

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y  
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

“Modelado y control de fotobiorreactores  
industriales”

Curso 2013/2014

**Alumno/a:**

María Dolores Fernández Berenguel

**Director/es:**

Dr. D. Manuel Berenguel Soria  
Dr. D. José Luis Guzmán Sánchez







UNIVERSIDAD DE ALMERÍA  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR Y FACULTAD  
DE CIENCIAS EXPERIMENTALES



TRABAJO FIN DE GRADO  
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

María Dolores Fernández Berenguel

Dirigido por Dr. D. José Luis Guzmán Sánchez y Dr. D. Manuel Berenguel Soria

Almería, Septiembre 2014



*Este proyecto está dedicado a  
mi padre, a mi hermana, a Rubén  
y sobre todo a ti, mamá.*



## ***Agradecimientos:***

En primer lugar quisiera agradecer a los profesores José Luis Guzmán Sánchez y Manuel Berenguel Soria por el tiempo dedicado todos estos años a enseñarnos con verdadera dedicación y por la ayuda prestada en todo momento, desde las primeras asignaturas que cursamos hasta los últimos días de la realización de este proyecto.

Quiero agradecer a Ignacio Fernández Sedano, a quién también he podido conocer como profesor, por su colaboración, imprescindible para el desarrollo de este proyecto.

Por último, agradezco el apoyo de mi familia y mis amigos, así como el de mis compañeros de clase, quienes siempre han sido un claro ejemplo de esfuerzo y trabajo.



# ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTERÉS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
1.1. Motivación del proyecto.....	11
1.2. Contexto y situación actual .....	12
1.3. Objetivos y planificación .....	12
1.4. Estructura de la memoria.....	14
1.5. Resumen de resultados .....	14
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1. Las microalgas .....	17
2.2. Modelado del pH.....	19
2.3. Control del pH.....	21
<b>3. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1. Descripción del fotobiorreactor tubular .....	25
3.1.2. Proceso de cultivo y obtención de biomasa.....	28
3.1.3. Control existente en la planta .....	29
3.2. Software utilizado .....	29
3.3. Métodos y estrategias de identificación y modelado.....	32
3.4. Métodos y estrategias de control.....	36
3.4.1. Control multivariable .....	37
3.4.2. Controlador Proporcional Integral (PI) .....	41
3.4.3. Control anticipativo.....	42
3.4.4. Limitaciones físicas de los actuadores .....	43
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>45</b>
4.1. Modelado del comportamiento nocturno del sistema.....	49
4.2. Modelado del comportamiento diurno del sistema .....	68
4.3. Modelado teniendo en cuenta la recirculación .....	84
4.3.1. Modelado del comportamiento nocturno del sistema.....	84
4.3.2. Modelado del comportamiento diurno del sistema .....	97
4.4. Control del sistema durante el día .....	105
4.4.1. Emparejamientos y acoplamientos .....	105
4.4.2. Diseño de controladores .....	109
4.4.3. Resultados gráficos .....	112
4.4.4. Resultados analíticos .....	125

<b>5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....</b>	<b>129</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>131</b>

# 1. INTERÉS Y OBJETIVOS

## 1.1. Motivación del proyecto

De la necesidad de hacer frente a la contaminación atmosférica y en especial a las emisiones de CO<sub>2</sub>, gas de efecto invernadero y principal causante del cambio climático, surgen nuevas tecnologías basadas en el cultivo de microalgas. Los objetivos prioritarios son la eliminación de parte de este CO<sub>2</sub> y, sobre todo, la reducción de las emisiones, generadas en su mayoría por las industrias.

La naturaleza de estos microorganismos los convierte en grandes aliados para cumplir con estos dos objetivos. Las microalgas fueron los primeros seres vivos con capacidad de realizar la fotosíntesis y hoy en día son los principales generadores de oxígeno y fijadores de CO<sub>2</sub> del planeta.

La elevada velocidad de crecimiento de las microalgas junto con el poco volumen que ocupan, en comparación con otros organismos fotosintéticos, hacen posible que en la actualidad el cultivo se realice en depósitos adaptados, denominados fotobiorreactores, en los que se procura que se den las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo.

La biomasa microalgal es ampliamente utilizada en diferentes campos, se emplea para la obtención de productos químicos, farmacéuticos, agroalimentarios, etc., pero lo más interesante es que su alto poder calorífico la convierte en un sustituto perfecto de los combustibles fósiles. Como fuente renovable de energía cualquier mejora que haga aumentar su productividad es de gran importancia. Además para llevar esta tecnología a niveles mayores de producción es necesario reducir costes y conseguir la mayor eficiencia posible.

Cada vez se hace más necesario el uso de energías renovables, y el cultivo de microalgas está tomando una gran relevancia en el campo de la investigación. Las ventajas son innumerables, pero todavía es necesario mejorar las técnicas existentes y reducir costes para producir biomasa a gran escala y poder comercializarla como biocombustible. En este proyecto se pretende abordar la problemática de reducción de costes a través del control del CO<sub>2</sub> inyectado minimizando al mismo tiempo pérdidas. Para llevar a cabo el estudio se tendrán en consideración todas las variables que influyen en el proceso.

## 1.2. Contexto y situación actual

Existen múltiples tipos de fotobiorreactores, siendo posible realizar una primera clasificación en función de si son abiertos o cerrados. Los sistemas abiertos representan menos costes pero tienen una gran predisposición a la contaminación y ofrecen escasas opciones de control. Los sistemas cerrados son más controlables, destacando los de tipo bolsa y los de tipo tubular cerrado. En este caso se estudiará el segundo tipo por las posibilidades de control que ofrece. Al tratarse de un sistema cerrado se podrá actuar sobre las variables manipulables en función de las condiciones de cada momento.

Las estrategias de control utilizadas habitualmente en este tipo de procesos no son las más eficientes, pues tradicionalmente no se ha tenido en cuenta la dinámica de la planta ni tampoco permiten controlar las pérdidas de  $\text{CO}_2$ . En la literatura existen estudios en los que se demuestra cómo el uso de controladores *PID* y por adelantado (*feedforward*) mejoran las estrategias de control todo/nada inicialmente propuestas, pero estos estudios consideran principalmente el control del pH a través de la inyección de  $\text{CO}_2$  y actuando sobre de la radiación solar, dejando a un lado otros factores importantes.

El objetivo del presente proyecto es trasladar estas mejoras al resto de variables, además de asegurar unas condiciones óptimas para el crecimiento de las algas. Se hará por tanto un estudio completo del sistema, desarrollando en primer lugar un modelo que recoja fielmente su comportamiento para estudiar el efecto de cada una de las variables y poder diseñar un esquema de control completo que considere el máximo número de ellas.

## 1.3. Objetivos y planificación

Como indica el título, el objetivo del presente proyecto es estudiar el modelado y control de fotobiorreactores industriales, en concreto el de tipo tubular vertical cerrado.

Siendo más explícitos, el propósito central es el de optimizar el funcionamiento del fotobiorreactor manteniendo las variables de salida en torno a los valores que hacen más rentable el cultivo de microalgas. En especial, se busca minimizar los gastos aumentando el aprovechamiento del dióxido de carbono inyectado, lo que más costes supone. En primer lugar se obtendrá un modelo del sistema real sobre el cual se diseñará una estrategia de control basada en controladores clásicos *PID* y por adelantado o prealimentación (denominados en inglés *feedforward*). Los principales pasos a dar son:

-Recopilación bibliográfica: se consultarán libros de texto, proyectos anteriores, artículos científicos, etc., buscando información tanto de fundamentos biológicos del cultivo y características de la instalación como de técnicas de modelado y control.

-Pruebas y familiarización con el simulador del fotobiorreactor: se realizarán simulaciones para diferentes condiciones analizando los resultados para la posterior identificación y modelado.

-Obtención de modelos: se separarán los datos en día y noche, se realizarán por tanto dos modelados diferentes. Se harán además dos estudios diferenciados, el primero con modelos que recojan la dinámica principal del sistema y el segundo teniendo en cuenta además el efecto sobre la dinámica provocado por la recirculación del cultivo.

-Validación de modelos: utilizando datos diferentes a los empleados en los pasos anteriores se procederá a comprobar la validez del modelo.

-Estudio del control del sistema multivariable: al ser un sistema con más de una entrada y una salida se hará un estudio sobre las variables que es posible controlar y sobre los emparejamientos que se pueden hacer.

-Diseño de controladores: se estudiarán las necesidades a cubrir y se elegirán los métodos de diseño adecuados para implementar un controlador *PID* acompañado de controladores por adelanto.

-Pruebas de los controladores en el modelo lineal obtenido: se implementarán los controladores diseñados y se analizarán los resultados, con la finalidad de comprobar si la inclusión de controladores por adelanto mejora la respuesta del sistema.

- Pruebas de los controladores en el modelo no lineal: se repetirán las pruebas anteriores para el simulador del fotobiorreactor, analizando la influencia de las no linealidades y la dinámica no modelada.

- Cálculo de pérdidas de CO<sub>2</sub>: se calcularán las cantidades de dióxido de carbono inyectado y el perdido, analizando los resultados para cada caso.

- Elaboración de la memoria: se han recogido todos los pasos dados y resultados en la presente memoria.

Tarea realizada	Tiempo dedicado [h]
Recopilación bibliográfica.	40
Pruebas con el simulador del fotobiorreactor.	20
Obtención de modelos.	50
Validación de modelos.	50
Estudio del control del sistema multivariable.	40
Diseño de controladores.	30
Pruebas de los controladores en el modelo lineal.	30
Pruebas de los controladores en el modelo no lineal.	50
Cálculo de pérdidas de CO <sub>2</sub> .	30
Elaboración de la memoria.	90

Tabla 1.1. Tareas realizadas y tiempo estimado dedicado a cada una de ellas.

