

Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



José Luis Guzmán Sánchez

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

Departamento de Informática

Universidad de Almería

joseluis.guzman@ual.es

Madrid, 29 de Abril de 2014





ÍNDICE



- 1. Introducción.**
- 2. Modelado de la producción de microalgas.**
- 3. Control de la producción de microalgas.**
- 4. Conclusiones.**

Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



1. Introducción

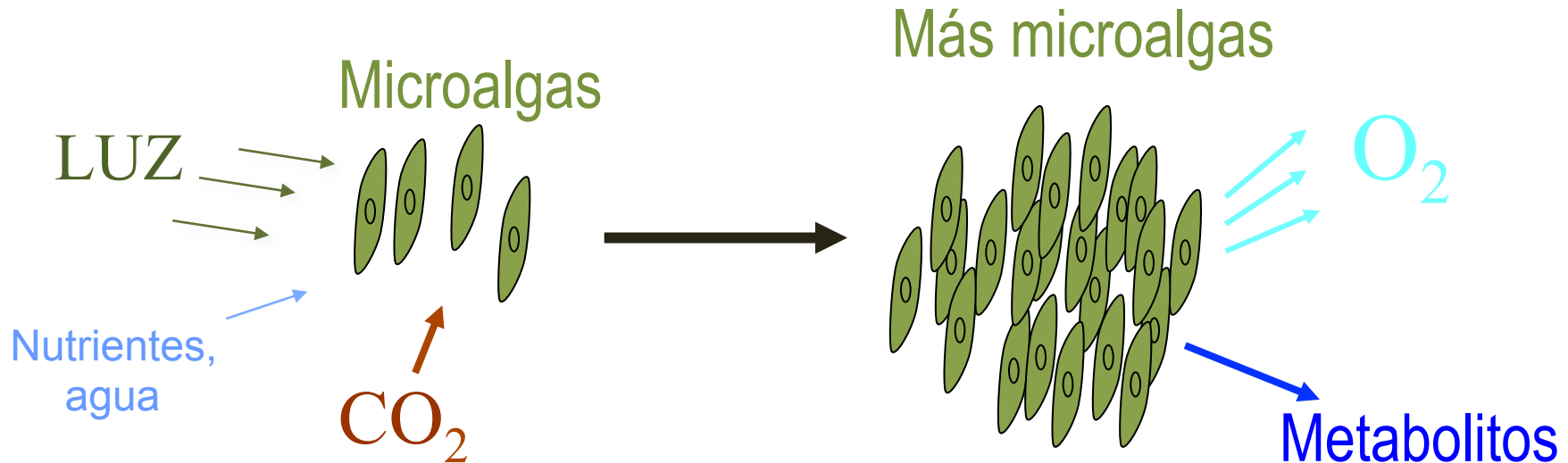
Introducción



- Campañas de **sensibilidad** sobre el medio ambiente y el coste económico de la energía.
- Desarrollo de **tecnologías** con menores emisiones de CO₂ y basadas en energías renovables.
- **Financiación** de procesos que mitiguen y almacene el CO₂ de los gases de combustión.

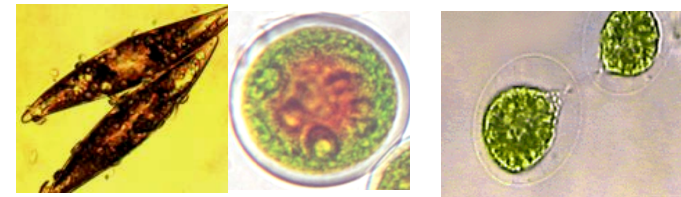
Introducción

Microorganismos unicelulares fotoautotróficos



- Microorganismos (diferencia con las macroalgas)
- Gran velocidad de duplicación por ser microorganismos
- Fotótrofos (aunque flexibles) : su fuente de energía es la luz

- Autótrofos: Su fuente de carbono es el CO_2



Introducción

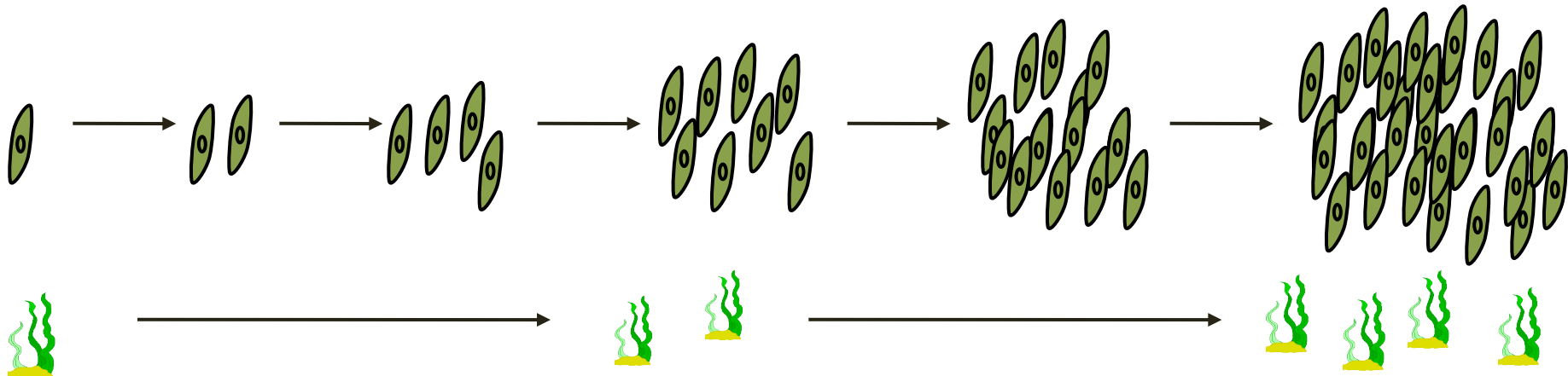
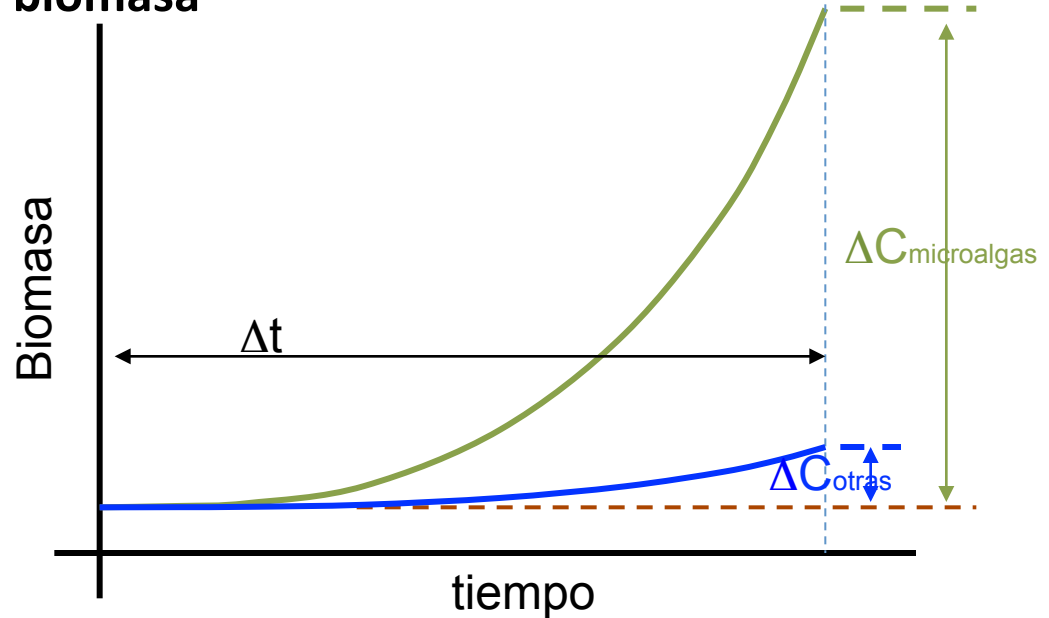
Gran capacidad de generación de biomasa

- Velocidad específica de crecimiento

$$\mu = \frac{1}{C_b} \frac{dC_b}{dt}$$

- Productividad

$$P = \mu \cdot C_b = \frac{dC_b}{dt}$$



Introducción

Utilidades de las microalgas





Introducción



Gran interés por sector industrial:



**REPSOL
YPF**



Datos de producción mundial:

Anualmente se producen unas 10000 toneladas/año de materia seca, con precios oscilando entre 30-300 €/Kg.

El precio debe ser reducido a 0.5 €/Kg para ser competitivos en el mercado del sector energético.



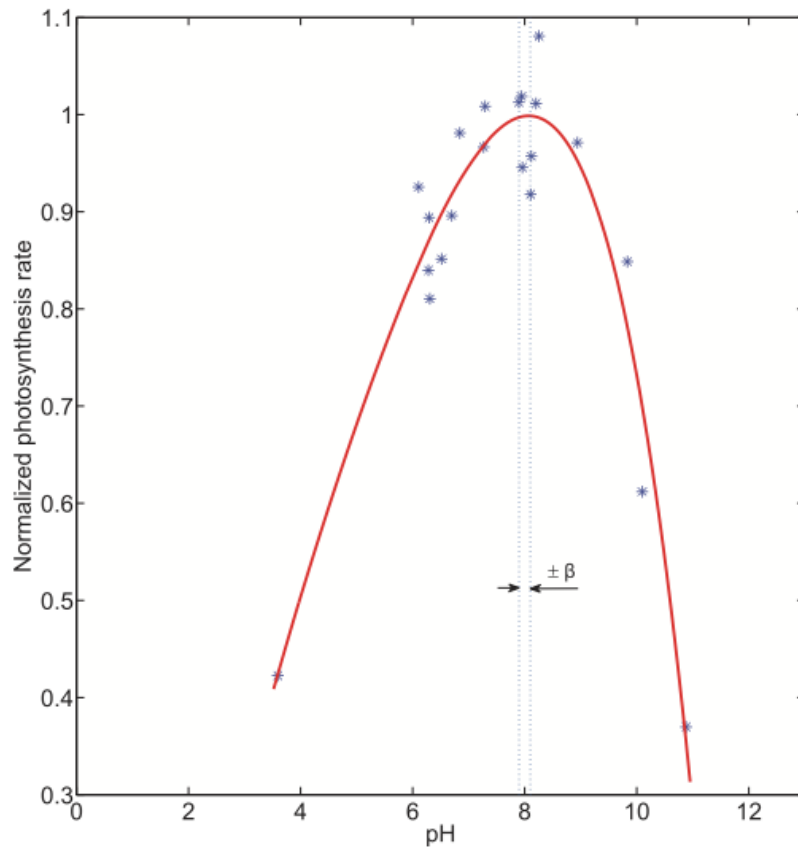
Introducción



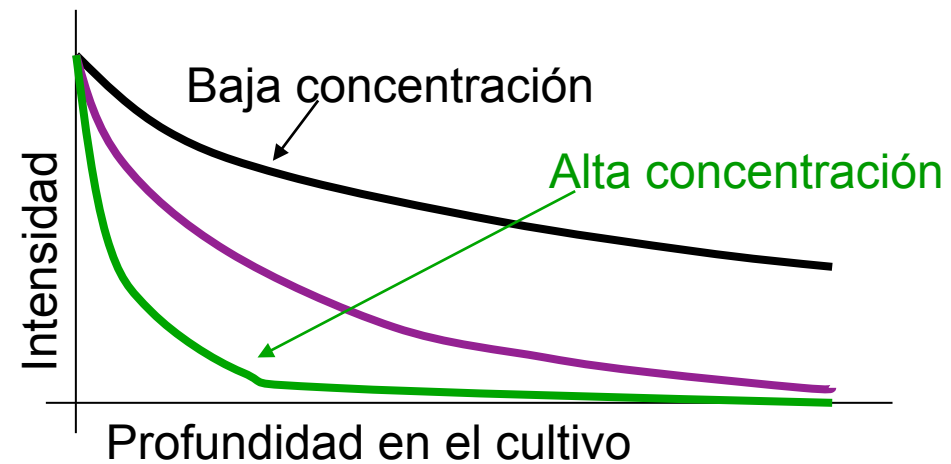
- Posibilidad de modificar la composición mediante las condiciones de cultivo:
 - Temperatura
 - Luminosidad
 - Salinidad
 - pH
- Optimización de los procesos de estabilización y extracción.

Introducción

Influencia pH



Influencia luminosidad





Introducción

Modelling, simulation, Control and Optimization of photoBIOreactors (MACROBIO)

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática – Dpto. Lenguajes y Computación.
Área de Ingeniería Química – Dpto. Ingeniería Química.
Universidad de Almería

Departamento de Informática y Automática
UNED



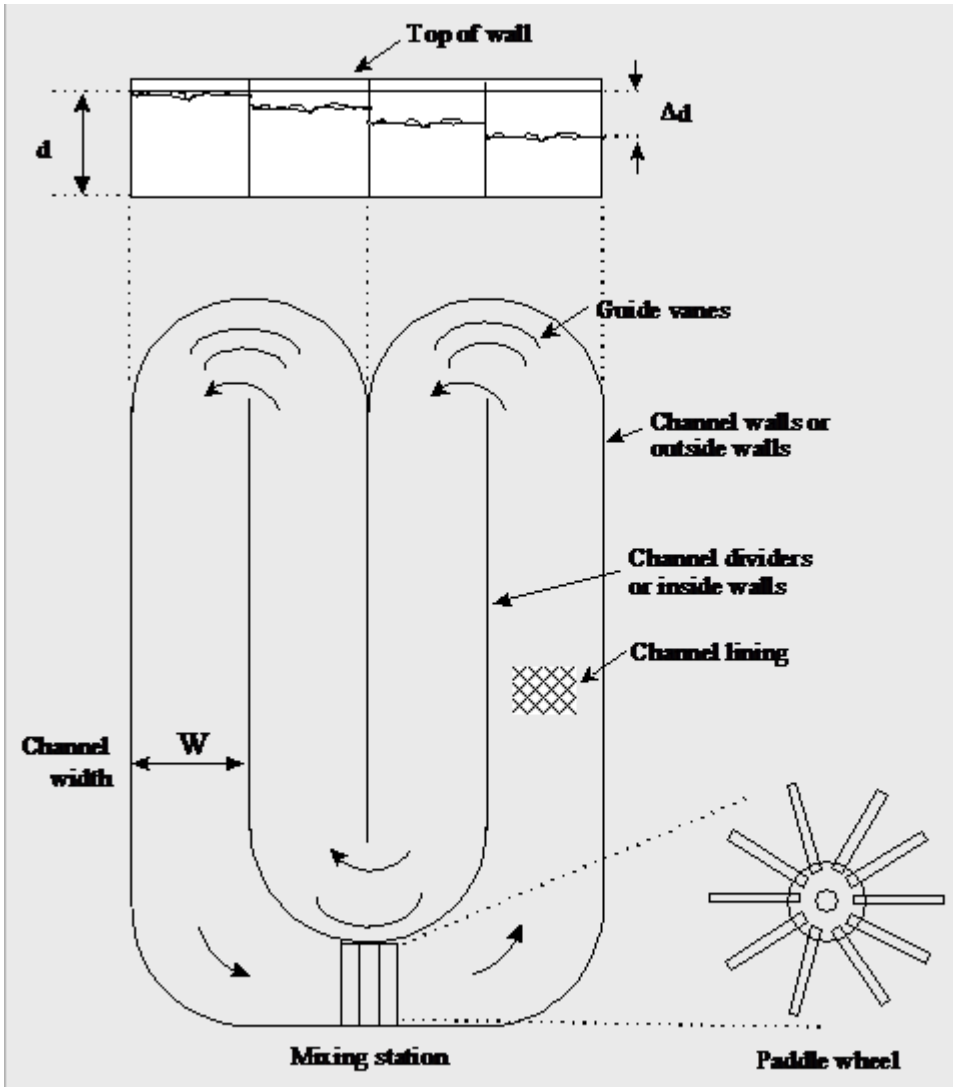


Introducción

Modelling, simulation, Control and Optimization of photobioReactors (MACROBIO)

1. Desarrollo y propuesta de estrategias de modelado e identificación para procesos basados en la producción de biomasa de microalgas.
2. Desarrollo de estrategias de control predictivo y metodologías basadas en eventos para la producción óptima de biomasa en fotobiorreactores.
3. Implementación y validación de las estrategias desarrolladas en diferentes plantas experimentales.

