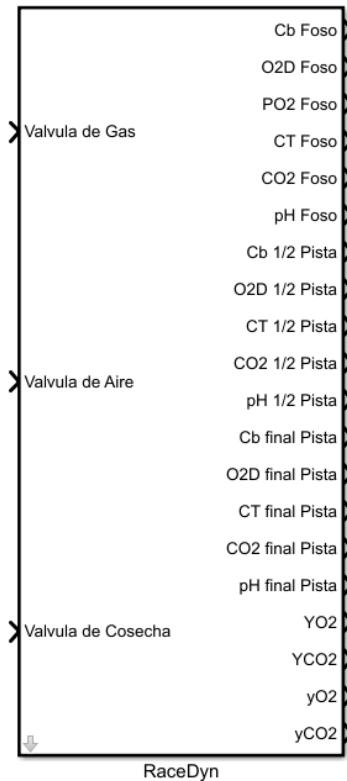
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de constantes de transferencia del Fotobiorreactor



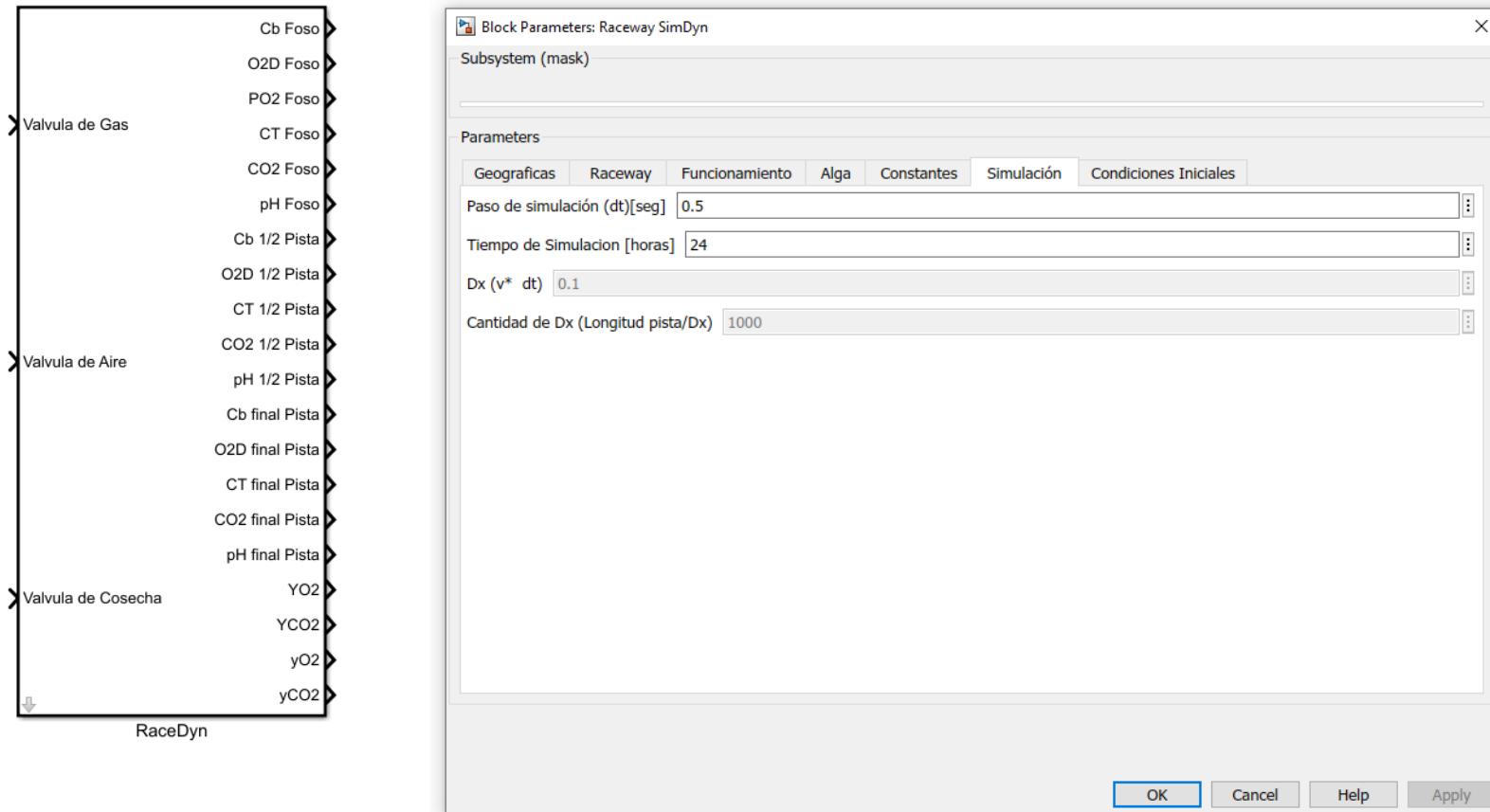
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de parámetros operativos del Fotobiorreactor