## 1.4. Estructura de la memoria

1. Interés y objetivos: Se explica la importancia del cultivo de microalgas en la actualidad y las novedades introducidas respecto a anteriores trabajos. Se resume el proyecto en general, los puntos a tratar y los resultados obtenidos.
2. Revisión bibliográfica: Se detallan los aspectos más importantes encontrados en la bibliografía consultada, las hipótesis sobre las que se asientan las pruebas que se han ido realizando y a partir de las cuales se intentará avanzar. Se resumen también los principales aspectos biológicos y químicos que intervienen en el proceso y que es necesario conocer para comprender mejor las decisiones tomadas.
3. Material y métodos: en este apartado se describen todos los recursos utilizados, tanto la instalación real y su funcionamiento como el software empleado para los ensayos. También se describen los aspectos teóricos más relevantes y los métodos y teorías utilizados.
4. Resultados y discusiones: Se presentan los resultados analíticos y gráficos obtenidos. Se ha repetido el mismo estudio para diferentes condiciones de trabajo del fotobiorreactor. Se muestran las mejoras conseguidas en cuanto a pérdidas de CO<sub>2</sub> se refiere.
5. Conclusiones: En base a lo obtenido en el apartado anterior se comentan los resultados obtenidos y su impacto en la explotación de la instalación industrial.
6. Bibliografía: Se presenta la bibliografía consultada.

## 1.5. Resumen de resultados

Después de evaluar todas las variables que afectan al sistema y de aplicar los métodos necesarios, se ha llegado a la conclusión de que solo es posible la presencia de dos lazos de control simultáneos, uno para la temperatura y otro para el pH. Los resultados obtenidos matemáticamente son los esperados tras analizar la dinámica del sistema. El mantener estas dos variables en unos determinados márgenes es imprescindible para las microalgas. Como variables de control para estas dos salidas se ha obtenido la temperatura del intercambiador de calor y el caudal de CO<sub>2</sub> inyectado respectivamente, demostrando de nuevo que el análisis realizado corresponde con el comportamiento real y biológico del cultivo y por tanto del fotobiorreactor.

Para estos lazos de control se han diseñado dos controladores PI siguiendo las reglas de sintonía del método SIMC, consiguiendo respuestas aceptables en lazo cerrado. Estas respuestas se han mejorado añadiendo los *feedforward* necesarios para contrarrestar los efectos de las perturbaciones, variables no manipulables, que en este caso son la radiación solar, la temperatura ambiente y el caudal de medio suministrado.

Se han calculado las pérdidas de CO<sub>2</sub> comparando el control mediante controladores PI solamente con el control añadiendo controladores tipo *feedforward*. Las mejoras apreciadas gráficamente se ven reflejadas en estas cifras.



## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Las microalgas

Las microalgas son microorganismos unicelulares presentes en todos los medios acuosos, además de en muchas otras zonas ampliamente distribuidas por la biósfera. La importancia de las microalgas reside en su alta eficiencia para convertir la energía solar en biomasa, en sus elevadas tasas de producción y en su adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales [1]. Las posibilidades de utilización de las microalgas son diversas, como se resume de forma gráfica en la Figura 2.1.

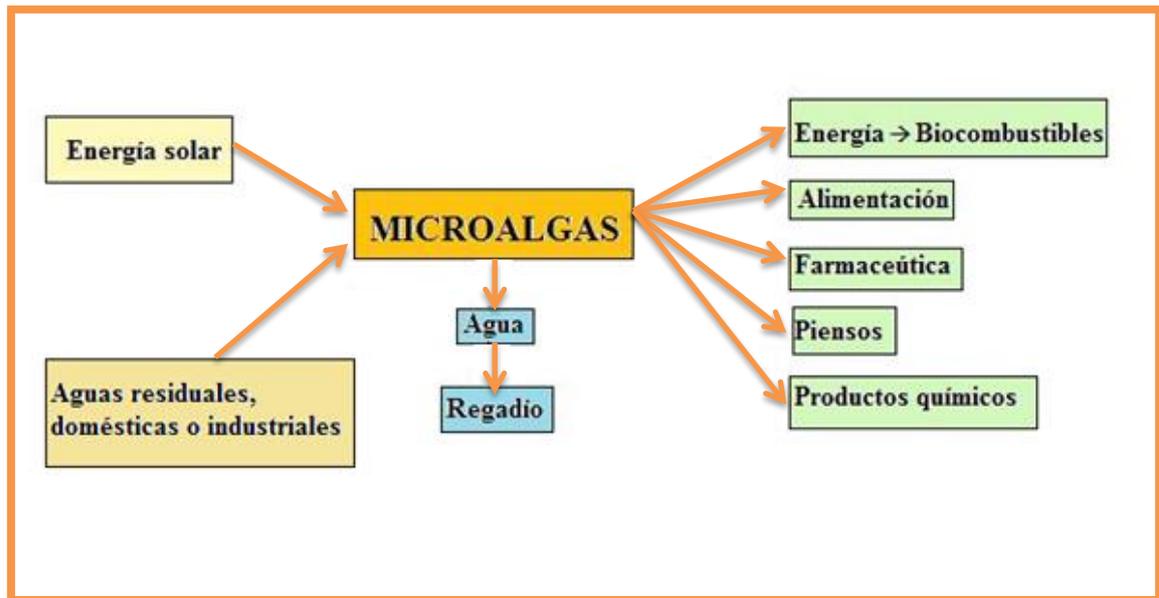


Figura 2.1. Esquema sobre las posibilidades de utilización de las microalgas.

El cultivo de microalgas además representa un método eficaz para la depuración de aguas residuales y, lo más importante, consumen una gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , lo que les confiere un interés especial teniendo en cuenta las circunstancias actuales del planeta y del medio ambiente.

Las microalgas han desarrollado estrategias que les permiten sobrevivir en condiciones ambientales extremas; aun así, para rentabilizar el proceso es importante crear un ambiente favorable. Se desarrollarán estrategias de control orientadas a maximizar el cultivo de estos microorganismos, es decir, a mantener las variables que afectan a su crecimiento en torno a los valores óptimos.

El crecimiento microalgal sigue la Ley del Mínimo [1] que dice que el factor limitante del crecimiento de una planta es aquel que se encuentra disponible en cantidades mínimas, al límite de las necesarias para la microalga. Esta ley se aplicó inicialmente solamente a nutrientes químicos, pero se ha ido ampliando su uso hasta incluir parámetros físicos como luz, temperatura, etc., incluso parámetros ambientales. De ahí la importancia de tener un control de todas las variables que afectan al crecimiento de estos organismos.

Los parámetros que afectan a la productividad microalgal son múltiples, algunos como la lluvia, la contaminación o la evaporación no será necesario tenerlos en cuenta por las características del fotobiorreactor tubular a usar, pues el cultivo circula por tubos cerrados, ajeno a los fenómenos anteriormente comentados.

Los parámetros que se van a estudiar y tratar de controlar para optimizar el crecimiento del cultivo son por tanto:

-Radiación solar: Tanto la intensidad luminosa como la longitud de onda de la radiación afectarán al crecimiento y metabolismo de las algas. La tasa de fotosíntesis es directamente proporcional a la intensidad luminosa recibida hasta cierto punto, pues cuando ésta es demasiado elevada puede perjudicar el proceso de la fotosíntesis [1]. Cuando la intensidad excede la capacidad del ciclo del carbono en la planta se produce la llamada fotoinhibición, mecanismo por el que se destruyen los pigmentos de las plantas impidiendo la conversión de energía y provocando una disminución en la eficiencia de la absorción del dióxido de carbono y la liberación de oxígeno. Es por esta razón por la que la instalación se encuentra dentro de un invernadero, protegida de altas intensidades de luz solar.

El cultivo está sometido a ciclos de luz-oscuridad, luz por el día, oscuridad por la noche. Dado que la radiación solar no es controlable (se pueden utilizar mallas de sombreo pero es una variable atmosférica sobre la que no existe posibilidad de manipulación), se tratará como una perturbación en el sistema y se hará un estudio diferenciado entre el día y la noche.

-Temperatura: La biomasa microalgal responde continuamente a la temperatura ambiental. La temperatura celular tiende a igualarse a la temperatura del medio de cultivo. La temperatura por tanto afecta a las reacciones celulares y a la naturaleza del metabolismo de estos organismos, así como a los requerimientos nutricionales y la composición de la biomasa. Con el aumento de la temperatura aumenta también la tasa de crecimiento de las microalgas, dentro de un determinado rango. El rango óptimo para la mayoría de las microalgas es de 18 a 25°C [1].

La temperatura ambiente será tratada también como perturbación, al no poder ser modificada, y se intentará controlar el sistema para conseguir que el cultivo se encuentre en torno a los valores óptimos.

-pH: Es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta. Un pH demasiado bajo o demasiado alto es letal para estos microorganismos. El rango óptimo se encuentra entre 7 y 8. El pH determina la solubilidad del CO<sub>2</sub> y de los minerales e influye directa e indirectamente en el metabolismo de las microalgas. El pH se verá afectado por la radiación solar, ya que con ésta el nivel de CO<sub>2</sub> disminuye, aumentando el de O<sub>2</sub>, y haciendo por tanto que el pH se eleve.