Introducción



Sistemas abiertos: raceways



Introducción



Columnas de burbujeo





Introducción



Fobiorreactores planos



Introducción

Fobiorreactores tubulares horizontales





Introducción





Introducción

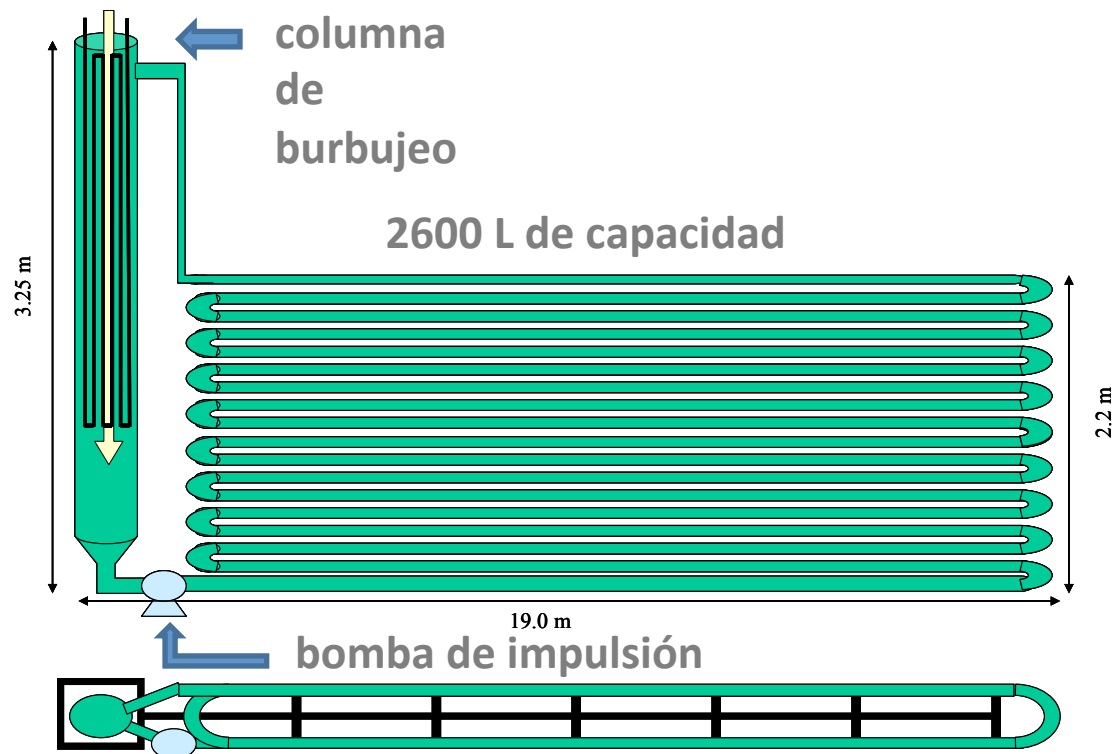


Introducción

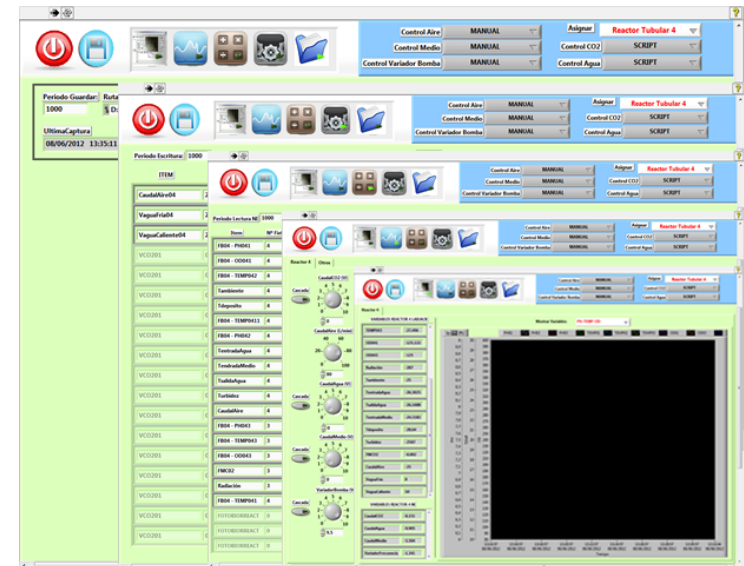


Fotobiorreactor tubular vertical Estación Experimental Las Palmerillas, Fundación Cajamar

- Lazo externo de 350 m de tubo de metacrilato con 90 mm de diámetro para aumentar superficie expuesta al sol.
- Válvulas continuas para CO₂.
- 0.6 Kg L⁻¹ d⁻¹



Introducción

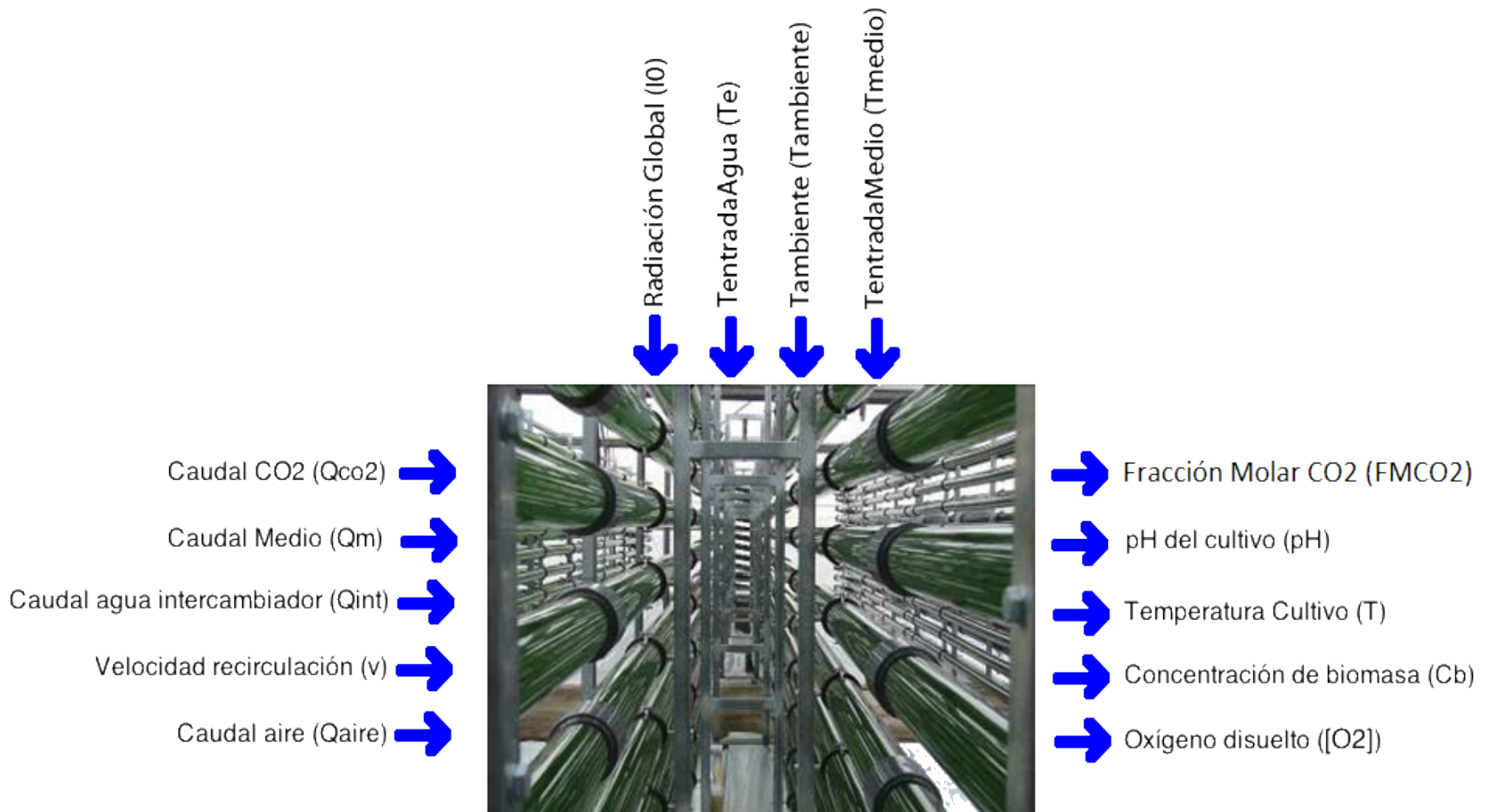


Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



2. Modelado

Modelado





Modelado



Se han desarrollado diversos tipos de modelos:

1. Modelo de parámetros concentrados basado en primeros principios.
2. Modelo basado en ecuaciones diferenciales parciales basado en primeros principios.
3. Modelo lineal simplificado.
4. Modelo NARMAX.



Modelado



Se han desarrollado diversos tipos de modelos:

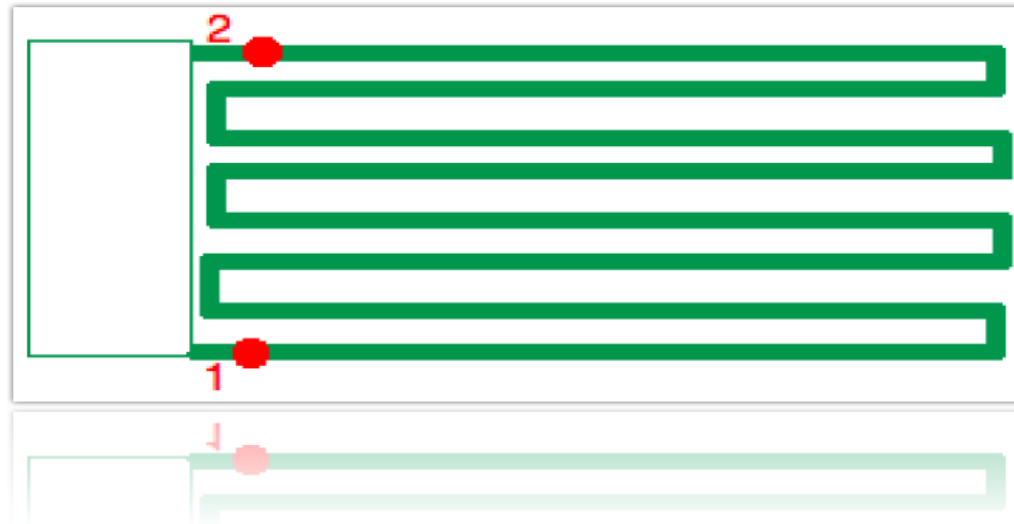
1. Modelo de parámetros concentrados basado en primeros principios.
2. Modelo basado en ecuaciones diferenciales parciales basado en primeros principios.



Modelo



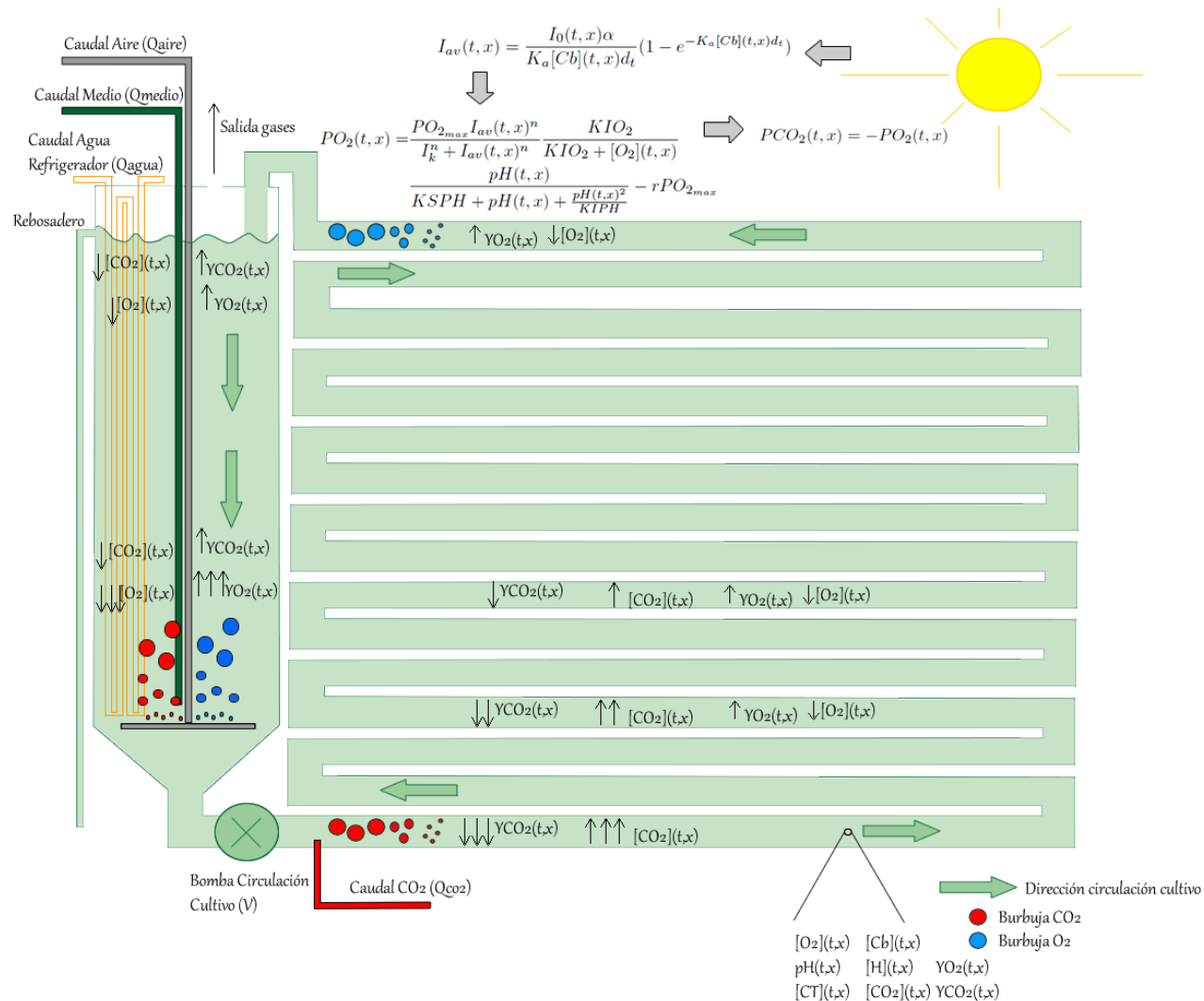
El reactor tubular se puede dividir en dos partes bien diferenciadas, la zona del desgasificador (**columna de burbujeo**), la cual se puede aproximar como un reactor de mezcla perfecta, y la zona de los ciclos de los tubos (**lazo**), considerado desde dos puntos de vista, como mezcla perfecta con retardo o como un reactor de flujo en pistón.