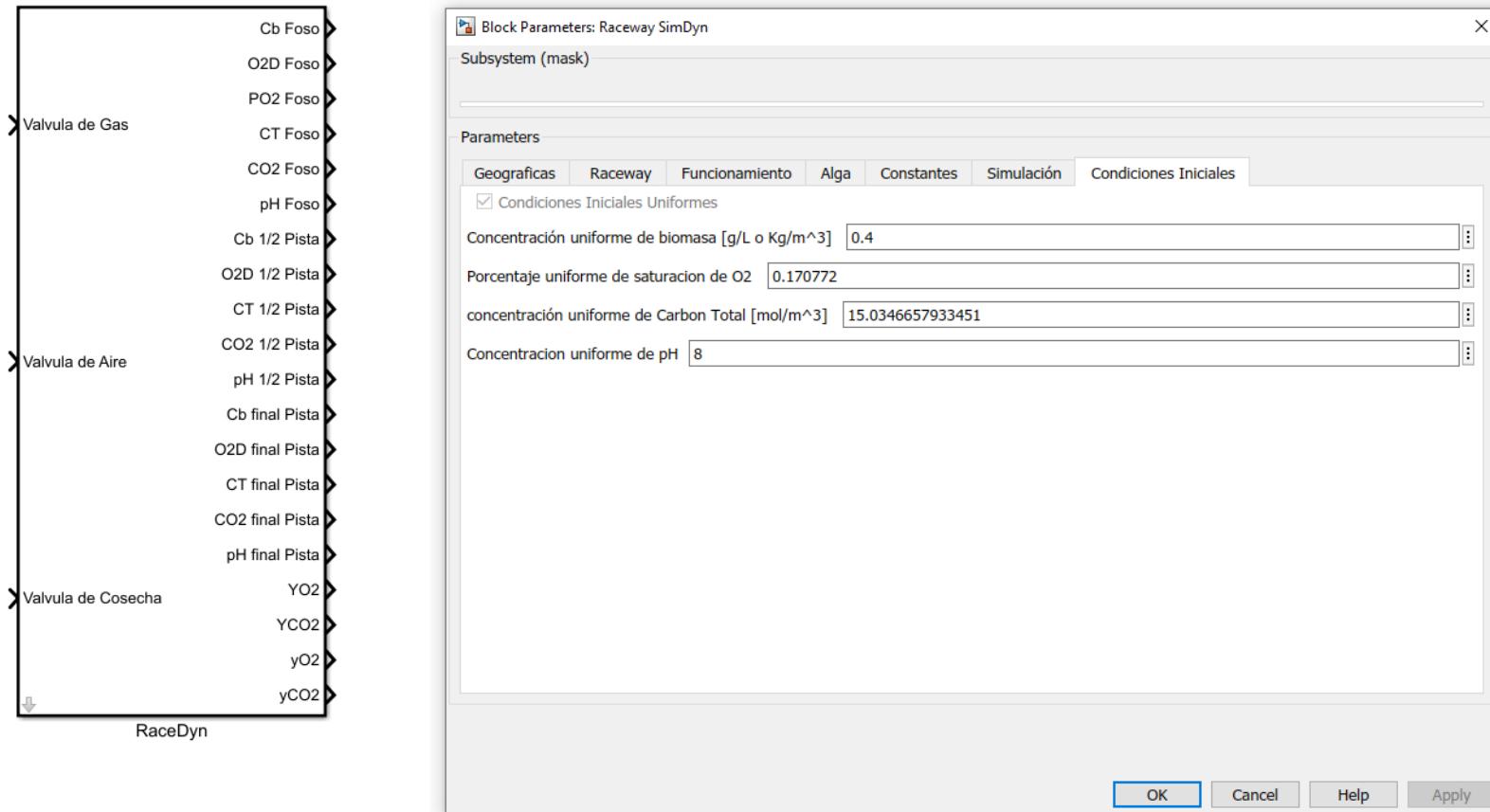
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección de paso y tiempo de simulación