-Fuente de carbono: se inyectará CO<sub>2</sub> puro en forma gaseosa tanto para añadir el carbono como nutriente como para controlar el nivel de pH. La radiación solar y, como consecuencia, el efecto de la fotosíntesis, provocan que se consuma más CO<sub>2</sub> y se libere más O<sub>2</sub>, haciendo que el nivel de pH se eleve. Para contrarrestar este efecto se le suministra CO<sub>2</sub> al cultivo dando lugar a la formación de ácido carbónico, lo que se traduce en un descenso del nivel de pH. El consumo de dióxido de carbono para tal fin representa hasta el 30% de los costes de producción. Esto se debe principalmente a que las pérdidas de CO<sub>2</sub> en este tipo de sistemas son superiores al 75%. Uno de los objetivos de este proyecto es aumentar la eficiencia en el consumo de dióxido de carbono por parte de las microalgas, haciendo disminuir las pérdidas y aprovechando el máximo posible del inyectado.

Las condiciones climatológicas que se registran en Almería, las numerosas horas de luz solar y la poca nubosidad, unidas a las diferencias térmicas entre día y noche, hacen de esta localidad un lugar óptimo para el cultivo de las microalgas.

El cultivo de microalgas se ha hecho normalmente en fotobiorreactores abiertos tipo *open raceway* por su sencillez y bajos costes principalmente, sin embargo, como desventajas presentan la facilidad de contaminación y dificultad para controlar las condiciones de cultivo. En el caso a estudiar, las microalgas se cultivan en fotobiorreactores tubulares cerrados cuyo funcionamiento se explicará más adelante.

## 2.2. Modelado del pH

Antes de llevar a cabo el control de la instalación, es necesario estudiar el comportamiento del fotobiorreactor y de las microalgas contenidas en él. Obtener un buen modelo del proceso es imprescindible para poder diseñar estructuras de control más avanzadas y robustas que las ya existentes.

Para el modelado se ha tenido en cuenta la distribución del fotobiorreactor. Se distinguen principalmente dos zonas diferenciadas, la columna de burbujeo o desgasificador y la zona de lazo externo, por lo tanto se han desarrollado para cada variable del sistema dos balances de materia correspondientes a cada zona de dicho fotobiorreactor.

Teniendo presente la Ley de Conservación de la Materia que establece que en un sistema cerrado la misma masa que entra o se produce en el sistema deba salir o

acumularse dentro de él, se han realizado dos balances de materia, uno en fase líquida y otro en fase gaseosa para las principales variables que intervienen: oxígeno disuelto, pH del cultivo, concentración de biomasa, concentración del carbono inorgánico total, fracción molar de oxígeno, fracción molar de dióxido de carbono y pérdidas de CO<sub>2</sub> [8]. Tras estos balances se han realizado diferentes ensayos para la calibración de las constantes del sistema. Se han realizado en diferentes días y posteriormente se ha validado el pH, por ser la variable de más repercusión en el cultivo, con datos de días distintos a los utilizados en el proceso de calibración.

En la literatura existen modelos que relacionan la dinámica del pH con la inyección de CO<sub>2</sub>. Se han realizado estudios para controlar el pH del cultivo usando como variable de manipulación la apertura de una válvula de inyección de CO<sub>2</sub> [7].

Basándose en diversos experimentos y mediante el método de Monte Carlo [6], [7], se ha llegado a la siguiente aproximación en la que se relaciona la salida de pH con la entrada de inyección de CO<sub>2</sub> y la radiación solar a través de dos funciones de transferencia (ecuación 2.1):

$$pH = \underbrace{\frac{\overbrace{k_1}^{FT1.1}}{(1 + \tau_1 \cdot s)}}_{FT1} \cdot \underbrace{\frac{\overbrace{k_{1,2} \cdot \omega_n^2}^{FT1.2}}{(s^2 + 2 \cdot \delta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2)}}_{FT1} \cdot e^{-tr_1 \cdot s} \cdot CO_2 + \frac{\overbrace{k_2}^{FT2}}{(1 + \tau_2 \cdot s)} \cdot I \quad (2.1)$$

Siendo  $pH$  el pH del cultivo,  $CO_2$  el porcentaje de apertura de la válvula de CO<sub>2</sub>, e  $I$  la radiación global. La primera función de transferencia, que relaciona el pH con el CO<sub>2</sub> (FT1), incluye el tiempo de residencia del CO<sub>2</sub> en el campo solar (que viene determinado por el caudal de fluido). Está compuesta por una función de transferencia de primer orden, FT1.1, que representa la dinámica principal de la planta (ecuación 2.2) y por FT1.2 que representa el movimiento oscilatorio que tiene lugar por la recirculación del cultivo (ecuación 2.3). El término de la derecha relaciona el pH con la radiación solar, a través de una función de transferencia de primer orden (FT2) (ver ecuación 2.4).

Para obtener la anterior expresión, los experimentos realizados han sido:

- Ensayos nocturnos sin influencia de la radiación solar. Se obtuvieron los parámetros del modelo correspondiente a la función de transferencia principal del sistema introduciendo un pulso en la variable manipulada, la válvula de CO<sub>2</sub>:

$$\frac{k_1}{(1 + \tau_1 \cdot s)} e^{-tr_1 \cdot s} \quad (2.2)$$

- Ensayos utilizando una malla de sombreo para poder realizar cambios en la radiación solar, en periodos donde ésta es relativamente constante (en torno al mediodía solar), para obtener el modelo de la radiación solar:

$$\frac{k_2}{(1 + \tau_2 \cdot s)}$$

(2.3)

- Tras realizar ensayos introduciendo trenes de pulsos de CO<sub>2</sub> en presencia de luz solar y aplicar el método de Monte Carlo para ajustar los parámetros teniendo en cuenta tanto la dinámica principal como la radiación solar, se añadió un sistema de segundo orden que responde al efecto oscilatorio producido por la recirculación del cultivo:

$$\frac{k_{1,2} \cdot \omega_n^2}{(s^2 + 2 \cdot \delta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2)}$$

(2.4)

Como se puede observar, el pH del cultivo se ve afectado principalmente por el caudal de CO<sub>2</sub> suministrado y por la radiación solar. El aporte de CO<sub>2</sub> contribuye a la formación de ácido carbónico provocando descensos en el valor de pH, mientras que debido a la fotosíntesis que tiene lugar en presencia de radiación solar, se genera más O<sub>2</sub>, consumiéndose CO<sub>2</sub> y provocando aumentos del valor de pH.

### 2.3. Control del pH

En cuanto al control, el principal objetivo es el conseguir un funcionamiento seguro y estable pero además, mediante un adecuado diseño y operación del fotobiorreactor, se desea conseguir reducir considerablemente las pérdidas de CO<sub>2</sub> anteriormente comentadas.

Hasta el momento los estudios de control llevados a cabo se han centrado en el comportamiento del pH. El control del pH es necesario para mantener las condiciones óptimas de operación. Como ya se comentó, el aporte de CO<sub>2</sub> para controlar el pH permite además suministrar carbono como nutriente que es fundamental para la fotosíntesis e incrementar la productividad.

El consumo de CO<sub>2</sub> es alto y se debe reducir tanto para disminuir el coste de producción como para mejorar la productividad por optimización de las condiciones de cultivo. El aporte de CO<sub>2</sub> supone un coste elevado, por lo que se hace indispensable minimizar las pérdidas, con lo que además estaremos contribuyendo a eliminar parte de este gas contaminante de la atmósfera.

Las pruebas y estudios existentes hasta el momento se centran en el control del pH y minimización de pérdidas de  $\text{CO}_2$ . Este tipo de fotobiorreactor ha contado siempre con válvulas todo/nada que no permitían hacer un control exhaustivo de las variables de entrada. El comportamiento del control todo/nada se basa en inyectar o dejar de hacerlo en función del valor de la variable a controlar, lo que provoca una continua oscilación respecto al valor de referencia y demasiados cambios en la señal de control.

El principal objetivo de los estudios realizados ha sido el de capturar la dinámica del proceso y las posibles perturbaciones, y mejorar las técnicas de control existentes. Se han diseñado estrategias de control basadas en PI pensadas para utilizar modulación por ancho de pulsos sobre las válvulas todo nada (PWM, *Pulse-Width Modulation*) y controladores para compensar las perturbaciones de la radiación solar. Los estudios y experimentos han sido incluso probados en la planta real obteniéndose resultados prometedores [3, 6, 7, 13]. Estas estrategias de control permiten reducir los cambios en la señal de control así como también las pérdidas de  $\text{CO}_2$ .

En simulación se demuestra cómo el controlador PI mejora considerablemente los resultados del control todo/nada, al añadir el *feedforward* las mejoras son algo mayores, aunque se apreciarán más en el sistema real. Se muestran los resultados en la Figura 2.2.

Para los ensayos en el sistema real, representados en la Figura 2.3, se comienza a controlar el pH a partir de un cierto valor de radiación solar. Los resultados obtenidos muestran lo mismo que en simulación pero la mejora que representa el uso de *feedforward* es bastante mayor pues los valores reales de radiación varían más que en las simulaciones. La mejora es apreciable sobre todo en la reducción de la varianza de la señal de control.