Los **balances de materia** se basan en la ley de conservación de la materia

$$\text{Entrada} + \text{Generación} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

Modelado





Fotosíntesis y productividad



$$P_{O_2} = \frac{P_{O_2, \max} I_{av}^n}{K_i \exp(I_{av} m) + I_{av}^n} \left(1 - \left(\frac{[O_2]}{K_{O_2}} \right)^z \right) \\ \times \left(B1 \exp\left(\frac{-C1}{pH}\right) - B2 \exp\left(\frac{-C2}{pH}\right) \right) - rC_b$$

$$I_{av} = \frac{I_0 \alpha}{K_a C_b d_t} (1 - \exp(-K_a C_b d_t))$$

$$P_{CO_2} = -P_{O_2}$$



Balances en el lazo: estado líquido



Concentración:

$$V_l(1 - \epsilon_l) \frac{dC_{b,out}}{dt} = -Q_{liq}(C_{b,out} - C_{b,in}(t - d_{in})) + V_l(1 - \epsilon_l) P_{O_2,l} C_{b,out} Y_{p/x} \quad L_l = \int_0^{d_{in}} v(t) dt$$

Oxígeno disuelto:

$$V_l(1 - \epsilon_l) \frac{d[O_2]_{out}}{dt} = -Q_{liq}([O_2]_{out} - [O_2]_{in}(t - d_{in})) + \frac{P_{O_2,l} V_l(1 - \epsilon_l) C_{b,out}}{M_{O_2}} + K_l a_{l,O_2,l} ([O_2]^* - [O_2])_{am} V_l(1 - \epsilon_l) \quad (6)$$

Carbono inorgánico total:

$$V_l(1 - \epsilon_l) \frac{d[C_T]_{out}}{dt} = -Q_{liq}([C_T]_{out} - [C_T]_{in}(t - d_{in})) + \frac{P_{CO_2,l} V_l(1 - \epsilon_l) C_{b,out}}{M_{CO_2}} + K_l a_{l,CO_2,l} ([CO_2]^* - [CO_2])_{am} V_l(1 - \epsilon_l) \quad (9)$$



Balances en el lazo: estado líquido



Relación entre pH y CO₂:

$$K_w = [OH^-][H^+] = 10^{-14}$$

$$K_1 = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[CO_2]} = 10^{-6.381}$$

$$K_2 = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} = 10^{-10.377}$$

$$[C_T] = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$$

$$\frac{d[C_T]}{dt} = \left(1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1 K_2}{[H^+]^2}\right) \frac{d[CO_2]}{dt} - [CO_2] \left(\frac{K_1}{[H^+]^2} + \frac{2K_1 K_2}{[H^+]^3}\right) \frac{d[H^+]}{dt}$$

$$\frac{d[H^+]}{dt} + \frac{d[Cat^+]}{dt} = \frac{d[OH^-]}{dt} + \frac{d[HCO_3^-]}{dt} + \frac{2d[CO_3^{2-}]}{dt} + \frac{d[An^-]}{dt}$$

$$\frac{d[H^+]}{dt} = \frac{\frac{K_1}{[H^+]} + \frac{2K_1 K_2}{[H^+]^2}}{1 + \frac{K_w}{[H^+]^2} + \frac{K_1[CO_2]}{[H^+]^2} + 4\frac{2K_1 K_2}{[H^+]^3}} \frac{d[CO_2]}{dt}$$

$$pH = -\log_{10}([H^+])$$



Balances en el lazo: estado gaseoso



Fracción molar de CO₂:

$$\frac{V_l \epsilon_l y_{N_2}}{V_{mol}} \frac{dY_{CO_2, out}}{dt} = -F_{N_2} (Y_{CO_2, out} - Y_{CO_2, in}(t - d_{in})) - K_l a_{l, CO_2 l} ([CO_2^*] - [CO_2])_{am} V_l (1 - \epsilon_l).$$

Fracción molar de O₂:

$$\frac{V_l \epsilon_l y_{N_2}}{V_{mol}} \frac{dY_{O_2, out}}{dt} = -F_{N_2} (Y_{O_2, out} - Y_{O_2, in}(t - d_{in})) - K_l a_{l, O_2 l} ([O_2^*] - [O_2])_{am} V_l (1 - \epsilon_l)$$



Balances en la columna: estado líquido



Concentración:

$$V_c(1 - \epsilon_c) \frac{dC_{b,out}}{dt} = -Q_{liq}(C_{b,out} - C_{b,in}) + V_c(1 - \epsilon_c) P_{O_2,c} C_{b,out} Y_{p/x} - Q_m C_{b,out}$$

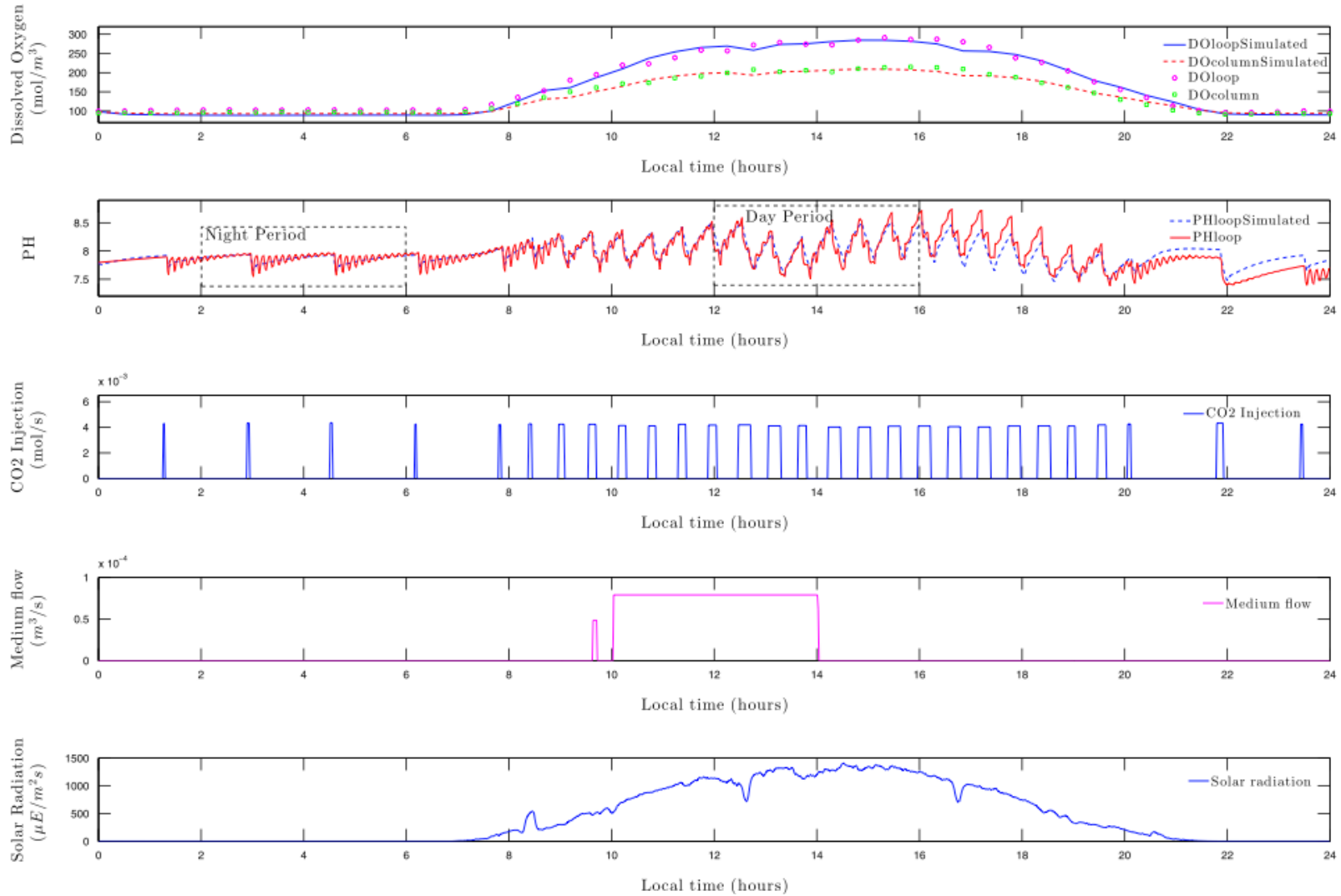
Oxígeno disuelto:

$$V_c(1 - \epsilon_c) \frac{d[O_2]_{out}}{dt} = -Q_{liq}([O_2]_{out} - [O_2]_{in}) + \frac{P_{O_2,c} V_c(1 - \epsilon_c) C_{b,out}}{M_{O_2}} + K_l a_{l,O_2,c} ([O_2^*] - [O_2])_{am} V_c(1 - \epsilon_c) - Q_m([O_2]_{out} - [O_2]_m)$$

Carbono inorgánico total:

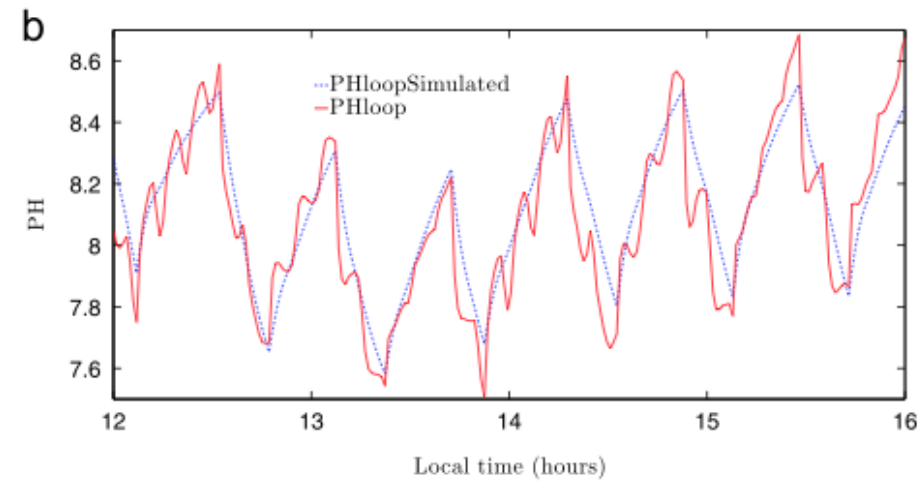
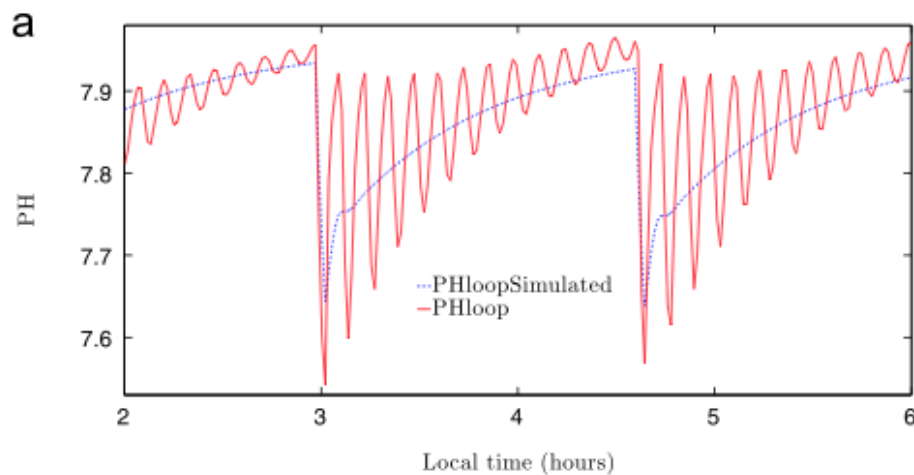
$$V_c(1 - \epsilon_c) \frac{d[C_T]_{out}}{dt} = -Q_{liq}([C_T]_{out} - [C_T]_{in}) + \frac{P_{CO_2,c} V_c(1 - \epsilon_c) C_{b,out}}{M_{CO_2}} + K_l a_{l,CO_2,c} ([CO_2^*] - [CO_2])_{am} V_c(1 - \epsilon_c) - Q_m([C_T]_{out} - [C_T]_m)$$

Modelo param. concentrados





Modelo param. concentrados



Modelo con EDP

Si se tiene en cuenta que la parte del lazo es un reactor flujo pistón, se tendrá que contemplar la **dimensión longitudinal** de los tubos (x), transformando las ecuaciones que describen esta parte del reactor en:

$$P_{O_2}(t, x) = \frac{P_{O_2, \max} I_{av}(t, x)^n}{K_i \exp(I_{av}(t, x)m) + I_{av}(t, x)^n} \left(1 - \left(\frac{[O_2](t, x)}{K_{O_2}} \right)^z \right) \\ \left(B_1 \exp\left(\frac{-C_1}{pH(t, x)}\right) - B_2 \exp\left(\frac{-C_2}{pH(t, x)}\right) \right) \\ \left(A_1 \exp\left(\frac{-Ea_1}{RT(t, x)}\right) - A_2 \exp\left(\frac{-Ea_2}{RT(t, x)}\right) \right) - r P_{O_2, \max}$$

$$A_{liq,l}(t, x) \frac{\partial C_b(t, x)}{\partial t} = -Q_{liq,l}(t, x) \frac{\partial C_b(t, x)}{\partial x} + \\ A_{liq,l}(t, x) P_{O_2}(t, x) C_b(t, x) Y_{o/x}$$

$$A_{liq,l}(t, x) \frac{\partial [O_2](t, x)}{\partial t} = -Q_{liq,l}(t, x) \frac{\partial [O_2](t, x)}{\partial x} + \\ A_{liq,l}(t, x) \frac{P_{O_2}(t, x) C_b(t, x)}{M_{O_2}} + A_{liq,l}(t, x) K_l a_{l, O_2 l}(t, x) ([O_2^*](t, x) - [O_2](t, x))$$

$$A_{liq,l}(t, x) \frac{\partial [C_T](t, x)}{\partial t} = -Q_{liq,l}(t, x) \frac{\partial [C_T](t, x)}{\partial x} + \\ A_{liq,l}(t, x) \frac{P_{CO_2}(t, x) C_b(t, x)}{M_{CO_2}} + A_{liq,l}(t, x) K_l a_{l, CO_2 l}(t, x) ([CO_2^*](t, x) - [CO_2](t, x))$$



Modelo con EDP

Si se tiene en cuenta que la parte del lazo es un reactor flujo pistón, se tendrá que contemplar la **dimensión longitudinal** de los tubos (x), transformando las ecuaciones que describen esta parte del reactor en:

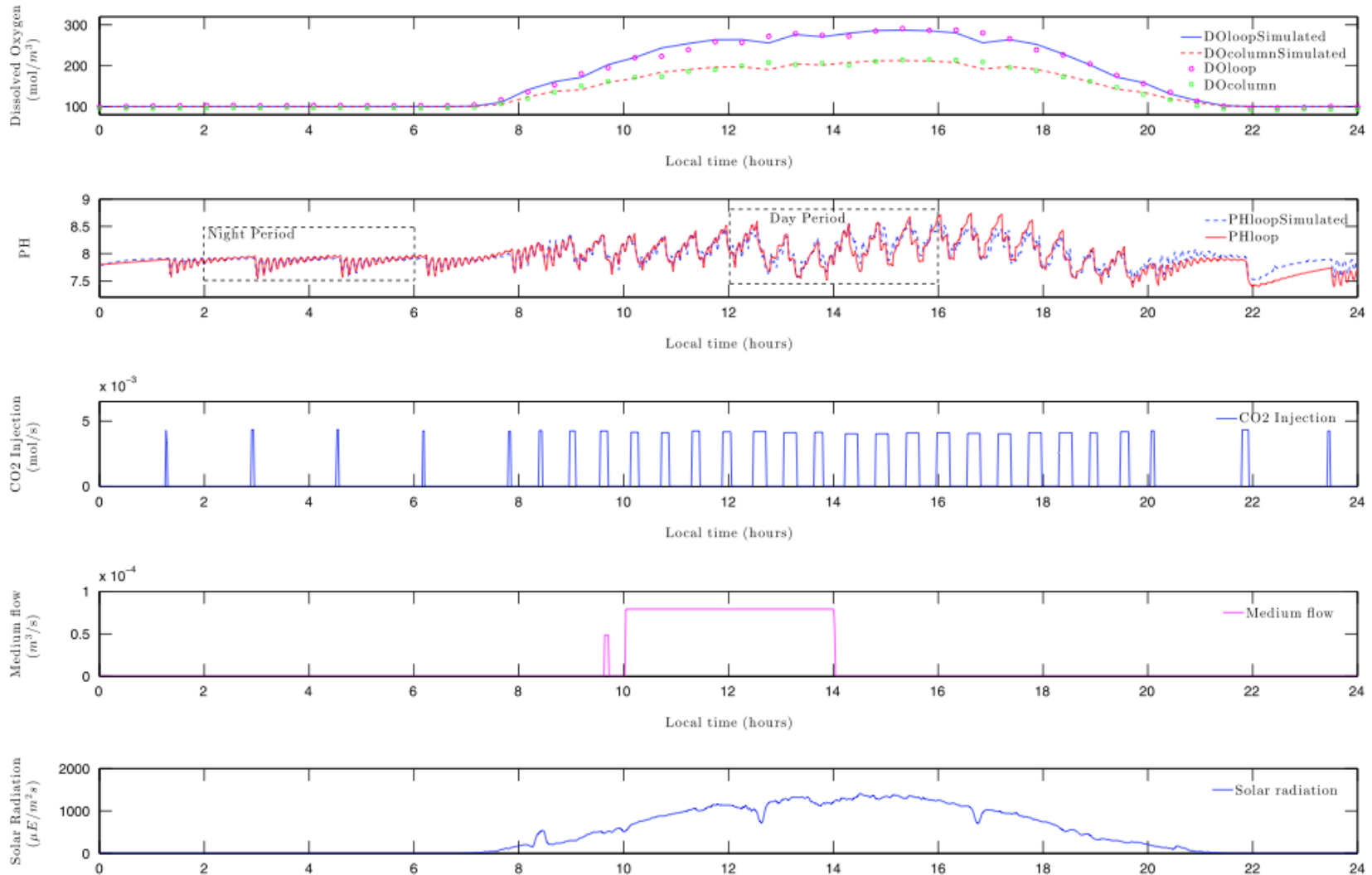
$$A_{gas,l}(t, x) \frac{\partial Y_{O_2}(t, x)}{\partial t} = - \frac{F_{N_2,l}(t, x) V_{mol}}{y_{N_2,l}} \frac{\partial Y_{O_2}(t, x)}{\partial x} - \frac{A_{liq,l}(t, x) V_{mol}}{y_{N_2,l}} K_l a_{l,O_2l}(t, x) ([O_2^*](t, x) - [O_2](t, x))$$

$$V_{gas,c}(t) \frac{dY_{O_2,out}(t)}{dt} = - \frac{F_{N_2,c}(t) V_{mol}}{y_{N_2,c}} (Y_{O_2,out}(t) - Y_{O_2,in}(t)) - \frac{V_{liq,c}(t) V_{mol}}{y_{N_2,c}} K_l a_{l,O_2c}(t) ([O_2^*](t) - [O_2](t))_{lm}$$