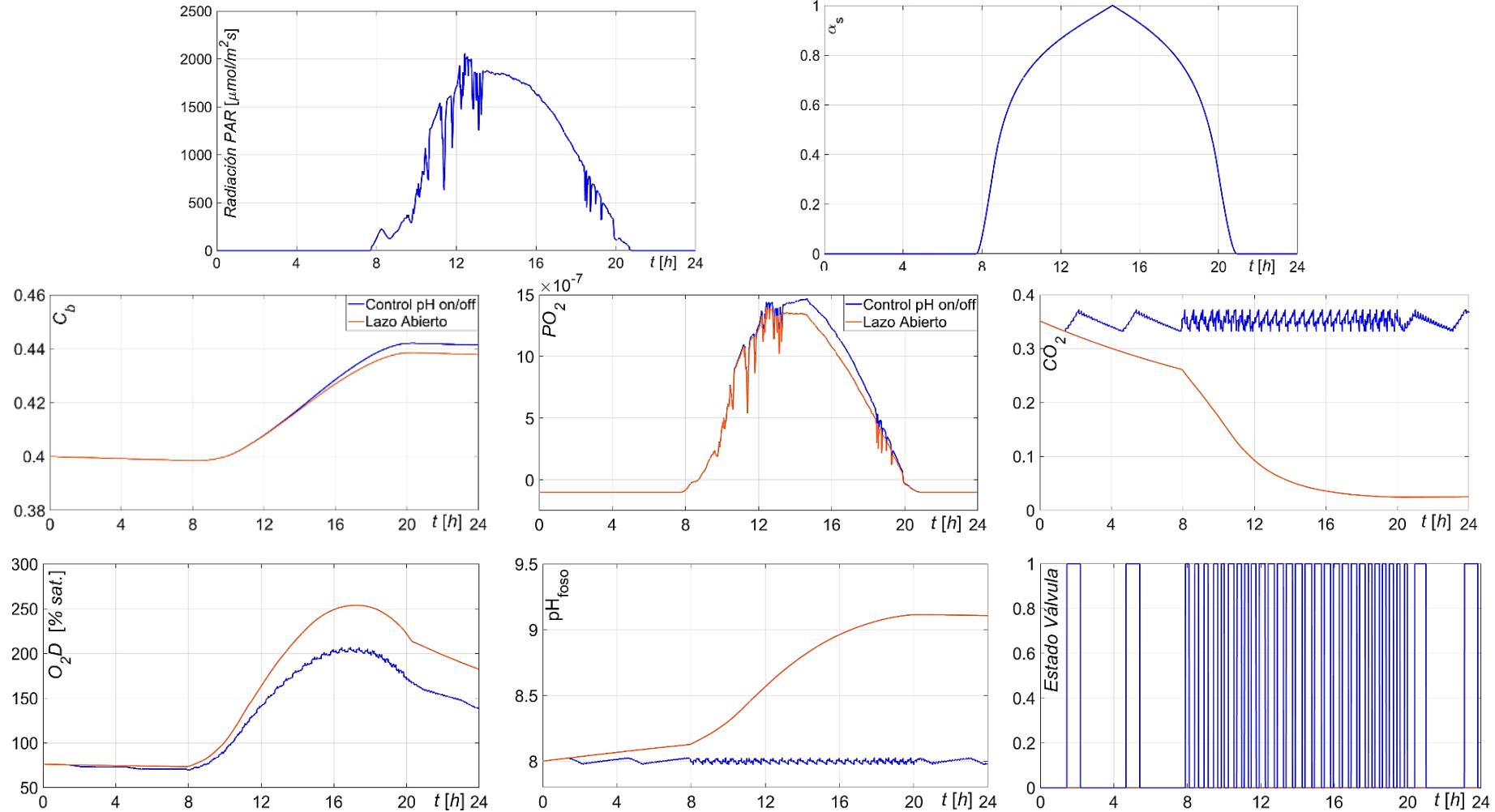
Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