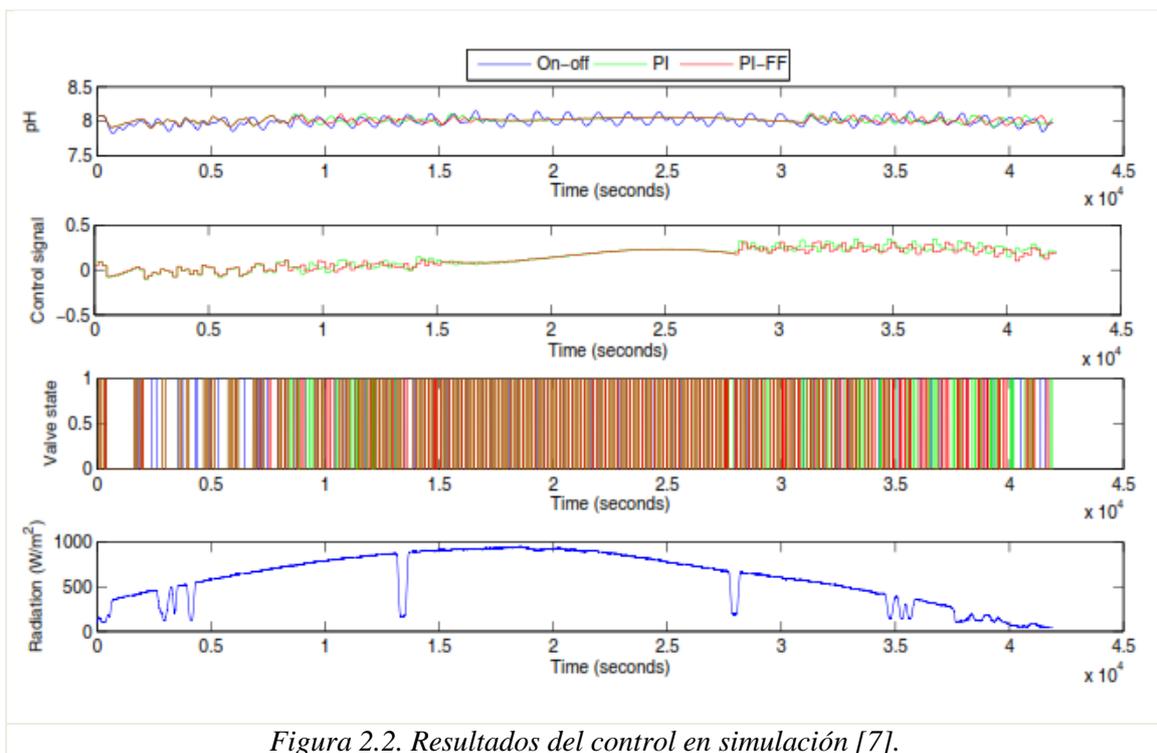


Figura 2.2. Resultados del control en simulación [7].

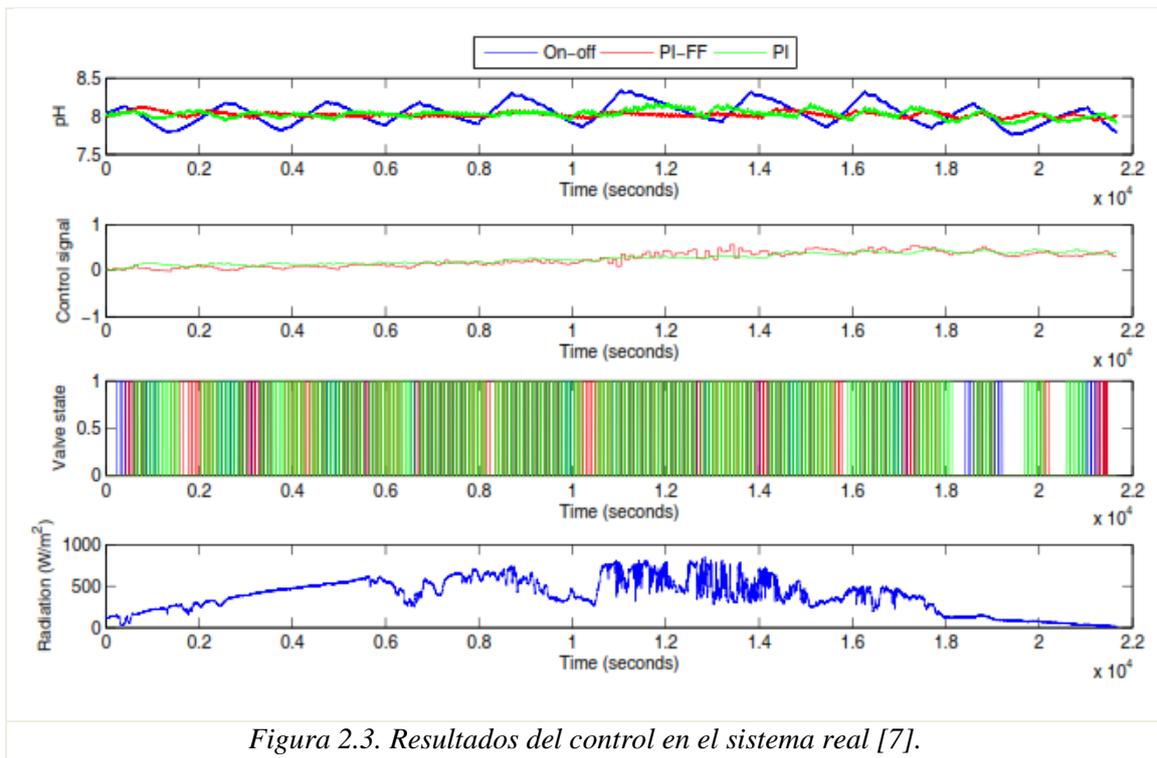


Figura 2.3. Resultados del control en el sistema real [7].

En cuanto a las pérdidas de  $\text{CO}_2$ , se han realizado análisis exhaustivos teniendo en cuenta el  $\text{CO}_2$  inyectado, el consumido por las microalgas y el perdido y se ha llegado a la conclusión de que una considerable reducción del  $\text{CO}_2$  inyectado es causante de decrementos en el  $\text{CO}_2$  perdido. Además como se puede ver en la tabla 2.4, se demuestra que el uso de PI más *feedforward* para el control logra el objetivo deseado de minimizar las pérdidas:

	On/Off	PI	PI+FF
$\text{CO}_2$ inyectado [g]	4060	3440	2804
$\text{CO}_2$ perdido [g]	2022	1162	723
$\text{CO}_2$ consumido [g]	2039	2278	2081
Pérdidas a la entrada [%]	49.8	33.8	25.8
Pérdidas a la salida [%]	99.2	51.0	34.7

Tabla 2.4. Comparación pérdidas de  $\text{CO}_2$  [7].

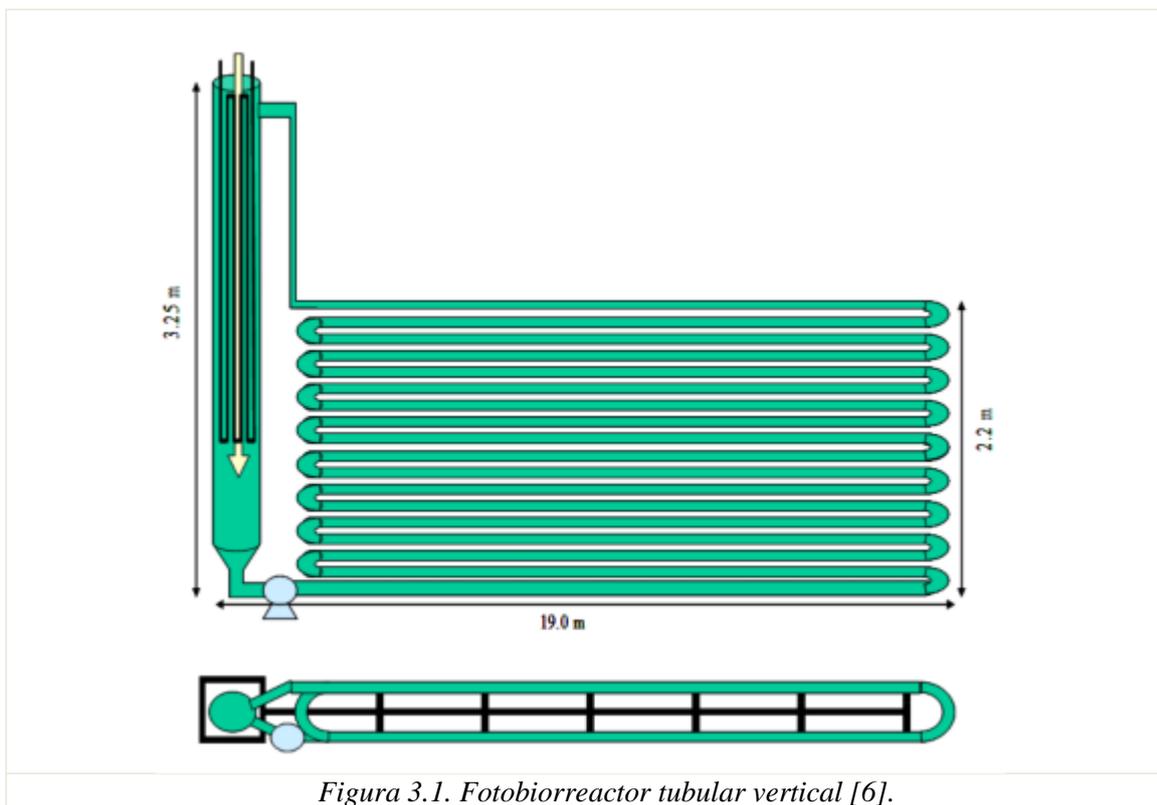


### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1. Descripción del fotobiorreactor tubular

El fotobiorreactor utilizado en el presente estudio es de tipo tubular vertical cerrado. Las pruebas a las que se ha estado haciendo referencia anteriormente se han realizado en dicho reactor ubicado en la Estación Experimental “Las Palmerillas”, de la Fundación Cajamar, centro de investigación agrícola ubicado en El Ejido, Almería [10].

Este centro cuenta con diez fotobiorreactores como el de la figura. Cada uno de ellos tiene una capacidad de 3000 l.