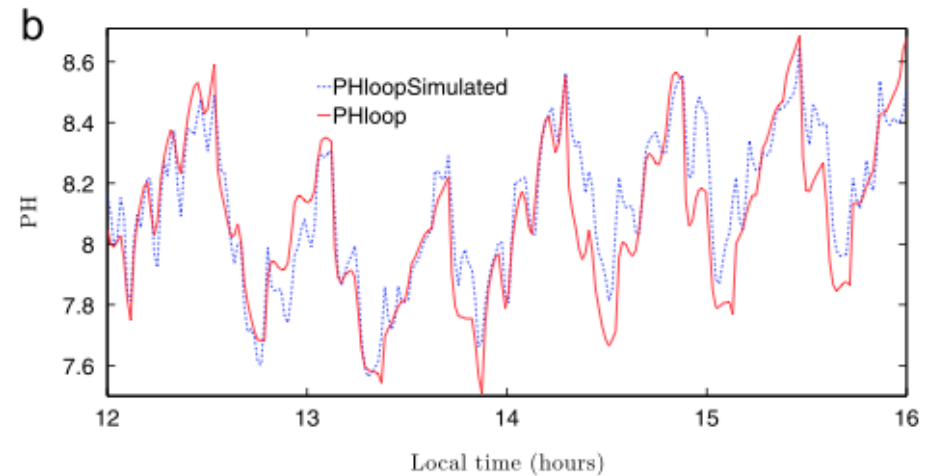
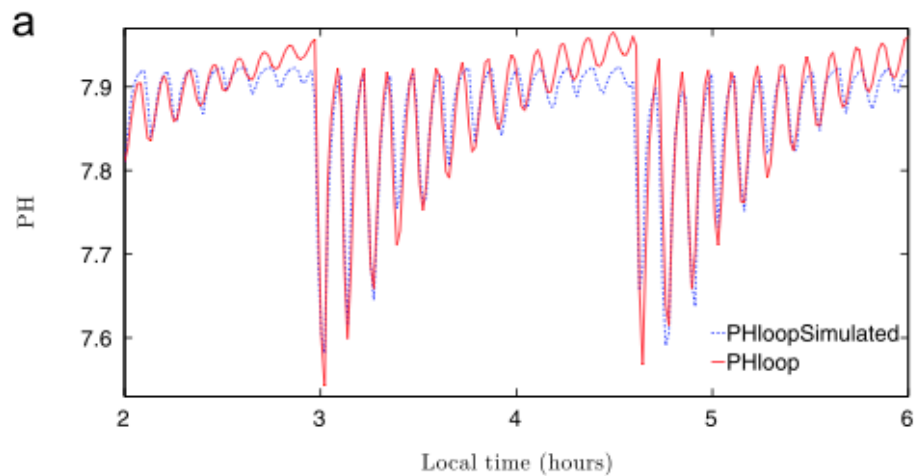
$$A_{gas,l}(t, x) \frac{\partial Y_{CO_2}(t, x)}{\partial t} = - \frac{F_{N_2,l}(t, x) V_{mol}}{y_{N_2,l}} \frac{\partial Y_{CO_2}(t, x)}{\partial x} - \frac{A_{liq,l}(t, x) V_{mol}}{y_{N_2,l}} K_l a_{l,CO_2l}(t, x) ([CO_2^*](t, x) - [CO_2](t, x))$$

$$C_p V_{ext} \frac{dT_{ext,out}(t)}{dt} = - Q_w(t) C_p (T_{ext,out}(t) - T_{ext,in}(t)) - h_{ext} S_{ext} (T_{ext}(t) - T(t))_{ml}$$

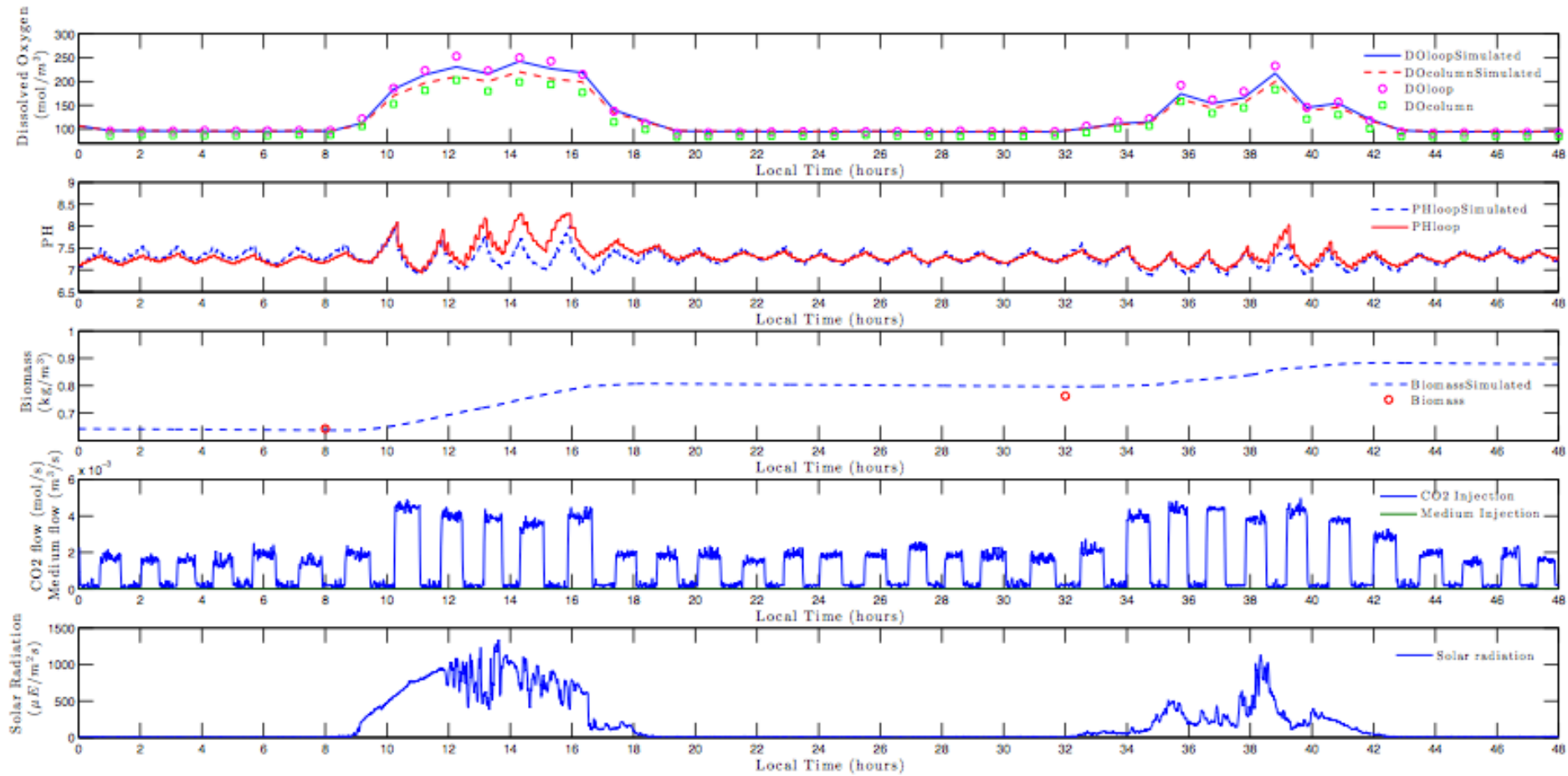
Modelo con EDP



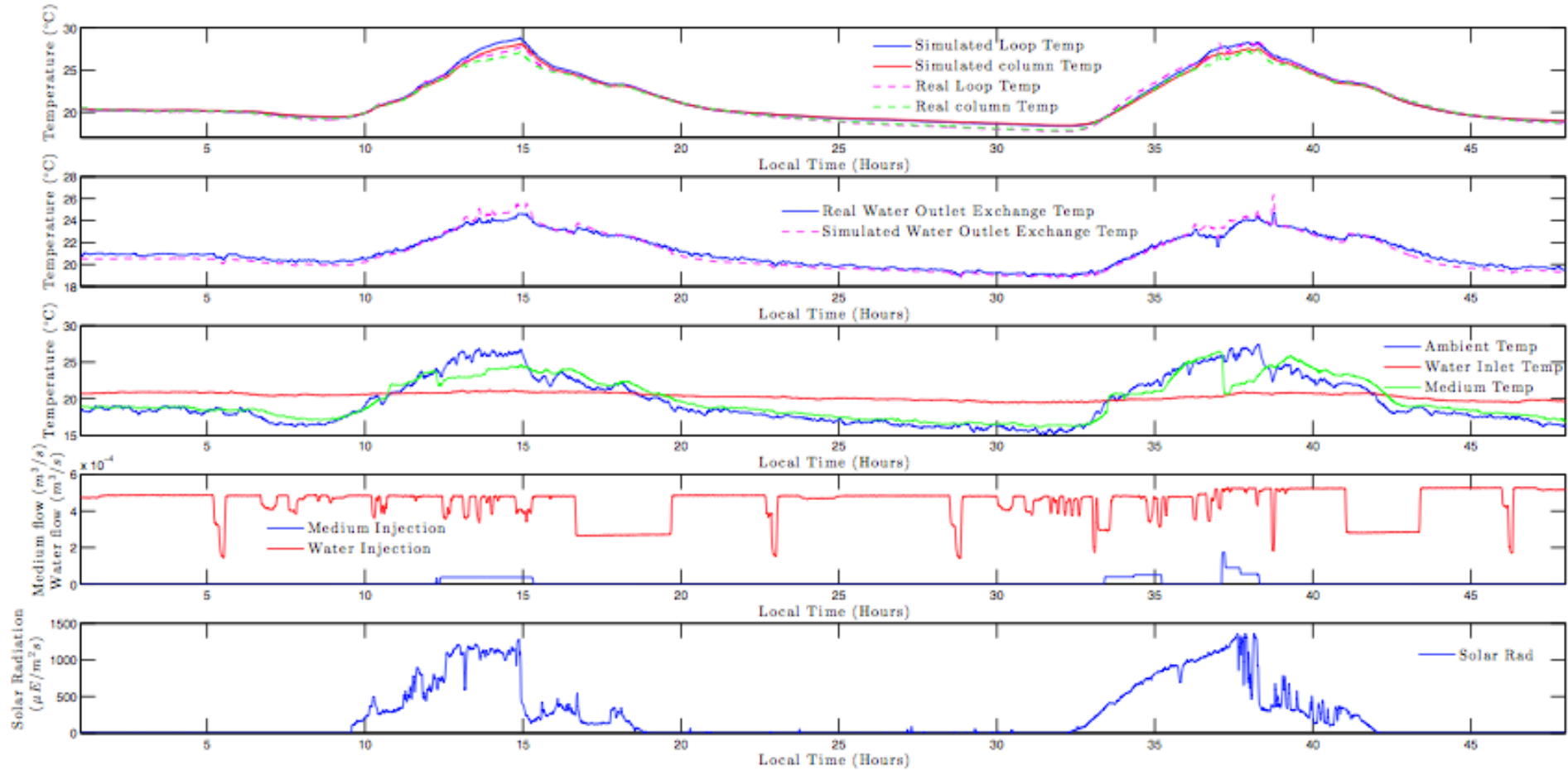
Modelo con EDP



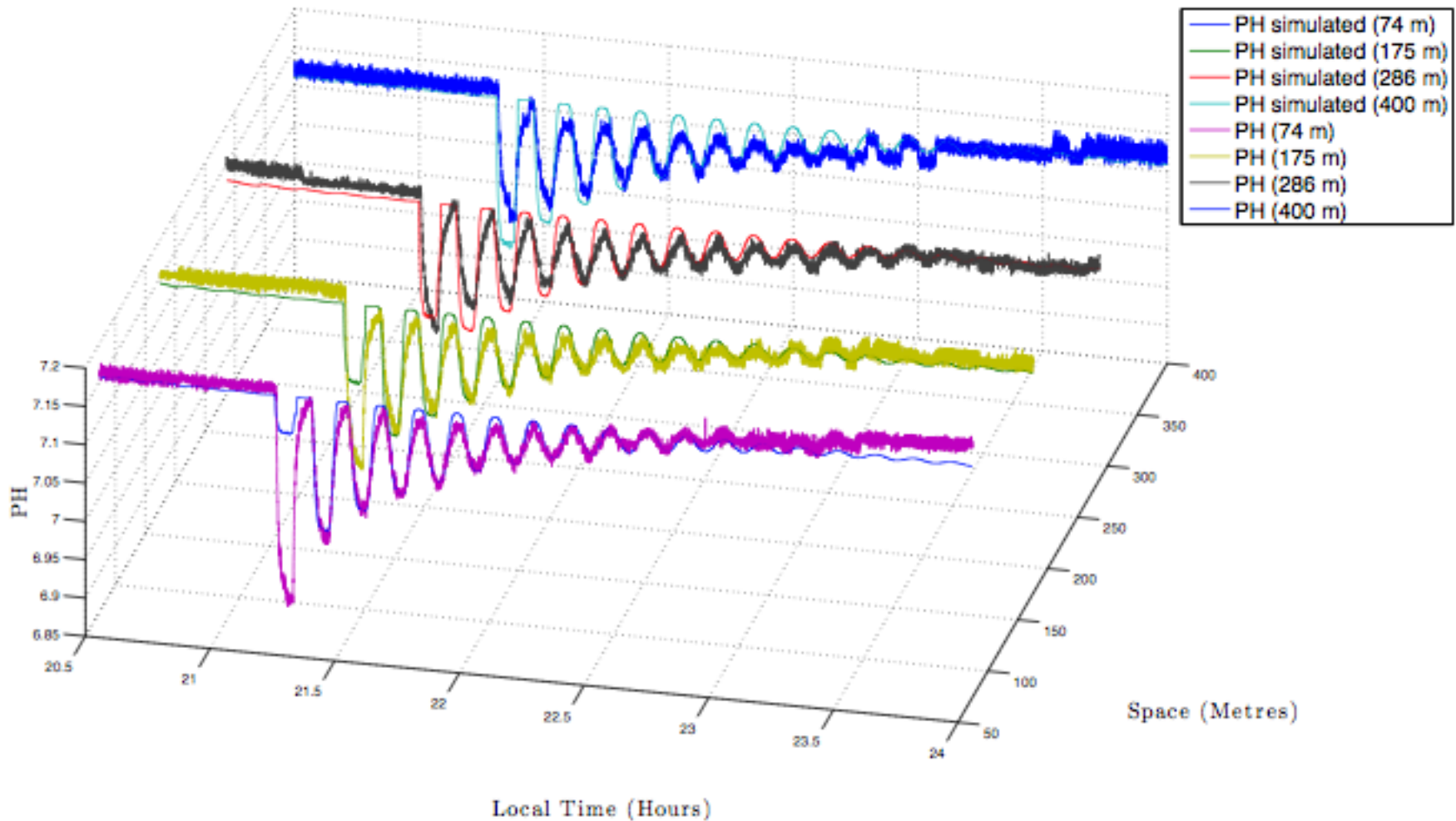
Modelo con EDP



Modelo con EDP



Modelo con EDP





Modelado



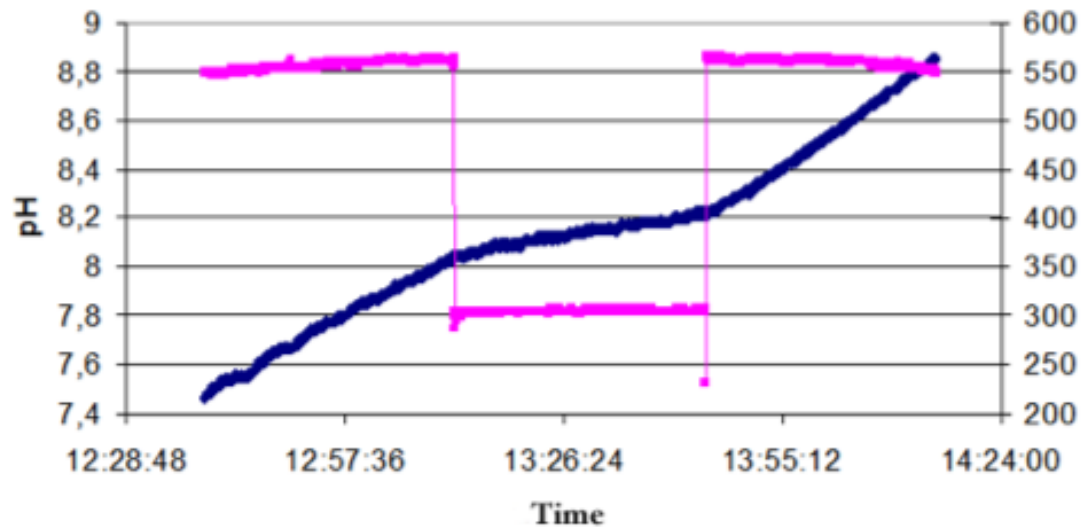
Se han desarrollado diversos tipos de modelos:

3. Modelo lineal simplificado.
4. Modelo NARMAX.

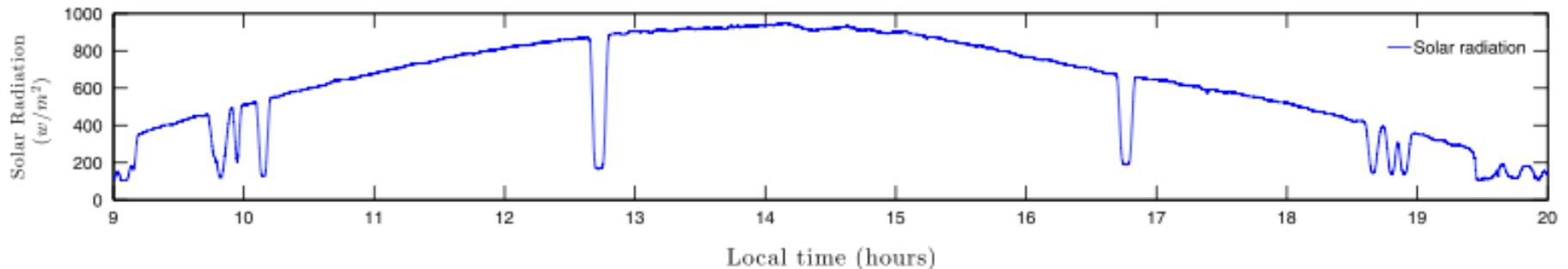
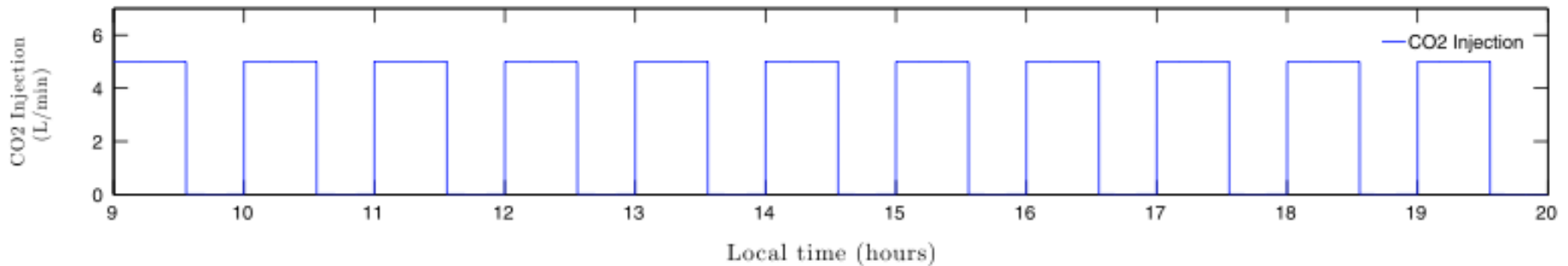
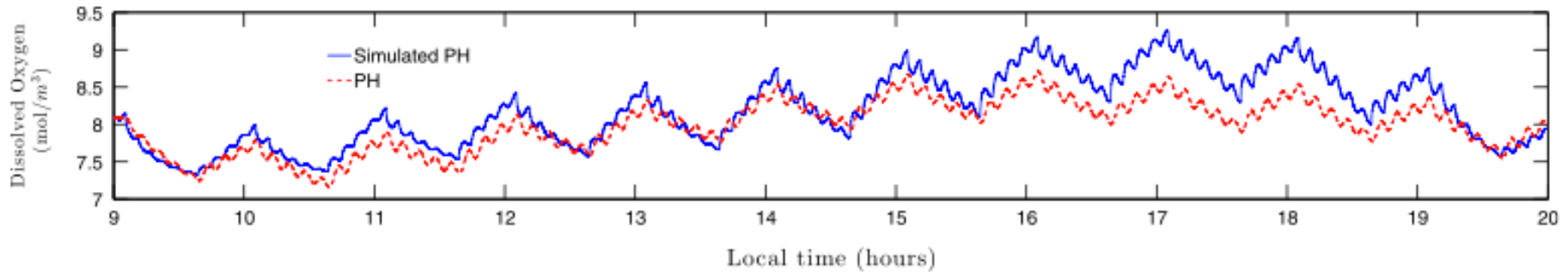
Modelo linear de bajo orden

$$pH = \underbrace{\frac{k_1}{1 + \tau_1 s}}_{TF_1(s)} \underbrace{\frac{w_n^2}{s^2 + 2\delta w_n s + 2w_n^2} e^{-t_r s}}_{TF_2(s)} q + \underbrace{\frac{k_r}{1 + \tau_r s}}_{TF_3(s)} I$$

Solar radiation effect



Modelo linear de bajo orden



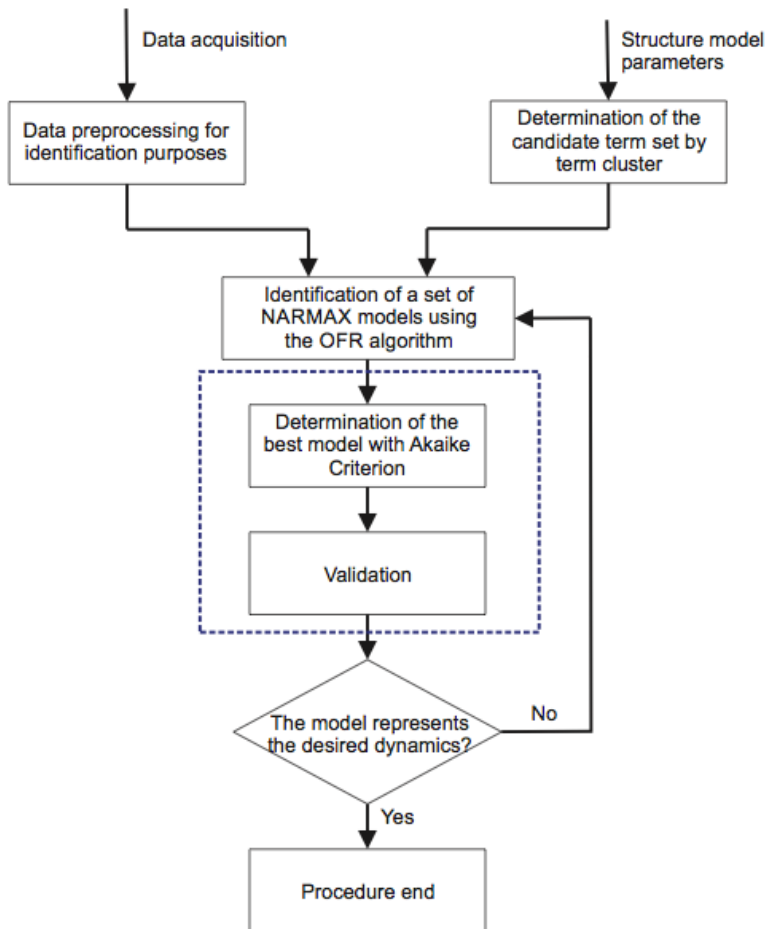


Modelo NARMAX

$$\begin{aligned}
 y_i(k) = & F^i[y_1(k-1), \dots, y_1(k-n_{y_1}^i), \dots, \\
 & \times y_m(k-1), \dots, y_m(k-n_{y_m}^i), u_1(k-1), \dots, \\
 & \times u_1(k-n_{u_1}^i), \dots, u_p(k-1), \dots, u_p(k-n_{u_p}^i), \\
 & \times e_1(k-1), \dots, e_1(k-n_{e_1}^i), \dots, e_m(k-1), \dots, \\
 & \times e_m(k-n_{e_m}^i)] + e_i(k), \quad i = 1, \dots, m
 \end{aligned}$$

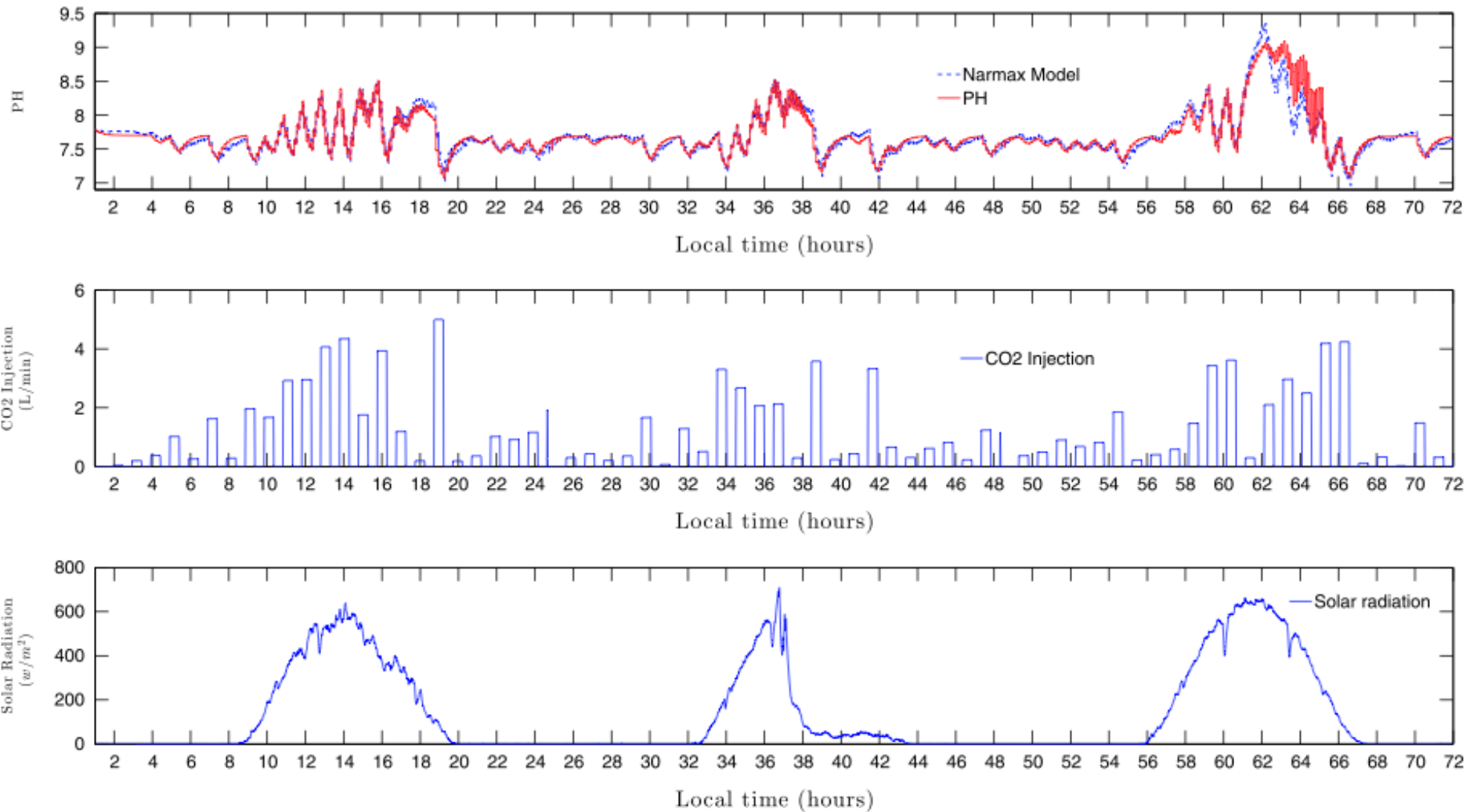
$$\begin{aligned}
 y_i(k) = & \theta_0 + \sum_{i_1=1}^n \theta_{i_1} x_{i_1}(k) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_1=i_2}^n \theta_{i_1 i_2} x_{i_1}(k) x_{i_2}(k) + \dots \\
 & + \sum_{i_1=1}^n \dots \sum_{i_l=i_{l-1}}^n \theta_{i_1 \dots i_l} x_{i_1}(k) \dots x_{i_l}(k) + e(k)
 \end{aligned}$$

Modelo NARMAX

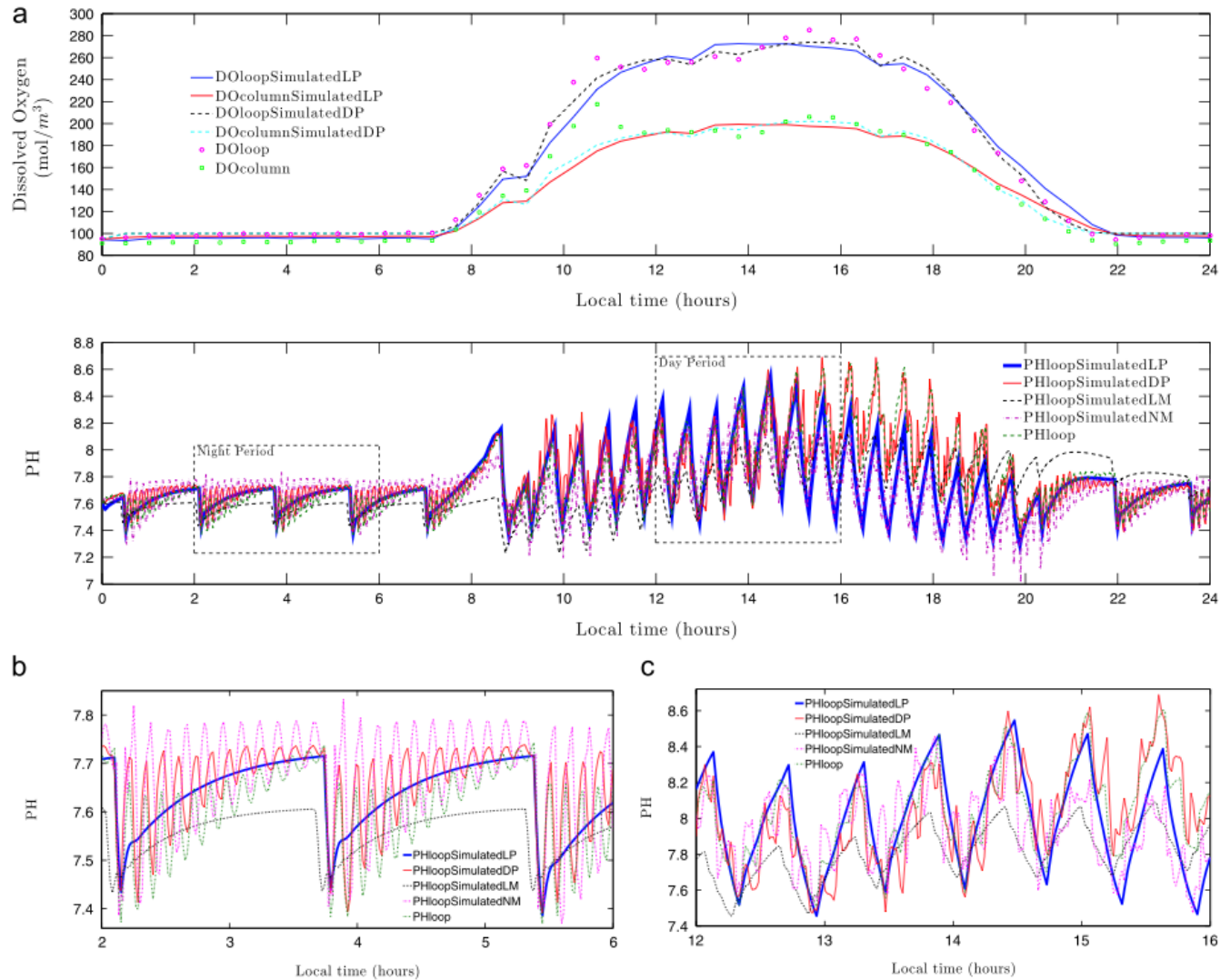


$$\mathbf{Z} = \Psi\theta + \xi = \Psi(\mathbf{R}^{-1}\mathbf{R})\theta + \xi = \mathbf{W}\mathbf{g} + \xi$$

Modelo NARMAX



Comparación Modelos





Comparación Modelos



- Modelo PDE con 2.7% error medio para oxígeno disuelto frente a 2.71% del modelo de parámetros concentrados.
- En el caso de la columna, los errores son de 4.9% y 5.3% para el PDE y parámetros concentrados, respectivamente.
- Para el pH, los errores medios fueron del 1% para el PDE, 1.6% para el parámetros concentrados, 1.4% para el modelo NARMAX y 2.2% para el modelo lineal.
- En el caso del modelo PDE, los últimos resultados dieron ajustes con errores del 2.81% en concentración de biomasa, 1.45% en la temperatura del lazo y del 1.27% en la temperatura de la columna.

Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



3. Control



Control



Existen una gran variedad de especies de microalgas, cada una con valores determinados de pH y temperatura óptimos para su cultivo. Por ejemplo, *Scenedesmus almerienses*, microalga de agua dulce:

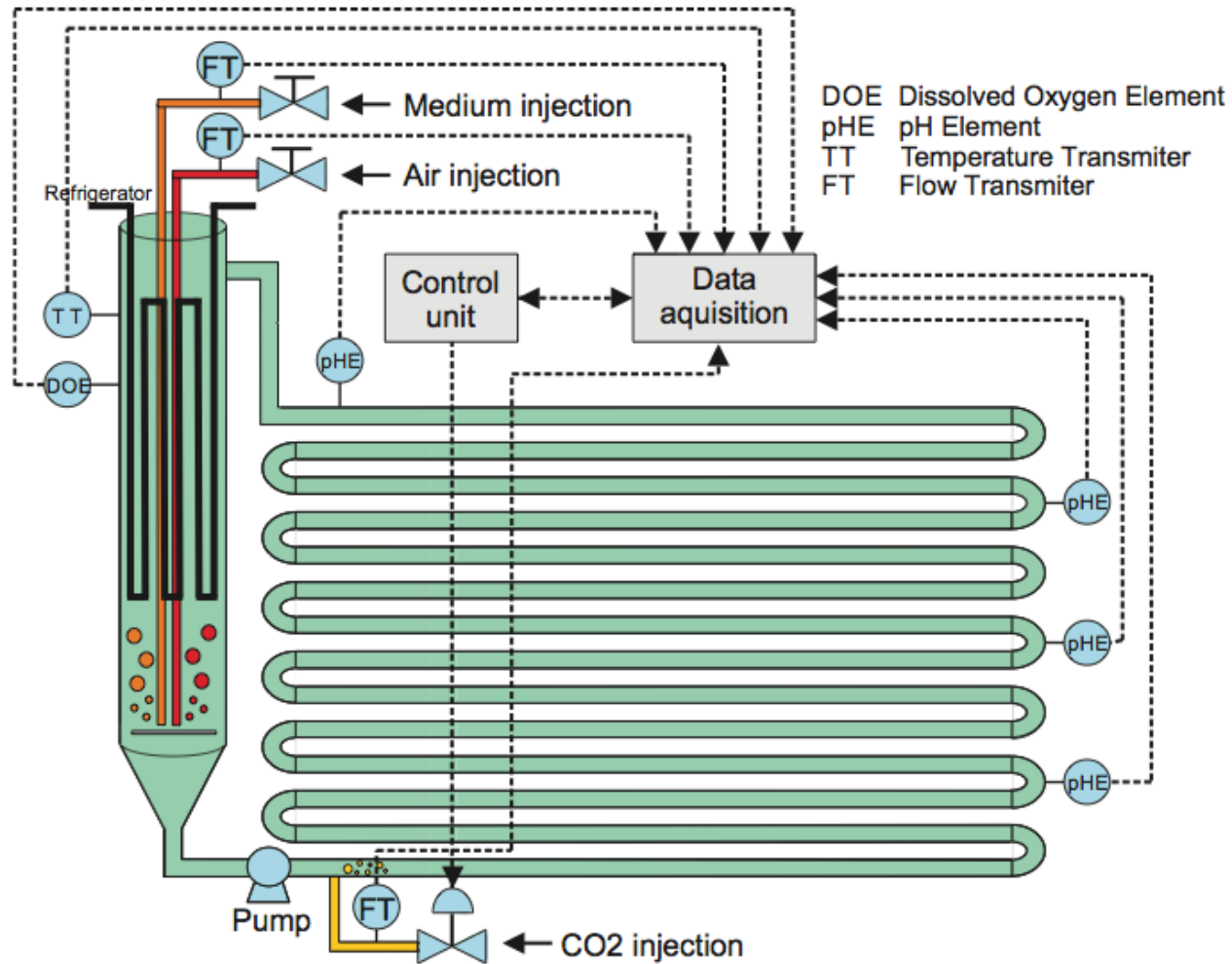
- Tolerante a temperaturas de hasta 45°C y valores de pH de 10.
- Valores óptimos: 35°C y pH de 8.



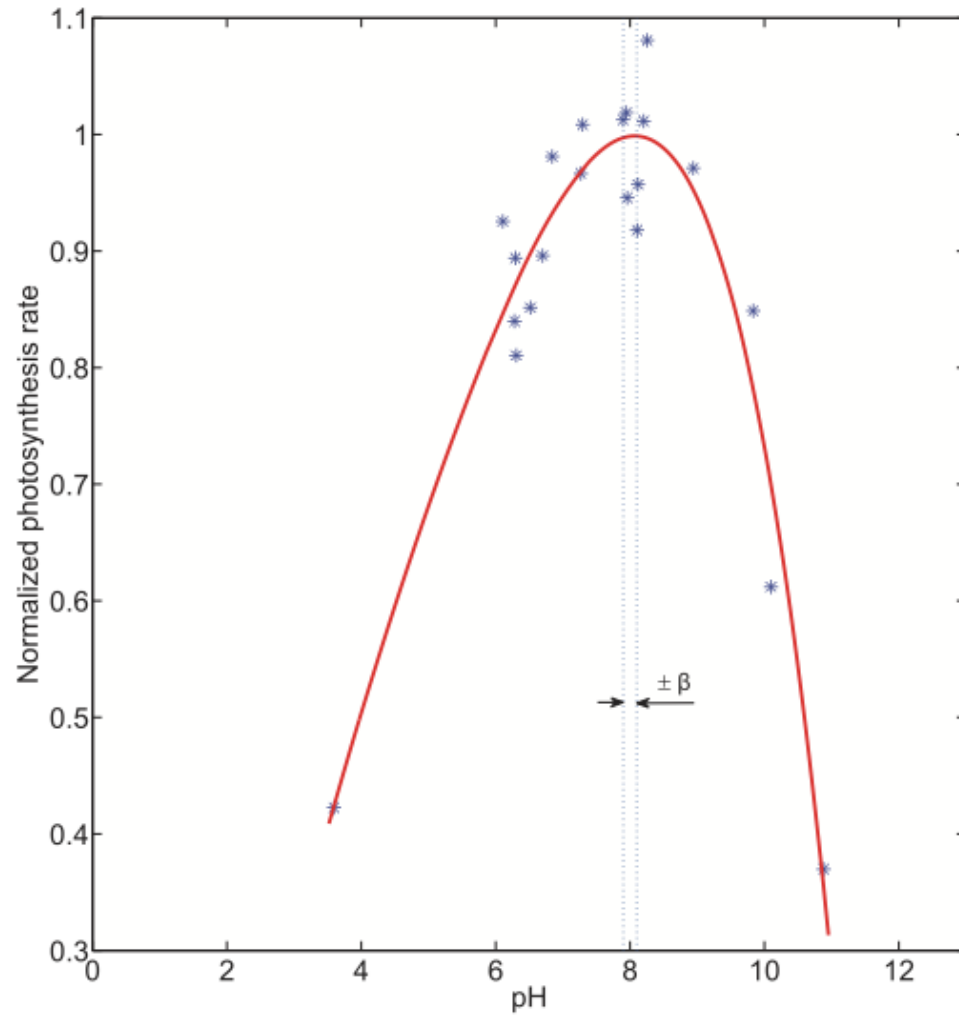
El pH de un cultivo se ve influenciado por:

- Las microalgas realizan la **fotosíntesis** en presencia de radiación solar consumiendo el CO_2 y generando O_2 , lo que provoca un **incremento paulatino del pH**.
- El **aporte del CO_2** provoca la formación de ácido carbónico y éste un **descenso del pH**.

Control

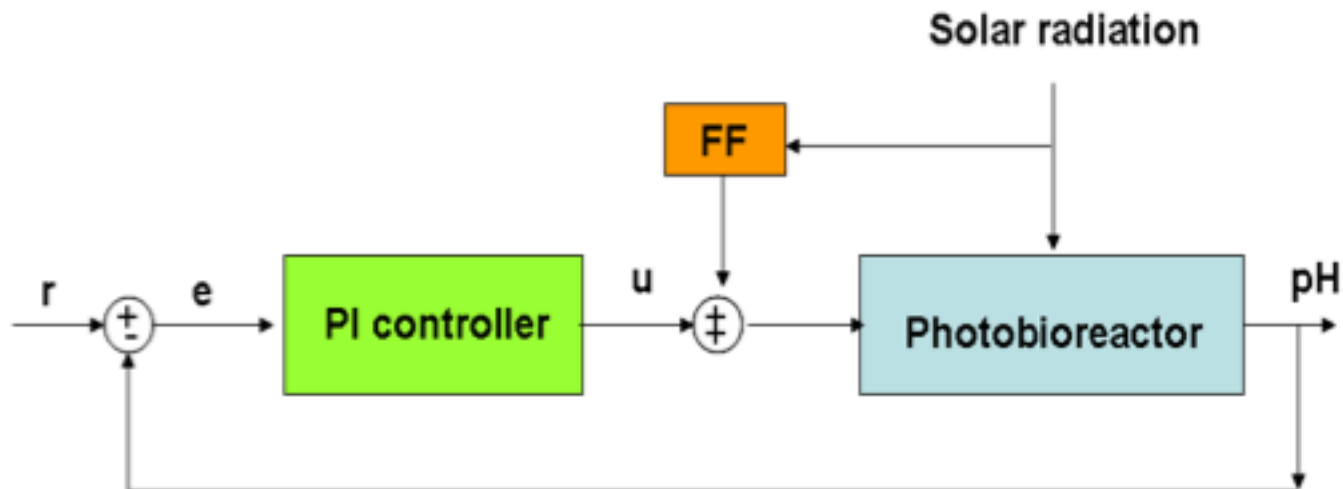


Control

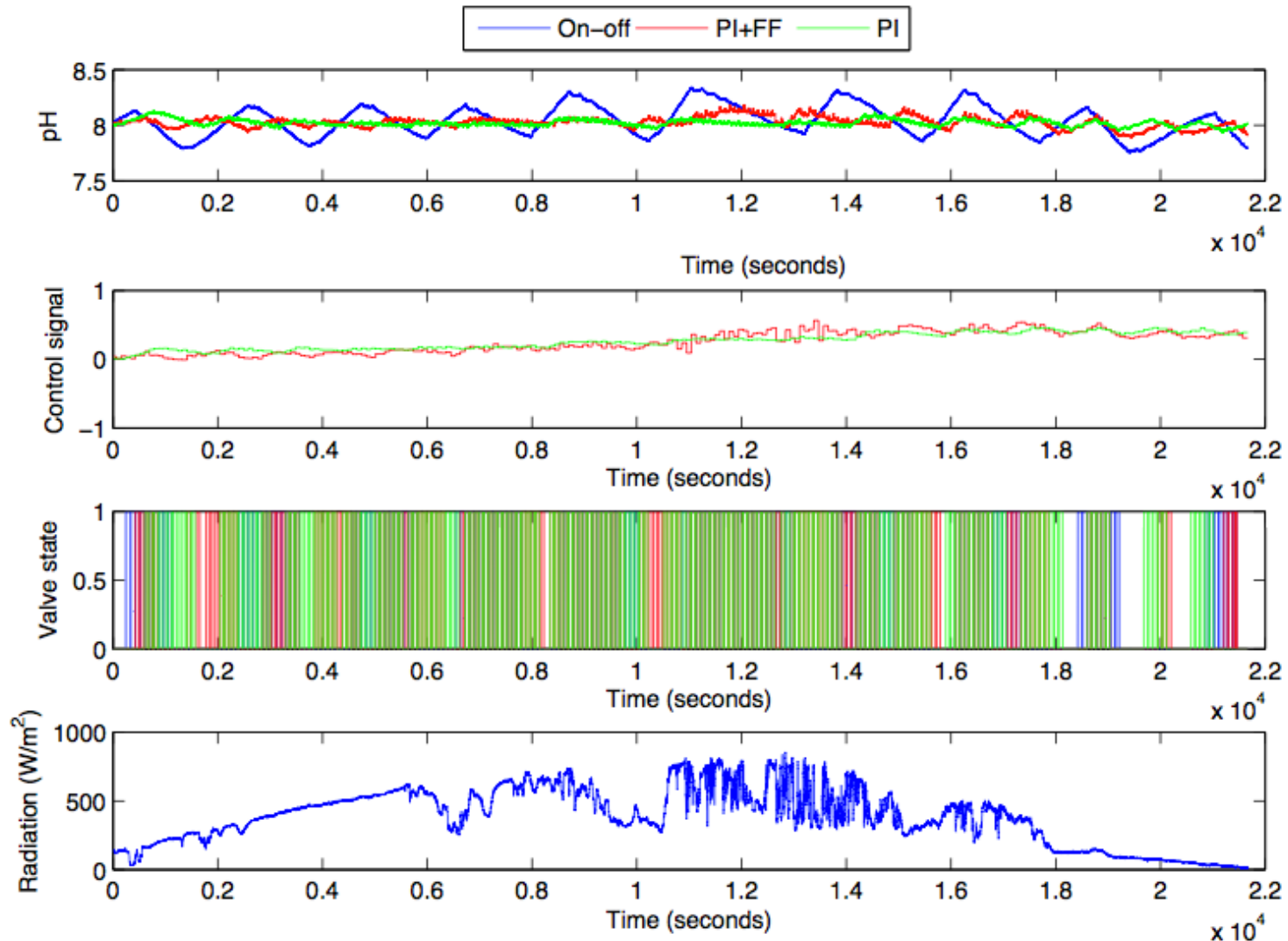


Control PI+FF

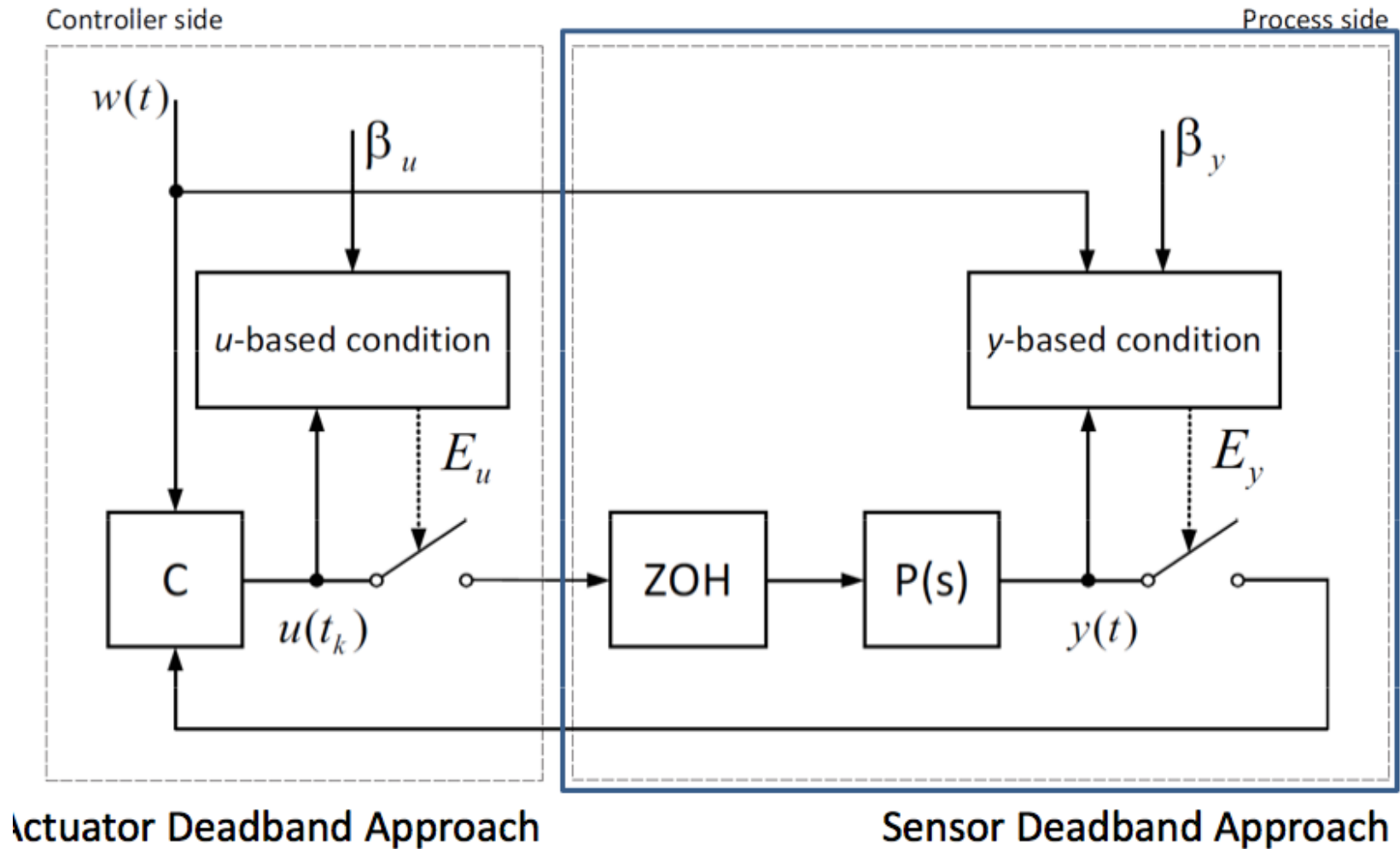
$$pH = \underbrace{\frac{k_1}{1 + \tau_1 s}}_{TF_1(s)} \underbrace{\frac{w_n^2}{s^2 + 2\delta w_n s + 2w_n^2} e^{-t_r s}}_{TF_2(s)} q + \underbrace{\frac{k_r}{1 + \tau_r s}}_{TF_3(s)} I$$