Selección condiciones iniciales y características del medio de reemplazo

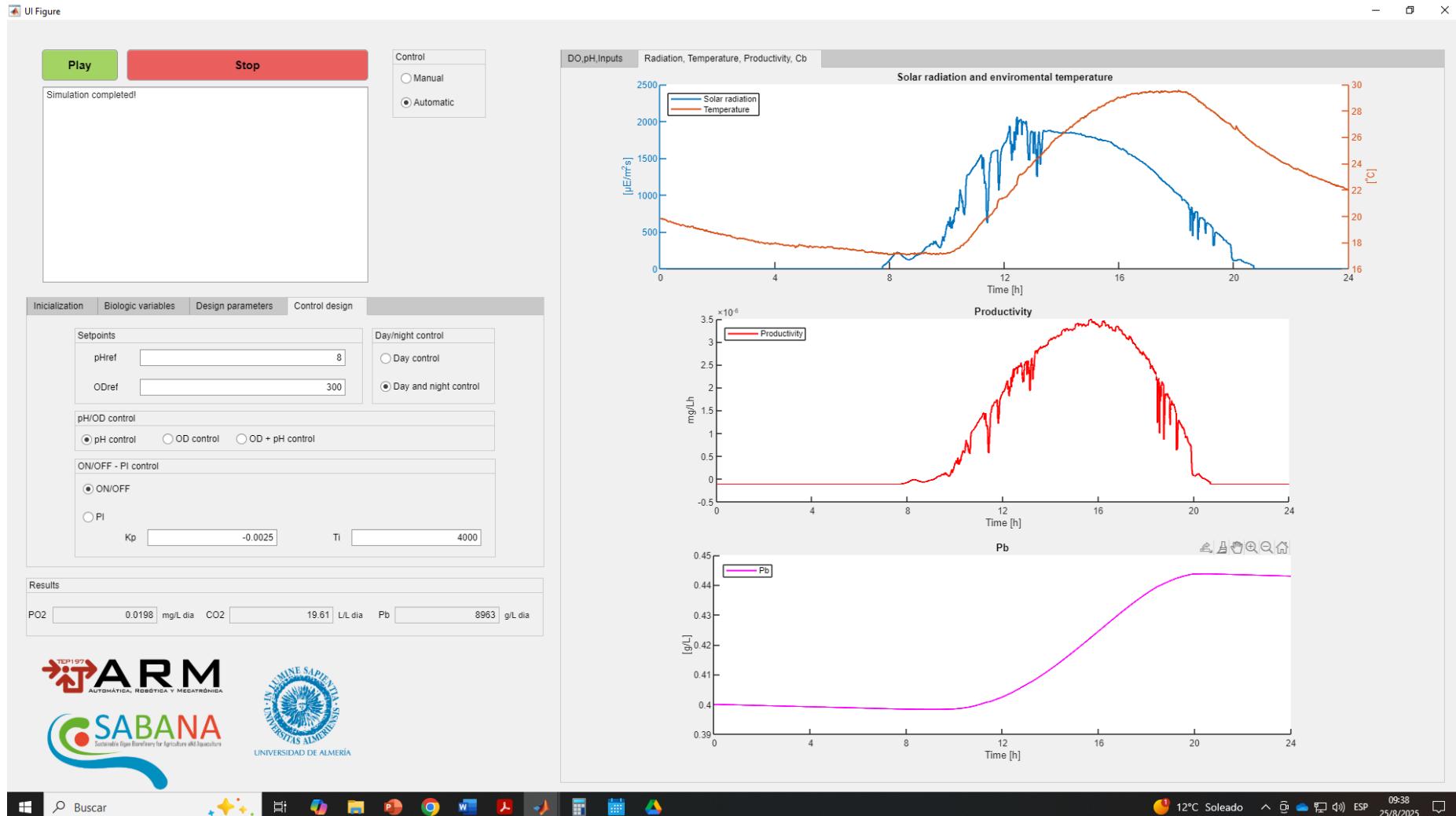


Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®

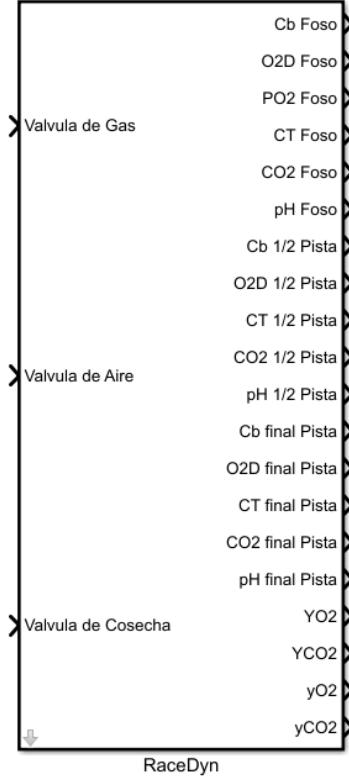
Resultados del simulador RaceDyn (S-function)



Simulador SABANA - APP MATLAB©



Simulador RaceDyn en MATLAB-SIMULINK®



Características del simulador RaceDyn (S-function)

- Permite usar perfiles de radiación y temperatura externos
- Incorpora los efectos de sombra correspondientes a la posición geográfica y días del año simulados
- Permite fijar los parámetros de la microalga cultivada
- Permite variar todos los parámetros del fotobiorreactor
- Permite modificar las condiciones operativas (velocidades, caudales, etc.)
- Permite incorporar diseños de controladores sin restricción.
- Si bien se obtuvieron resultados de simulación compatibles con diferentes trabajos en revista, resta una etapa de validación exhaustiva que permita homologarlo como herramienta



**Instituto LEICI, de Electrónica, Instrumentación,
Control y Procesamiento de Señales
Departamento de Electrotecnia- Facultad de Ingeniería-UNLP**
Grupo de Control Aplicado (GCA-LEICI)

***Simulador Dinámico Abierto de Cultivos Biológicos en
Fotobiorreactores Tipo Raceway***

Valenciaga Fernando y Nuñez Sebastián

fval@ing.unlp.edu.ar

sebastian.nuniez@ing.unlp.edu.ar