Este tipo de fotobiorreactor tubular, su estructura se muestra en la Figura 3.1, está compuesto por una columna de burbujeo de 3.25 m de altura en la que se mezcla el cultivo, se realiza el intercambio de calor, se añaden los nutrientes y se obtiene el cosechado; un lazo externo de 350 m lineales de tubo de metacrilato por donde discurre

el cultivo, expuesto a la luz solar y orientado al sur, y una bomba centrífuga de 1.5 kW que se encarga de la circulación del cultivo durante todo el día [6].

Los diez fotobiorreactores, tal y como se muestra en la Figura 3.2, se encuentran dentro de un invernadero multitúnel de entre 3 y 4.5 m de altura y de más de 700 m<sup>2</sup> de superficie, cubierto de polietileno tricapa. Entre los diez hacen posible un volumen de cultivo de 30 m<sup>3</sup>, consiguiendo una capacidad de producción neta anual de 6000 kg/año aproximadamente.



*Figura 3.2. Fotobiorreactores verticales reales [11].*

En cuanto a la instrumentación, estos fotobiorreactores cuentan, cada uno individualmente, con las válvulas y rotámetros necesarios para el control de las entradas, además de un cuadro eléctrico para la parte eléctrica y un multímetro de medida en línea para las variables de salida, disponiendo tanto de relés como de salidas analógicas para cada una de estas señales.

Para el proceso de cultivo completo son necesarias otras infraestructuras tales como cuatro columnas de burbujeo en las que se mantienen los inóculos (Figura 3.3) y un fotobiorreactor tubular horizontal de 3.5 m<sup>3</sup> para el crecimiento de cultivo e inóculos (Figura 3.4), dos casetas prefabricadas, una para la preparación del medio, la

centrifugadora y el control de la planta, y otra en la que se encuentra el liofilizador industrial.



*Figura 3.3. Columnas para la preparación del cultivo [11].*



*Figura 3.4. Fotobiorreactor horizontal [11].*

### 3.1.2. Proceso de cultivo y obtención de biomasa

La microalga utilizada en estas instalaciones es *Scenedemus almeriensis*, descubierta en la Estación Experimental “Las Palmerillas” por investigadores de la Universidad de Almería y caracterizada por su alta velocidad de crecimiento y gran tolerancia a diferentes condiciones de cultivo [12].

Esta microalga fue patentada en España en 2007 y más tarde en el resto de Europa, Japón y EEUU, y ha sido reconocida como nueva y depositada en la colección de cultivos y protozoos del Centro de Hidrología y Ecología en Ambleside, Reino Unido, con el código CCAP 276/24.

Este tipo de alga, se cultiva en agua dulce y es capaz de soportar temperaturas incluso superiores a  $45^{\circ}\text{C}$  y valores de pH hasta de 10, pero es importante para su crecimiento mantener estas variables en torno a sus valores óptimos, que son, una temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$  y un pH de 8 [16].

El medio de cultivo se prepara en dos depósitos de 1500 l cada uno, conectados con un cabezal de riego que añade de forma automática una mezcla nutritiva compuesta por agua y fertilizantes agrícolas, esta solución se impulsa mediante una bomba centrífuga y pasa a través de unos filtros de aguja para limpieza. Existe otro depósito de 1500 l destinado a la limpieza y desinfección de los reactores, tarea que se realiza cada 6 meses.

Tras preparar el cultivo, este es mezclado en la columna de burbujeo, donde además se añadirán los nutrientes necesarios y se recolectará el cosechado posteriormente a través del rebosadero de la parte superior, que lo llevará a un tanque de cosechado general. En esta columna de burbujeo se produce también la liberación del  $\text{O}_2$  producido por las microalgas durante la fotosíntesis y el intercambio de temperatura, haciendo pasar agua procedente de una balsa a través de un intercambiador de calor tubular.

La bomba trabaja durante todo el día haciendo posible la recirculación del cultivo entre el lazo externo y la columna, además de pequeñas partículas de polietileno que contribuyen a mantener limpios los tubos.

El suministro de  $\text{CO}_2$  se hace a través de una línea de alta presión que distribuye el  $\text{CO}_2$  procedente de un tanque criogénico, por toda la finca. Antes de la entrada en el fotobiorreactor se reduce la presión a través de un manorreductor y redes de tuberías, finalmente la entrada tiene lugar justo después de la bomba centrífuga, se controla mediante una electroválvula todo/nada y se regula el caudal de forma manual mediante un rotámetro.

Para el suministro de aire se utiliza una soplante de 2 kW regulada mediante un variador de frecuencia para suministrar el caudal de aire en función de las condiciones

de cultivo. Se emplea una conducción de poliamida ramificada para hacer llegar este aire a cada fotobiorreactor.

Una vez se obtiene el cosechado, se conduce de forma automática al ya comentado tanque de cosechado general, de 800 l de volumen, desde el cual se impulsa su contenido mediante una bomba de paletas flexibles a la centrifugadora. La centrifugadora es capaz de trabajar con un caudal de hasta 4000 l/h pero opera normalmente a un caudal de 2000 l/h con descargas cada 10 minutos. Aquí se separa el agua de la biomasa de microalgas, obteniéndose concentrados de biomasa de hasta el 10% y el 20% dependiendo de la apertura seleccionada. La biomasa puede tener diferentes destinos dependiendo del uso a darle, se puede almacenar en contenedores de 5 l a 2°C para prolongar su vida útil, congelar en bandejas de 2 kg a -10 °C o pasar directamente a la liofilización.

La liofilizadora es la encargada de todo el proceso existente desde la congelación hasta el secado. Se realiza una primera congelación a -20°C durante 2 horas, se hace vacío hasta 2 mmHg y se eleva la temperatura a 10°C durante 12 horas, provocando que el agua se vaya evaporando poco a poco hasta tener la biomasa seca completamente. Antes de la siguiente liofilización se eleva la temperatura del equipo para descongelar el hielo formado [6].

### 3.1.3. Control existente en la planta

Actualmente toda la planta se gestiona de forma automática mediante un sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) elaborado por el Grupo de Automática, Robótica y Mecatrónica de la Universidad de Almería. Mediante este software se regula el pH de la planta, se registran todos los datos de operación y se supervisa el funcionamiento general de la planta.

Los fotobiorreactores operan normalmente en continuo, excepto durante cada parada y puesta en marcha, se le suministra un caudal de nutrientes de 200 l/h a cada uno durante 5 horas, de modo que cada día se renuevan 1000 l en cada uno.

## 3.2. Software utilizado

Para el desarrollo del presente estudio se ha contado con los datos obtenidos de la planta los días 3, 4, 6 y 7 de febrero de 2014, además de un simulador del fotobiorreactor realizado en *Simulink*, entorno *MATLAB*, por el Departamento de Informática junto con el de Ingeniería Química, ambos de la Universidad de Almería, y que simulan el comportamiento del fotobiorreactor real [9]. Este simulador recoge un

modelo acorde a la dinámica del sistema que incluye todas las variables que afectan al cultivo tanto en la columna de burbujeo como en el lazo externo. El bloque correspondiente al reactor y los vectores de entrada con los datos reales se detallan en la Figura 3.5.

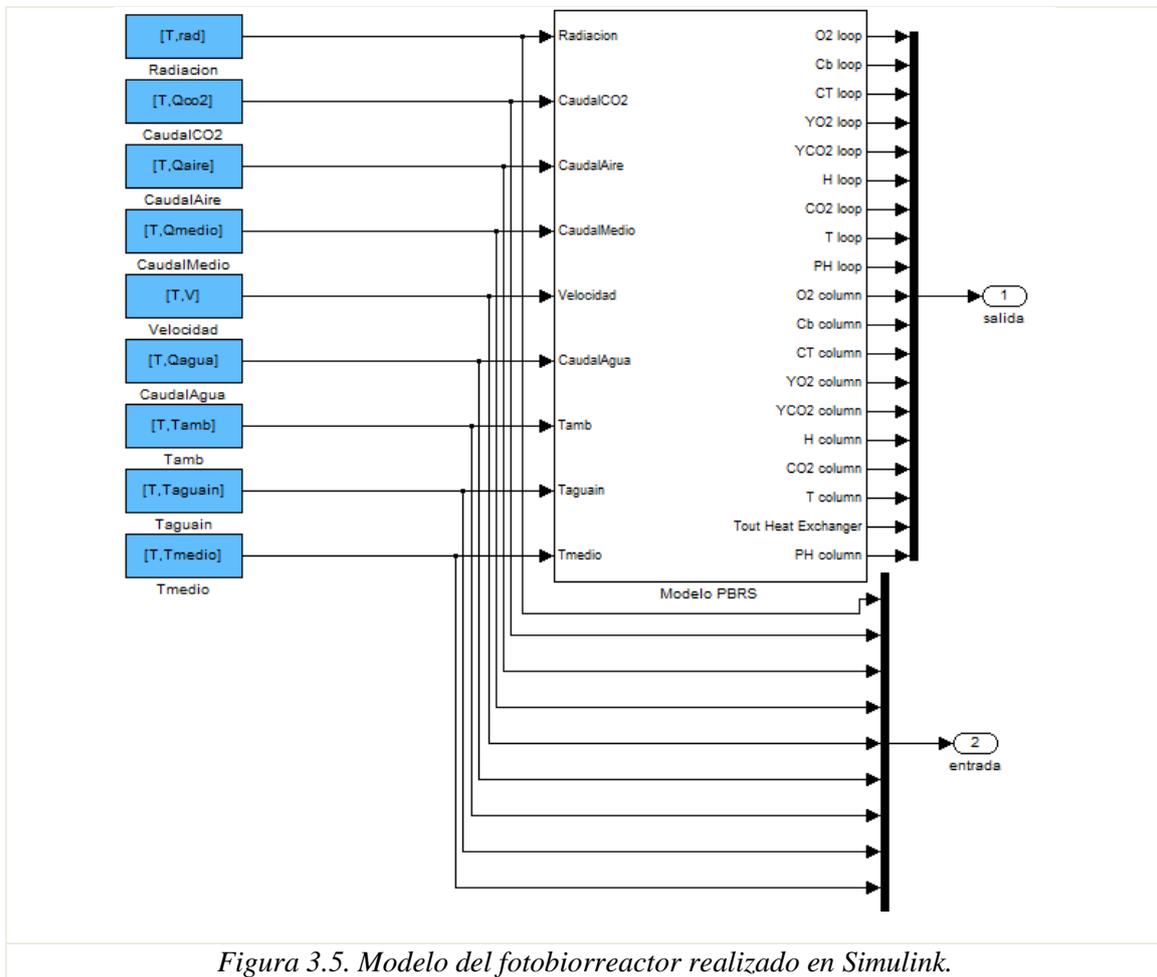


Figura 3.5. Modelo del fotobiorreactor realizado en Simulink.