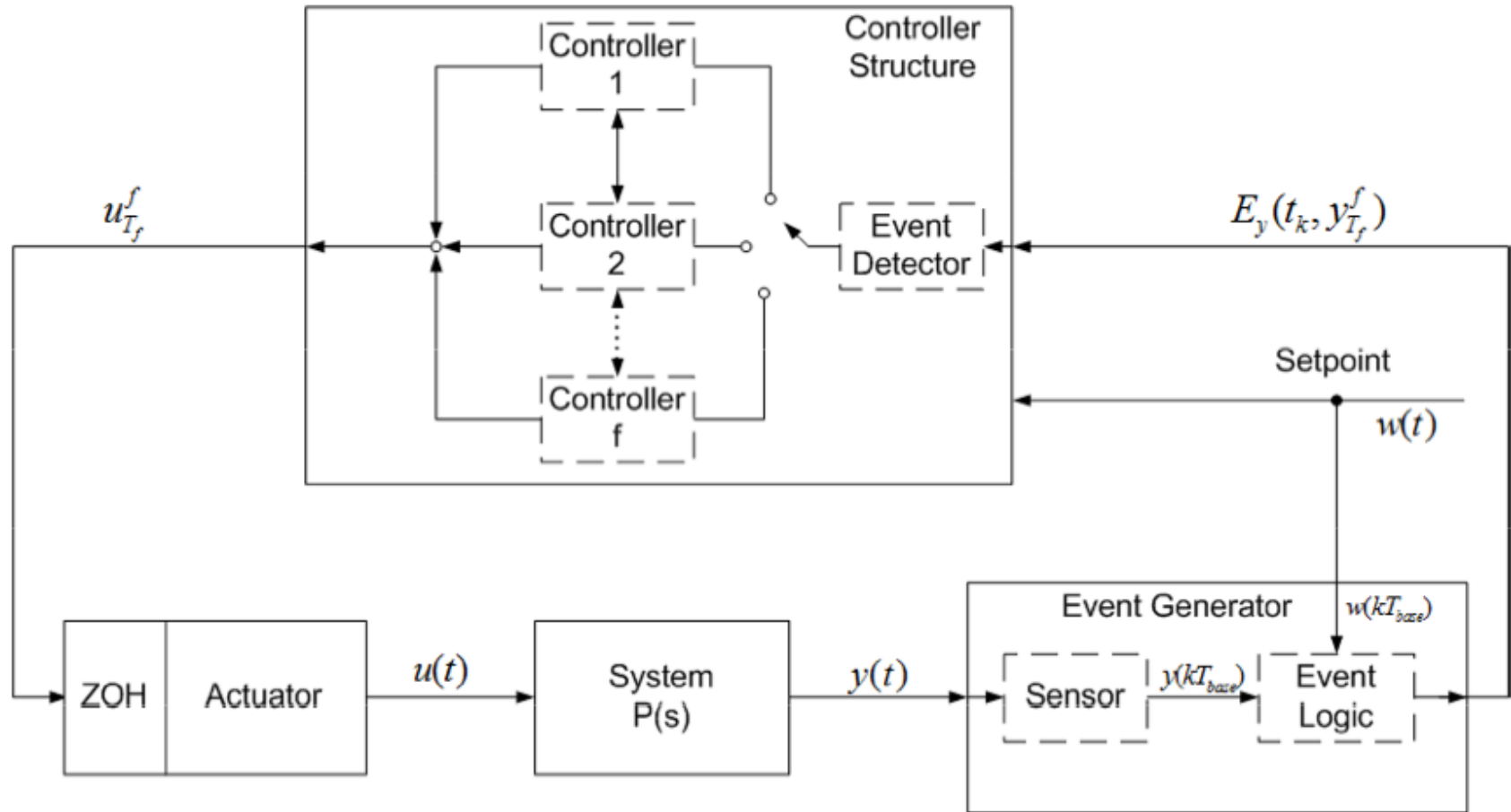
Control PI+FF



Control GPC con eventos



Control GPC con eventos



$$T_f = fT_{base}, f \in [1, n_{max}]$$

$$T_{max} = n_{max}T_{base}$$

$$T_f \leq T_{max}$$



Control GPC con eventos

$$J^f = \sum_{j=N_1^f}^{N_2^f} \delta^f [\hat{y}^f(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u^f} \lambda^f [\Delta u^f(k+j-1)]^2$$



$$T_f = fT_{base}, f \in [1, n_{max}]$$

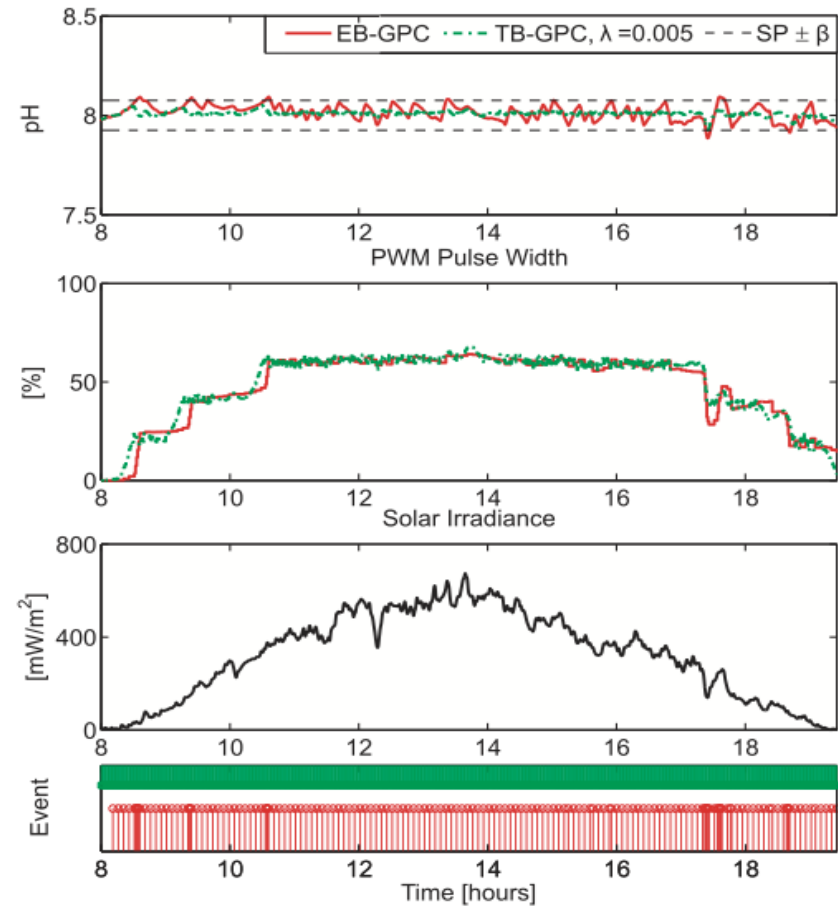
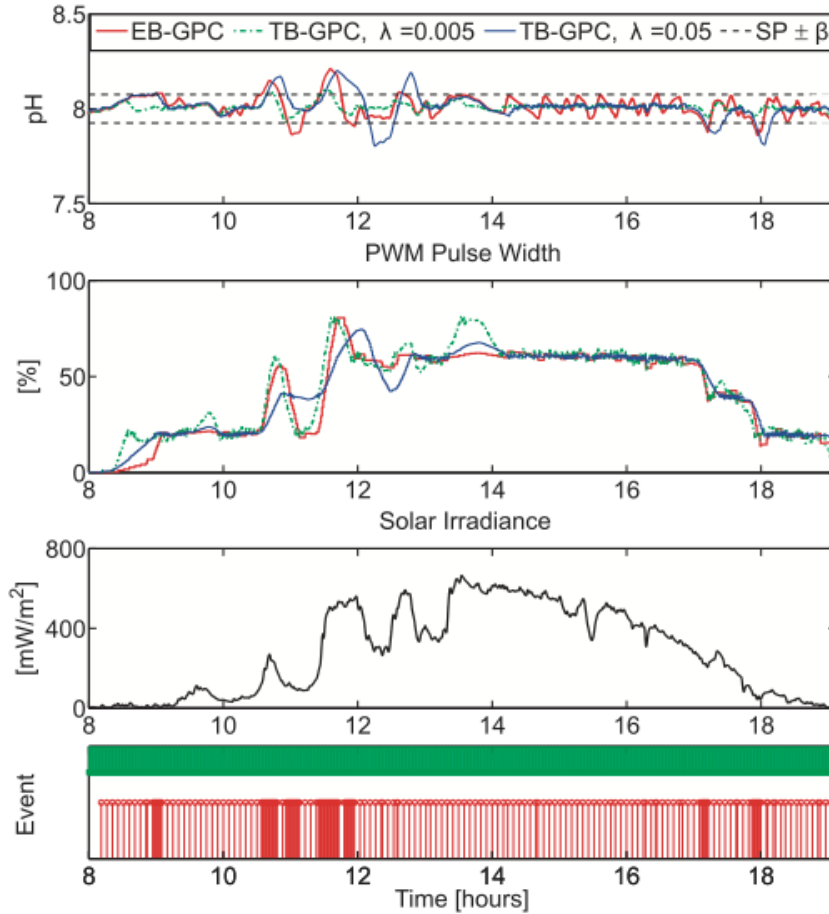


$$A^f(z^{-1})y^f(k) = z^{-d^f} B^f(z^{-1})u^f(k) + \frac{\varepsilon^f(k)}{\Delta}$$

$$A^f(z^{-1}) = 1 + a_1^f z^{-1} + a_2^f z^{-2} + \dots + a_{na}^f z^{-na}$$

$$B^f(z^{-1}) = b_0^f + b_1^f z^{-1} + b_2^f z^{-2} + \dots + b_{nb}^f z^{-nb}$$

Control GPC con eventos





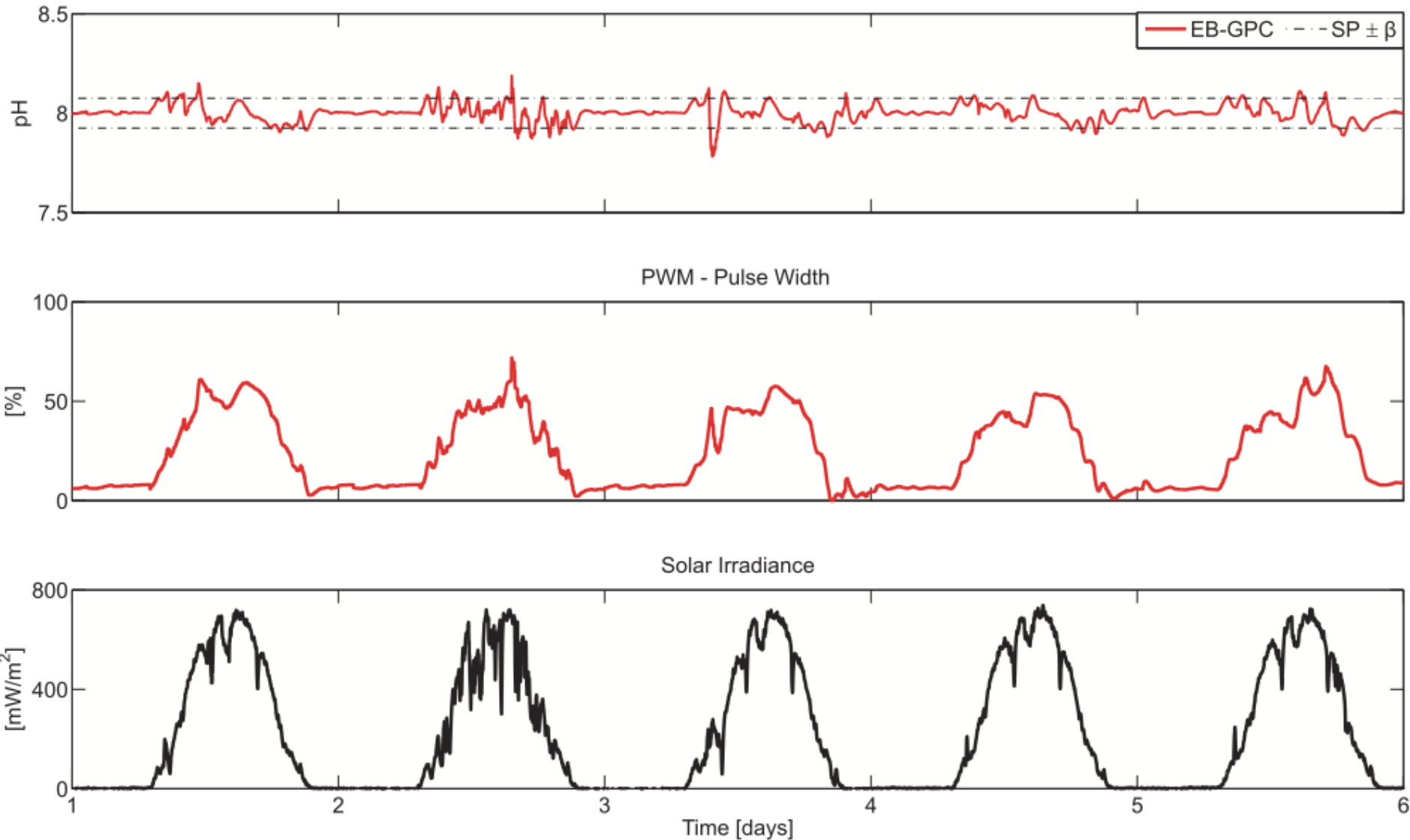
Control GPC con eventos



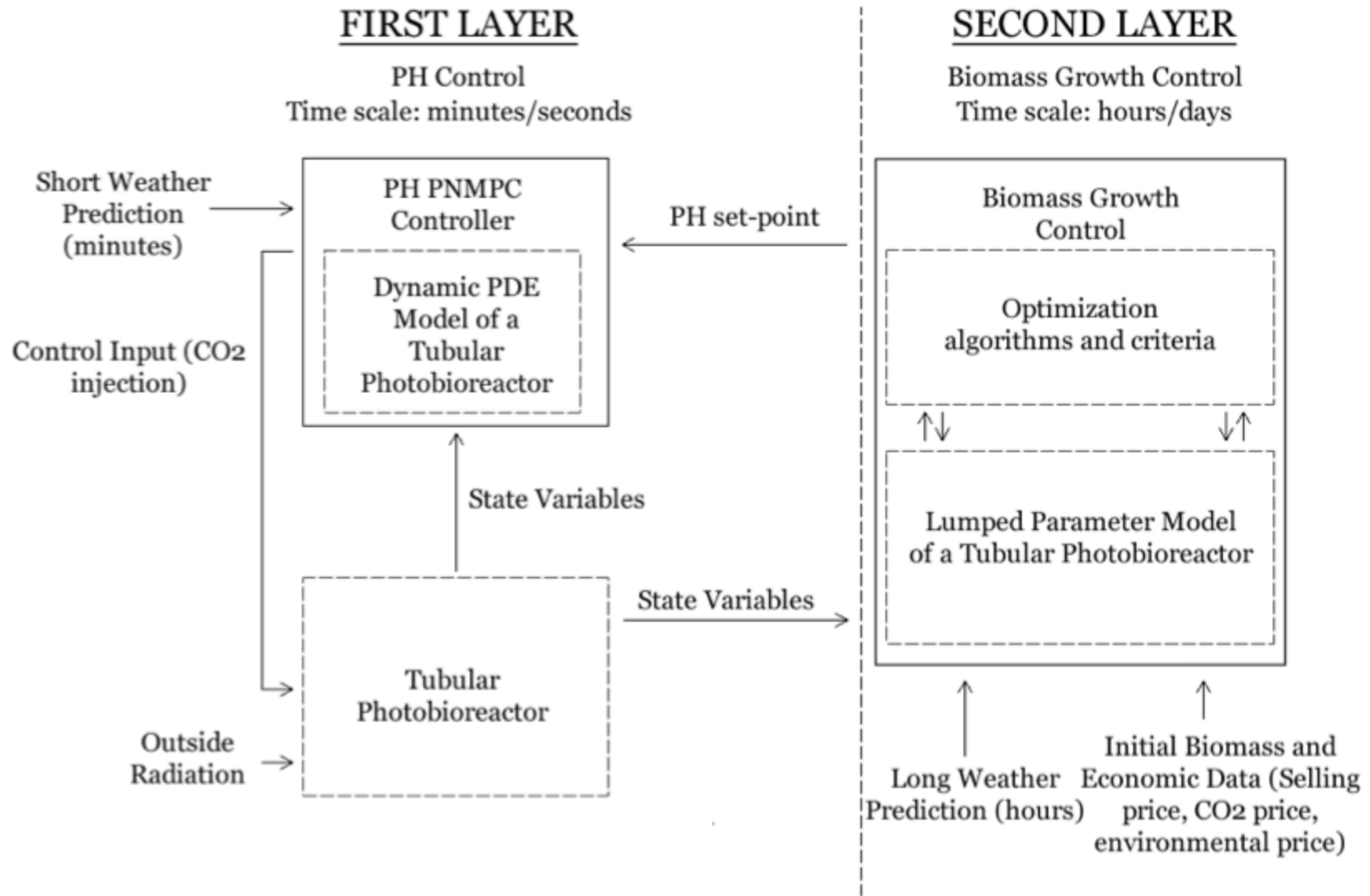
Table 1
Performance indexes for the simulation results.

		Day						
		1	2	3	4	5	6	7
TB-GPC	IAE	804	671	616	970	1114	806	639
	Event	656	667	671	673	653	659	678
	IT [min]	336.6	403.5	408	330.3	379.2	357.9	440.9
	CO ₂ [g/day]	1239	1485	1503	1215	1395	1317	1495
	Lost CO ₂ [g/day]	345	423	429	342	381	372	426
	RO ₂ [kg _(O₂) /m ³ day]	0.3425	0.4171	0.4244	0.3420	0.4008	0.3690	0.4234
	P _b [kg _(b) /m ³ day]	0.2570	0.3143	0.3188	0.2560	0.3012	0.2764	0.3158
EB-GPC	IAE	1404	1146	1118	1196	1506	1247	1096
	Event	207	193	173	194	210	170	158
	IT [min]	310	376.5	381.9	306.9	355.1	333.7	379.3
	CO ₂ [g/day]	1143	1386	1404	1128	1308	1227	1395
	Lost CO ₂ [g/day]	249	324	330	261	294	282	327
	RO ₂ [kg _(O₂) /m ³ day]	0.3419	0.4163	0.4236	0.3409	0.3997	0.3679	0.4201
	P _b [kg _(b) /m ³ day]	0.2565	0.3122	0.3177	0.2557	0.2998	0.2759	0.3151
ON/OFF	IAE	5756	7210	7364	6542	7968	8411	7505
	Event	656	667	671	673	653	659	678
	IT [min]	466.5	553.5	561	454.5	529.5	492	556.5
	CO ₂ [g/day]	1719	2037	2064	1674	1950	1812	2049
	Lost CO ₂ [g/day]	825	975	990	801	936	867	981
	RO ₂ [kg _(O₂) /m ³ day]	0.2203	0.2727	0.2783	0.2082	0.2593	0.2408	0.2732
	P _b [kg _(b) /m ³ day]	0.1653	0.2045	0.2088	0.1561	0.1945	0.1806	0.2049

Control GPC con eventos



Control jerárquico





Control jerárquico

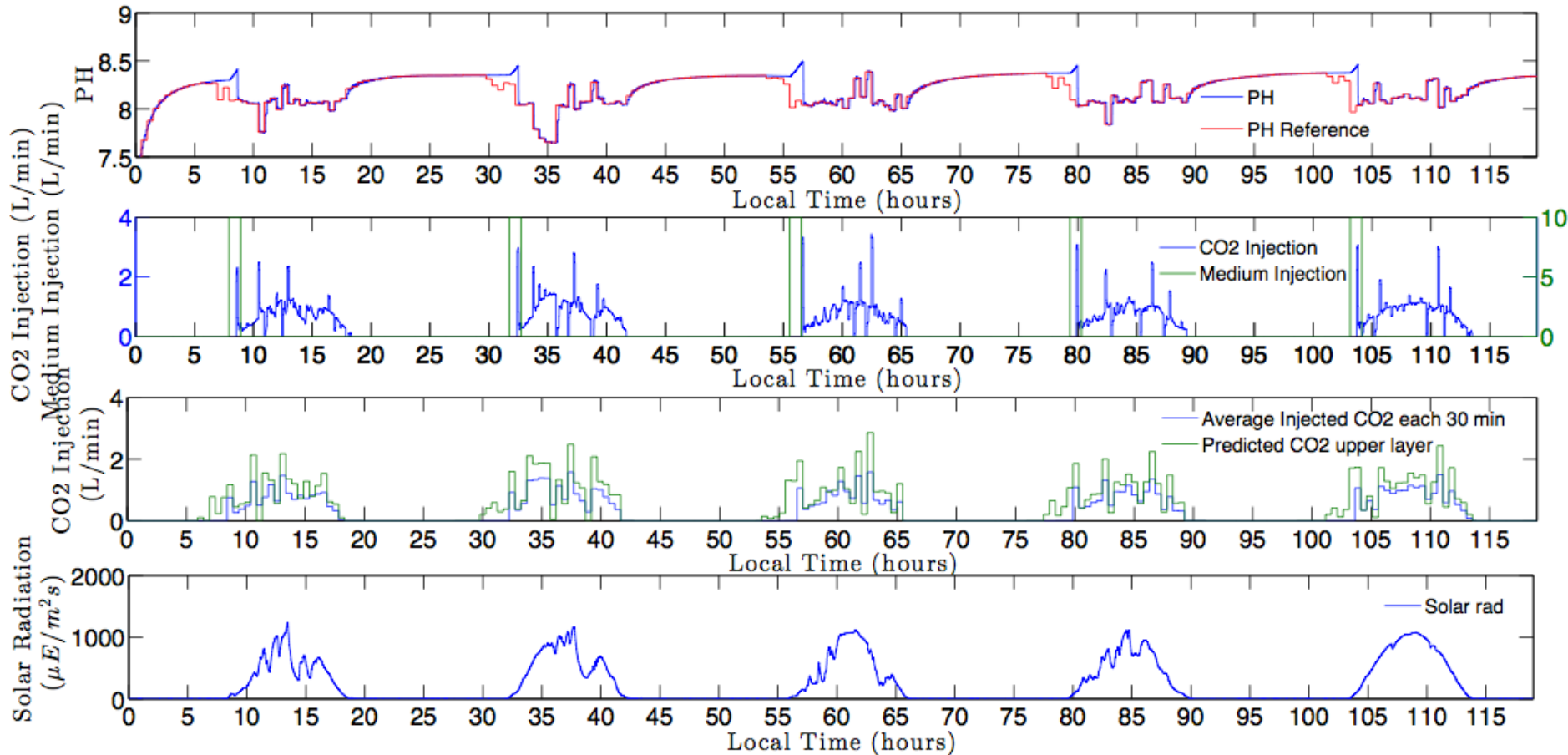
$$J = V_{bio} \int_0^{t_f} X_{bio}(t) dt - V_{cost} \int_0^{t_f} W_{CO_2}(t) dt - V_{env} \int_0^{t_f} L_{CO_2}(t) dt$$

$$X_{bio} = \sum_{i=1}^n P_{O_2,l} Y_{o/x} C_{b,out} V_l$$

$$W_{CO_2} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{CO_2} M_{CO_2}}{V_{mol}}$$

$$L_{CO_2} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_{CO_2} Y_{CO_2,out} y_{N_2} M_{CO_2}}{V_{mol}}$$

Control jerárquico



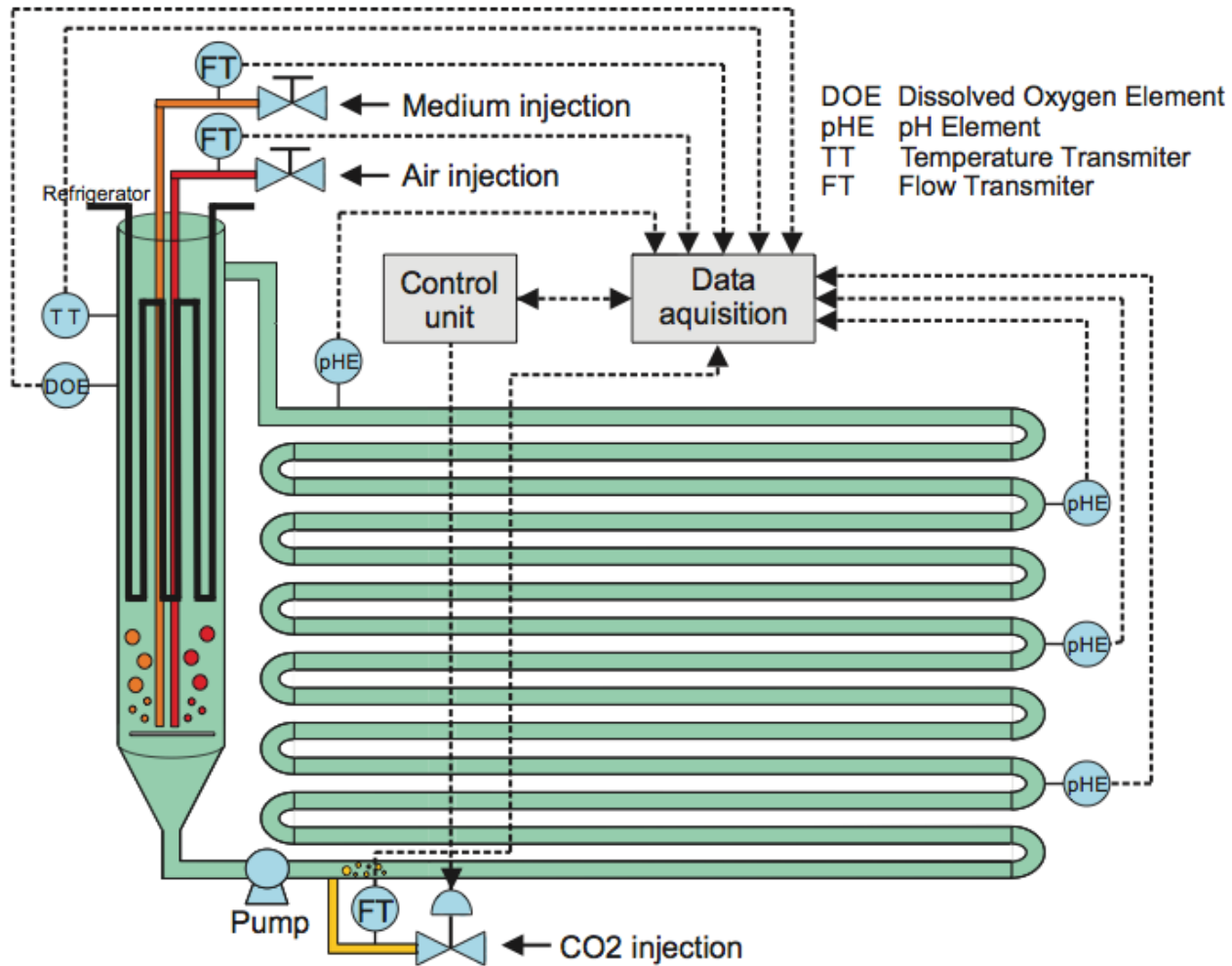


Control jerárquico

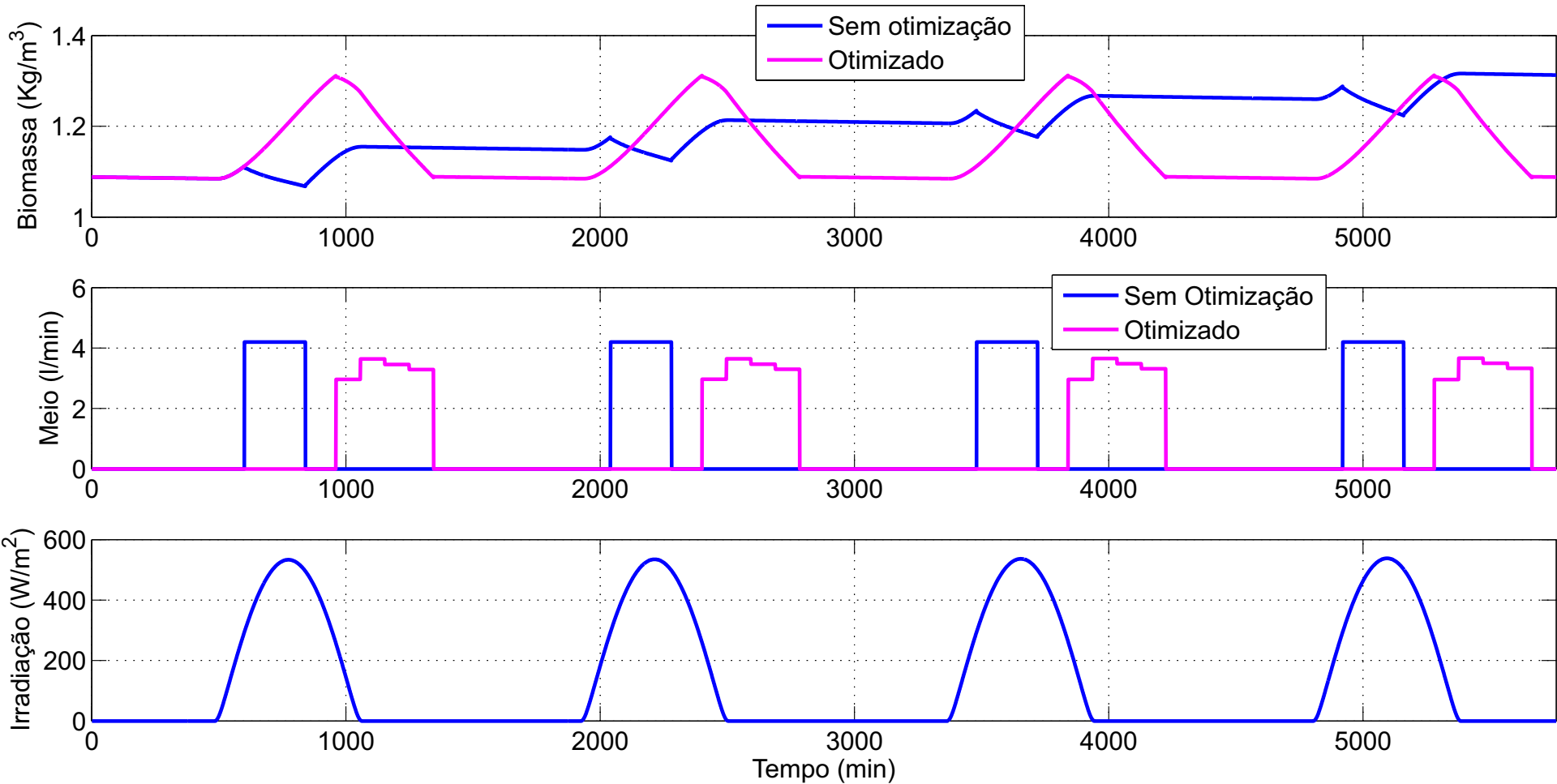


Biomass Price Sale (€)	Biomass Productivity (kg)	CO₂ Injected (kg)	CO₂ Losses (kg)
50	1.9414	4.9174	1.7332
100	1.9417	5.1679	1.8196
150	1.9424	5.2001	1.8326
PNMPC	1.9294	5.3812	1.9379

Control inyección de medio



Control inyección de medio



Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



4. Conclusiones



Conclusiones



- Las microalgas se presentan con una fuente de energía renovable de gran potencial.
- Existen numerosas líneas de trabajo abiertas desde un punto de vista de modelado y control.
- El trabajo en equipo entre investigadores de ingeniería química e ingenieros de control es fundamental y ha dado grandes frutos.
- La optimización de este tipo de procesos para poder ser utilizados a gran escala así como la reducción de costes son los factores claves para hacerlos competitivos.



Conclusiones



Agradecimientos:

- Ignacio Fernández Sedano.
- Francisco Gabriel Ación Fernández.
- Manuel Berenguel Soria.
- Andrzej Pawlowski.
- Gustavo Andrade.
- Daniel Juan Pagano.
- Fundación Cajamar.
- Grupo del Departamento de Informática y Automática de la UNED.

Modelado y Control de Fotobioreactores Industriales



José Luis Guzmán Sánchez

Área de Ingeniería de Sistemas y Automática

Departamento de Informática

Universidad de Almería

joseluis.guzman@ual.es

Madrid, 29 de Abril de 2014