➤ Las variables de entrada son:

- **Radiación (rad)**: será tratada como perturbación del sistema ya que responde a las condiciones climatológicas del día, específicamente a la radiación solar incidente.
- **Caudal CO<sub>2</sub> (QCO2)**: Es el caudal de CO<sub>2</sub> que se le proporciona al cultivo.
- **Caudal de aire (Qaire)**: es el aporte de aire inyectado al cultivo.
- **Caudal de medio (Qmedio)**: es el valor del caudal de medio de cultivo proporcionado al fotobiorreactor. Es el aporte de microalgas “nuevas” que se realiza. Será considerado una perturbación ya que no es una variable que se pueda manipular para obtener una salida determinada, el aporte de medio debe hacerse bajo unas condiciones concretas.
- **Velocidad (V)**: es la velocidad a la que circula el cultivo y que se ha mantenido constante durante los ensayos.

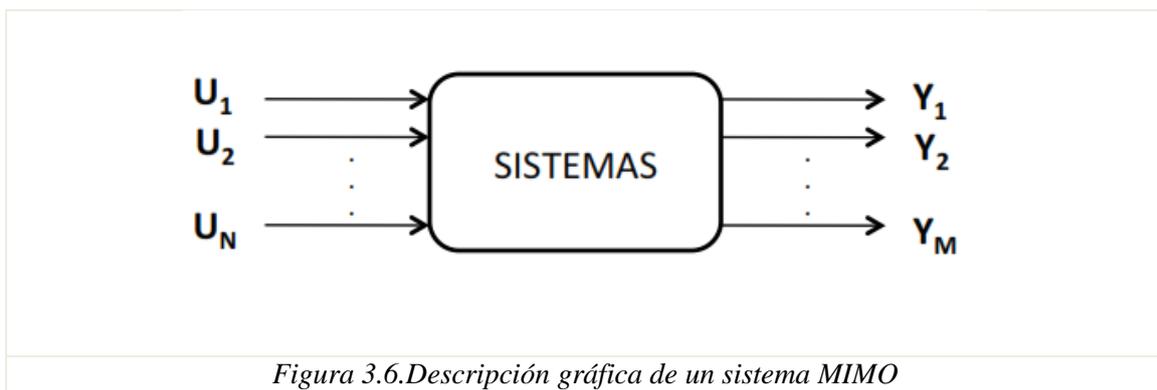
- Caudal de agua (Qagua): es el caudal de agua aportado al cultivo.
- Temperatura ambiente (Tamb): será considerada también como una perturbación pues depende de las condiciones meteorológicas.
- Temperatura agua intercambiador (Taguain): es la temperatura del agua introducida en el intercambiador de calor para regular la temperatura del cultivo.
- Temperatura del medio (Tmedio): es la temperatura a la que se encuentra el medio introducido en el sistema.

En cuanto a las variables de salida se encuentran por duplicado, para el lazo exterior, *loop* y para la columna de burbujeo, *column*. Las variables de salida son:

- O2: concentración de oxígeno en fase líquida.
- Cb: concentración de biomasa.
- CT: concentración total de carbono inorgánico.
- YO2: fracción molar de oxígeno en fase gaseosa.
- YCO2: fracción molar de dióxido de carbono en fase gaseosa.
- H: fracción molar de hidrógeno en el cultivo
- CO2: concentración de dióxido de carbono en fase líquida.
- T: temperatura del cultivo.
- pH: valor de pH del cultivo.

Además encontramos la variable *Tout Heat Exchanger*, que indica la temperatura de salida del agua del intercambiador.

Como podemos observar el sistema en cuestión es un sistema multivariable también conocido como MIMO (*Multiple Inputs Multiple Outputs*), tiene más de una entrada y una salida. Se describe gráficamente en la Figura 3.6 y analíticamente en la ecuación 3.1:



$$Y(s) = \begin{pmatrix} Y_1(s) \\ \vdots \\ Y_m(s) \end{pmatrix} = G(s)U(s) = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & \cdots & G_{1n}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m1}(s) & \cdots & G_{mn}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ \vdots \\ U_n(s) \end{pmatrix}$$

(3.1)

Siendo  $G(s)$  la matriz de funciones de transferencia.

Los ensayos se realizan por días, las 24 horas de cada día se han muestreado cada 60 segundos ( $T_m=60$  s), obteniéndose 1440 muestras para cada día y se estudiarán las variables de salida en el lazo exterior, donde se recibe mayor radiación solar y tienen lugar principalmente los cambios de temperatura y pH. Se han establecido cuidadosamente las condiciones de contorno del problema de simulación, es decir, la entrada al lazo exterior corresponde con la salida de la columna en cada momento y la salida del lazo con la entrada a la columna.

Entre los archivos facilitados se encuentra también un archivo '.m' programado para ejecutar el anteriormente comentado archivo '.mdl' o *Simulink* y en el que se definen tanto estados iniciales como variables auxiliares y ajuste de los datos reales a la simulación.

*Simulink* es un entorno, integrado en *MATLAB* [15], en el que se usan diagramas de bloques para la simulación y el diseño de sistemas basados en modelos. Cuenta con múltiples herramientas para el modelado y simulación de sistemas dinámicos además de la posibilidad de exportar los resultados a *MATLAB*, donde poder realizar más análisis.

### 3.3. Métodos y estrategias de identificación y modelado

Para la identificación de los modelos lineales para el sistema se han seguido los pasos de la Figura 3.7:

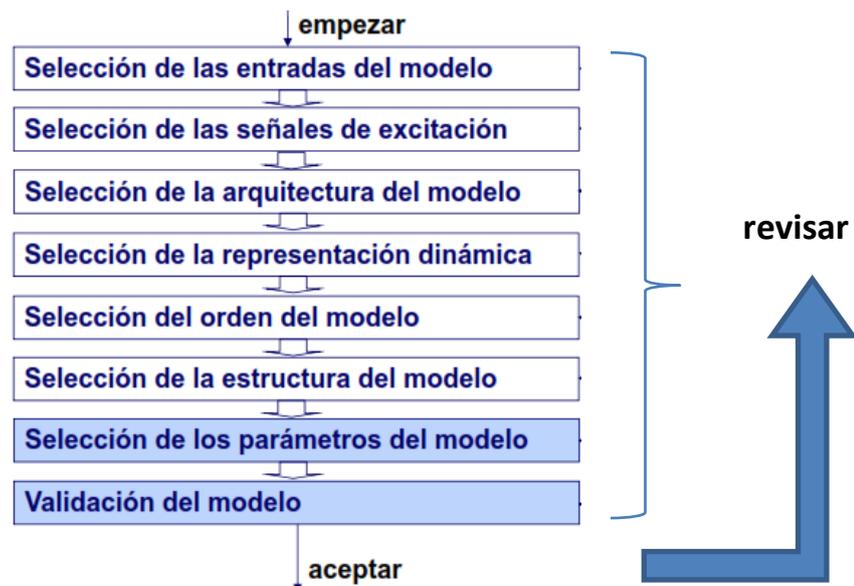


Figura 3.7. Diagrama de pasos a seguir para el modelado de sistemas.

Primeramente se han aplicado variaciones en las entradas, una a una, dejando el resto constantes para analizar el efecto en las salidas. Se les ha aplicado trenes de pulsos de una amplitud de entre el 10% y el 50% del valor medio de cada entrada, teniendo en cuenta las variaciones reales que pueden experimentar estas entradas. Estos pulsos de ondas cuadradas se han configurado de la siguiente manera (ver Figura 3.8):

- Periodo: 2400 [s]. Como el tiempo de muestreo es  $T_m=60$  [s], para cada periodo se registrarán 40 muestras.
- Anchura de pulso: equivalente al 75% del valor del periodo, 1800 [s]. No se ha variado la anchura del pulso durante los ensayos dado que, por el número de parámetros a identificar, no ha sido necesario.
- Fase: para los ensayos durante la noche ha sido de 12000 [s] para el tramo anterior a la salida del sol y de 66840 [s] para el posterior. Para los ensayos durante el día ha sido igual a 48000 [s]. En todos los casos estos valores son múltiplos del tiempo de muestreo y se han dado en torno a los puntos de operación.

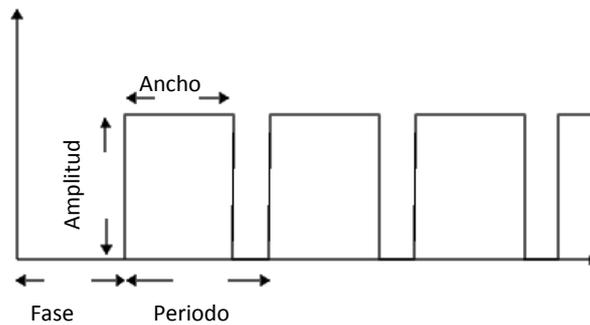


Figura 3.8. Parámetros del tren de pulsos.

Las entradas y salidas se detallan en las tablas 3.9.a y 3.9.b respectivamente.

$u_i$	Variable de entrada
$u_0$	Radiación solar [ $W/m^2$ ]
$u_1$	Caudal de $CO_2$ [ $l/min$ ]
$u_2$	Caudal de aire [ $l/min$ ]
$u_3$	Caudal de medio [ $l/min$ ]
$u_4$	Velocidad [ $m/s$ ]
$u_5$	Caudal de agua [ $l/min$ ]
$u_6$	Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
$u_7$	Temperatura intercambiador [ $^{\circ}C$ ]
$u_8$	Temperatura del medio [ $^{\circ}C$ ]

Tabla 3.9.a. Entradas

$y_i$	Variable de salida
$y_1$	$O_2$ [%]
$y_2$	$C_b$ [ $kg/m^3$ ]
$y_3$	$CT$ [ $kg/m^3$ ]
$y_4$	$YO_2$ [ $mol O_2 / mol N_2$ ]
$y_5$	$YCO_2$ [ $mol CO_2 / mol N_2$ ]
$y_6$	$H$ [ $mol/m^3$ ]
$y_7$	$CO_2$ [ $mol/m^3$ ]
$y_8$	$T$ [ $^{\circ}C$ ]
$y_9$	pH

Tabla 3.9.b. Salidas

Por los estudios realizados anteriormente y descritos en la literatura conocemos la arquitectura del modelo del pH, para el resto de variables se ha supuesto inicialmente la misma arquitectura y se han realizado diferentes pruebas hasta encontrar la más adecuada a cada caso. Se ha utilizado la herramienta *ident*, *System Identification Toolbox*, de *MATLAB* [15] para hallar el orden, tipo y parámetros de los modelos. Esta herramienta permite obtener modelos de sistemas dinámicos a partir de datos de entrada y de salida, y ofrece múltiples posibilidades para trabajar en diferentes condiciones.

Se ha comenzado por modelar con funciones de transferencia de primer orden, buscando la sencillez, utilizando aproximaciones que no recogen toda la dinámica del sistema pero que se acercan bastante a su comportamiento real. Se ha hecho un primer estudio con modelos de primer orden principalmente y dejando a un lado las oscilaciones provocadas por la recirculación del cultivo en el interior del sistema. En el segundo estudio se recogen este tipo de comportamientos, se añaden funciones de órdenes mayores y polos no reales, consiguiendo una mayor exactitud a costa de incrementar la complejidad del modelo.

Teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento del fotobiorreactor, se han hecho los anteriores estudios separando los datos de la noche por un lado, y los del día por otro. La principal diferencia es la presencia de radiación solar durante el día, que afecta a la temperatura pero sobre todo al pH del cultivo. Para la noche se ha cogido todo el tramo en el que la radiación es cero, mientras que para el día el estudio se ha realizado en torno al mediodía solar, momento en el que la radiación comienza a alcanzar sus valores máximos.

Durante la noche el fotobiorreactor se verá afectado únicamente por la perturbación de la temperatura ambiente,  $u_6$ . Además se ha tenido en cuenta el efecto que supone el aporte de medio,  $u_3$ , aunque experimentalmente se realice durante el día. El sistema quedaría como se muestra en la ecuación 3.2.

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} & G_{17} & G_{18} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} & G_{27} & G_{28} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} & G_{37} & G_{38} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} & G_{46} & G_{47} & G_{48} \\ G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & G_{55} & G_{56} & G_{57} & G_{58} \\ G_{61} & G_{62} & G_{63} & G_{64} & G_{65} & G_{66} & G_{67} & G_{68} \\ G_{71} & G_{72} & G_{73} & G_{74} & G_{75} & G_{76} & G_{77} & G_{78} \\ G_{81} & G_{82} & G_{83} & G_{84} & G_{85} & G_{86} & G_{87} & G_{88} \\ G_{91} & G_{92} & G_{93} & G_{94} & G_{95} & G_{96} & G_{97} & G_{98} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Durante el día, se tendrá en cuenta, además, la radiación solar,  $u_0$ . La ecuación 3.3 muestra cómo quedaría el sistema.

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{10} & G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} & G_{16} & G_{17} & G_{18} \\ G_{20} & G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & G_{25} & G_{26} & G_{27} & G_{28} \\ G_{30} & G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & G_{35} & G_{36} & G_{37} & G_{38} \\ G_{40} & G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & G_{45} & G_{46} & G_{47} & G_{48} \\ G_{50} & G_{51} & G_{52} & G_{53} & G_{54} & G_{55} & G_{56} & G_{57} & G_{58} \\ G_{60} & G_{61} & G_{62} & G_{63} & G_{64} & G_{65} & G_{66} & G_{67} & G_{68} \\ G_{70} & G_{71} & G_{72} & G_{73} & G_{74} & G_{75} & G_{76} & G_{77} & G_{78} \\ G_{80} & G_{81} & G_{82} & G_{83} & G_{84} & G_{85} & G_{86} & G_{87} & G_{88} \\ G_{90} & G_{91} & G_{92} & G_{93} & G_{94} & G_{95} & G_{96} & G_{97} & G_{98} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

En cuanto a la validación de los modelos obtenidos se ha hecho sobre días diferentes. Se ha analizado la radiación solar de todos los días, teniendo en cuenta los cambios producidos por la nubosidad. Se ha decidido tomar los días 3 y 6 para la obtención de los modelos y los días 4 y 7 para validarlos, teniendo así en cada caso un día de poca nubosidad y otro de bastante más. A pesar de tener únicamente 4 días para el ajuste de modelos, se ha considerado que los resultados obtenidos pueden ser válidos por tratarse de modelos de bajo orden y de datos con riqueza dinámica suficiente.

Las funciones obtenidas son principalmente de primer orden [14], y tienen la forma descrita en la ecuación 3.4:

$$G_{ij} = \frac{k}{(1 + \tau \cdot s)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (3.4)$$

Para el estudio en el que se ha tenido en cuenta el efecto de recirculación del cultivo aparecen oscilaciones en el sistema y los modelos que recogen este comportamiento aumentan de orden, son normalmente de segundo orden con polos conjugados. La función de transferencia estará compuesta por el producto de la función de primer orden correspondiente a la dinámica principal y de la de orden superior de la siguiente manera (ecuación 3.5):

$$G_{ij} = \frac{k}{(1 + \tau \cdot s)} \cdot \frac{(\beta \cdot s + 1)}{(T_w^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \delta \cdot T_w \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (3.5)$$

Siendo:

- **k**: ganancia estática del sistema. Está relacionada con la amplitud de la respuesta del sistema en régimen permanente en función de la entrada al mismo.
- **$\tau$** : constante de tiempo. Es una medida de rapidez del sistema. El polo del sistema estará en  $s = \frac{-1}{\tau}$ .

- $t_r$  : tiempo de retardo. Tiempo que tarda en reaccionar la salida desde que se le aplica la entrada.
- $T_w = \frac{1}{\omega_n}$  , Siendo  $\omega_n$ : frecuencia natural del sistema. Es la frecuencia con la que oscilaría el sistema si no existiera amortiguamiento.
- $\delta$ : coeficiente de amortiguamiento. Hace referencia a la rapidez con la que el sistema responde a una entrada escalón. Su valor indica si el sistema es crítico, sobreamortiguado, subamortiguado o inestable. En nuestro caso, hemos obtenido dos tipos de sistemas, subamortiguados ( $0 < \delta < 1$ ), y sobreamortiguados ( $\delta > 1$ ), (Figuras 3.10 y 3.11 respectivamente).

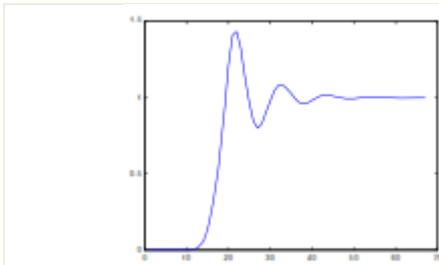


Figura 3.10. Gráfica de un sistema subamortiguado.

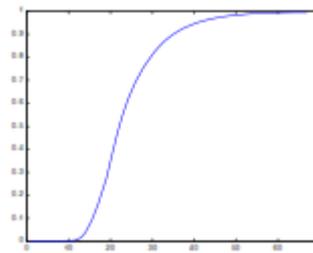


Figura 3.11. Gráfica de un sistema sobreamortiguado.

- $\beta$ : Este parámetro indica la posición del cero. El cero estará en  $s = \frac{-1}{\beta}$  . No afecta a la estabilidad ni al estado estacionario del sistema, solo al transitorio.

### 3.4. Métodos y estrategias de control

La importancia del control en este tipo de sistemas se concentra en el transcurso del día, donde la radiación solar puede provocar alteraciones del pH y de la temperatura del cultivo, perjudicando el proceso y pudiendo causar incluso la muerte de las microalgas. Además es con la radiación solar cuando se producen más descensos del  $\text{CO}_2$  a causa de la fotosíntesis de las algas por lo que será durante el día cuando se hagan mayores inyecciones de  $\text{CO}_2$ , siendo importante controlar la demanda para optimizar su consumo y minimizar los gastos.

### 3.4.1. Control multivariable

Ante un sistema multivariable, con más de una entrada y una salida, como es el caso, es importante hacer un análisis del emparejamiento, acoplamiento y desacoplo de variables [5]:

- Emparejamiento: consiste en emparejar cada entrada con la salida a la que más afecte.
- Acoplamiento: cada entrada puede influir en más de una salida, en algunos casos harán que el emparejamiento sea óptimo y en otros perjudicaran al resto.
- Desacoplo: en función de los emparejamientos realizados y acoplamientos, incluir desacopladores que permitan eliminar o disminuir el efecto de acoplamiento.

Para hacer un correcto emparejamiento hay que tener en cuenta todo lo anterior, en un sistema multivariable un lazo de control puede tener influencias sobre los demás, provocando efecto rebote sobre el lazo original. Estos efectos o interacciones, cuando son muy severas, hacen necesario el uso de estrategias de control adicionales para compensarlas. Estas estrategias consisten en incorporar un conjunto de controladores adicionales, desacopladores, entre los controladores de realimentación y el sistema con el objetivo de eliminar o atenuar las interacciones. En este caso, tras realizar el análisis que más adelante se detalla se ha llegado a la conclusión de que no existen interacciones entre lazos de control, por lo que no será necesario añadir controladores de desacoplo.

Para determinar el emparejamiento óptimo se ha seguido el Método de Vector de Ganancias Relativas de Bristol [5, 17], una técnica que permite evaluar las interacciones entre los lazos de control y determinar qué emparejamientos serán más efectivos en función de éstas. Éste método solamente requiere de información en estado estacionario y está basado en el concepto de ganancia relativa. La ganancia relativa  $\lambda_{ij}$  entre una variable de salida  $y_i$  y una entrada  $u_j$  se define según la ecuación 3.6:

$$\lambda_{ij} = \frac{\lim_{s \rightarrow 0} G_{ij}(s) \Big|_{\text{resto de lazos abiertos}}}{\lim_{s \rightarrow 0} G_{ij}(s) \Big|_{\text{resto de lazos cerrados}}} = \frac{K_{ij} \Big|_{u_k=0, k \neq j}}{K_{ij} \Big|_{y_k=0, k \neq i}} = \frac{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{u_k=cte, k \neq j}}{\frac{\partial y_i}{\partial u_j} \Big|_{y_k=cte, k \neq i}} \quad (3.6)$$

Se ha calculado la matriz de ganancias relativas  $\mathbf{K}$  aplicando la expresión 3.7:

$$\mathbf{K} = \mathbf{G}(0) = \lim_{s \rightarrow 0} \mathbf{G}(s) \quad (3.7)$$

Y según las siguientes condiciones se harán los emparejamientos:

- $\lambda_{ij} = 1$  : no hay interacción, es el mejor resultado.
- $\lambda_{ij} = 0$  : se obtiene cuando la función  $G_{ij}$  que relaciona la salida  $y_i$  con la entrada  $u_j$  es igual a cero por lo que no se puede hacer ese emparejamiento.
- $0 < \lambda_{ij} < 1$  : cuanto más difiera de 1 mayor es la interacción. El control se puede hacer oscilatorio e incluso inestable cuando se cierran los otros lazos. La ganancia entre  $u_j$  y  $y_i$  del lazo cerrado aumenta respecto a la de lazo abierto.
- $\lambda_{ij} > 1$  : el control puede ser lento, la ganancia de  $u_j$  a  $y_i$  disminuye cuando el resto de lazos están cerrados. Las interacciones aumentan al aumentar el valor de  $\lambda$ .
- $\lambda_{ij} < 0$  : la ganancia estática en bucle cerrado cambia de signo, por lo que puede provocar inestabilidad. Se debe evitar este emparejamiento.
- $\lambda_{ij} = \infty$  : el control en bucle cerrado es imposible.

En el caso tratado en este proyecto la función de ganancias relativas no es cuadrada, pues hay más entradas que salidas, por lo que habrá que hacer un estudio para ver qué entradas y qué salidas será más interesante tener en cuenta. Se ha seguido un método existente en la literatura [17] y aplicado en diversas plantas de control para elegir las variables manipulables y las variables controladas que darán lugar a un control eficiente. Para ello se harán los siguientes análisis:

- RGA: *Relative Gain Array*, que corresponde al ya comentado Método de Vector de Ganancias Relativas de Bristol. Como desventaja hay que decir que este método no tiene en cuenta la dinámica del sistema.
- SVA: *Singular Value Analysis*, esta potente técnica analítica nos permitirá:
  1. Seleccionar las variables manipulables, controladas y medidas.
  2. Evaluar la robustez de las estrategias de control propuestas.
  3. Determinar cuál es la mejor configuración para el control multilazo.

Además dará como resultado lo esperado atendiendo a la dinámica del sistema.

Considerando el modelo lineal en estado estacionario descrito por la ecuación 3.8:

$$y = K \cdot u \quad (3.8)$$

Podemos afirmar que podrán ser independientemente reguladas tantas variables de control como ecuaciones linealmente independientes haya. Para comprobar la

independencia lineal se calculan los **valores propios** de la matriz **K** que son las raíces de la ecuación 3.9:

$$|\mathbf{K} - \alpha\mathbf{I}|=0 \quad (3.9)$$

Donde  $|\mathbf{K} - \alpha\mathbf{I}|$  hace referencia al determinante de la matriz  $\mathbf{K}-\alpha\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad de tamaño  $n \times n$ , siendo  $n$  el número de ecuaciones que forman el modelo y  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  los valores propios.

Dependiendo de los valores propios obtenidos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

-Alguno de los valores propios es cero: **K** es una matriz singular y será difícil controlar el proceso.

-Alguno de los valores propios es bastante mayor o menor que los demás: para controlar el proceso será necesario hacer cambios importantes en una o más de las variables manipulables.

Otra propiedad importante de la matriz **K** es la referente a sus **valores singulares**,  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ . Los valores singulares son las raíces positivas de los valores propios de la matriz  $\mathbf{K}^T \cdot \mathbf{K}$ . Se calculan mediante la expresión 3.10.

$$\sigma_i = \sqrt{\alpha'_i} \quad (3.10)$$

Siendo  $\alpha'$  el conjunto de las raíces de la siguiente ecuación:

$$|\mathbf{K}^T \cdot \mathbf{K} - \alpha'\mathbf{I}|=0 \quad (3.11)$$

Los primeros  $r$  valores singulares, siendo  $r$  el rango de la matriz  $\mathbf{K}^T \cdot \mathbf{K}$ , serán valores positivos, mientras el resto de  $n-r$  valores serán cero.

Por último se calcula el número de condición (CN). Asumiendo que **K** es una matriz no singular el número de condición será positivo y estará definido por la relación entre el mayor,  $\sigma_1$ , y el menor no nulo,  $\sigma_r$ , de los valores singulares (ecuación 3.12). Cuanto menor sea el número de condición más eficiente será el control.

$$CN = \frac{\sigma_1}{\sigma_r} \quad (3.12)$$

Una vez realizados estos análisis los pasos a seguir son los siguientes:

1. Ordenar los valores singulares de mayor a menor concluyendo con que si se cumple  $\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} > 10$  para  $i \geq 2$ , estos valores singulares podrán descartarse y al

menos una variable manipulable y una variable de control deberán omitirse en el control.

2. A partir de estas matrices cuadradas se irán eliminando filas y columnas a la vez que calculando los valores singulares y el número de condición de las nuevas matrices. La matriz de ganancias con más expectativas de éxito será la de menor número de condición, habrá que tener en cuenta también la dinámica del proceso para elegir entre las que menor CN tengan.

Todos estos cálculos se han realizado en *MATLAB*, se ha creado un *script* en el que se definen todos los valores necesarios y se ejecutan los siguientes comandos:

- ‘*eig(K)*’: da como resultado un vector con los valores propios (*eigenvalues*) de la matriz cuadrada **K**.
- ‘*cond(K)*’: calcula directamente el número de condición de la matriz cuadrada **K**.
- Los valores singulares  $S_n = \sqrt{E}$ , se calculan como la raíz cuadrada de los valores propios,  $E = \text{eig}(K^T * K)$ , de la matriz producto que se indica.

Finalmente, el resultado obtenido es una matriz de 2 x 2 en la que las ganancias relativas  $\lambda_{87} = \lambda_{91} = 1$  y  $\lambda_{81} = \lambda_{97} = 0$ . Los cálculos se detallan en el capítulo 4 de este proyecto ‘Resultados y discusiones’.

Los lazos de control se diseñarán sobre las funciones  $G_{87}$  y  $G_{91}$  no siendo necesario añadir desacopladores. Ambas funciones son de primer orden con retardo no dominante y por su naturaleza,  $G_{87}$ , temperatura del cultivo controlada por la temperatura del agua del intercambiador,  $G_{91}$ , control del pH mediante el caudal de  $\text{CO}_2$ , es interesante el diseño de controladores robustos que ofrezcan un buen rechazo a perturbaciones, es importante que tanto la temperatura como el pH no sobrepasen unos determinados valores límite.

Se usará el controlador PID, el más utilizado a nivel industrial. La señal de control que genera está compuesta por tres operaciones matemáticas que actúan sobre el error [4]:

**-Acción Proporcional:** actúa en base al error actual y se define mediante la ganancia proporcional  $K_p$ . Ante cambio de consigna o perturbaciones puede aparecer error de *offset*, en estado estacionario el sistema no alcanza el valor deseado.

**-Acción Integral:** lo hace sobre el error acumulado y se define mediante el tiempo integral  $T_i$ . Elimina el error de *offset* en régimen estacionario. Cuanto menor sea más rápido y más oscilatorio será el sistema.

**-Acción Derivativa:** actúa en base a la tendencia del error y queda definida por el tiempo derivativo  $T_d$ . Se anticipa y actúa antes de que se produzca el error. No es recomendable para sistemas con ruido.

La señal de control que genera:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.13)$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$u(s) = K_p \cdot \left[ E(s) + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{E(s)}{s} + T_d \cdot s \cdot E(s) \right] \quad (3.14)$$

Y por tanto el controlador será:

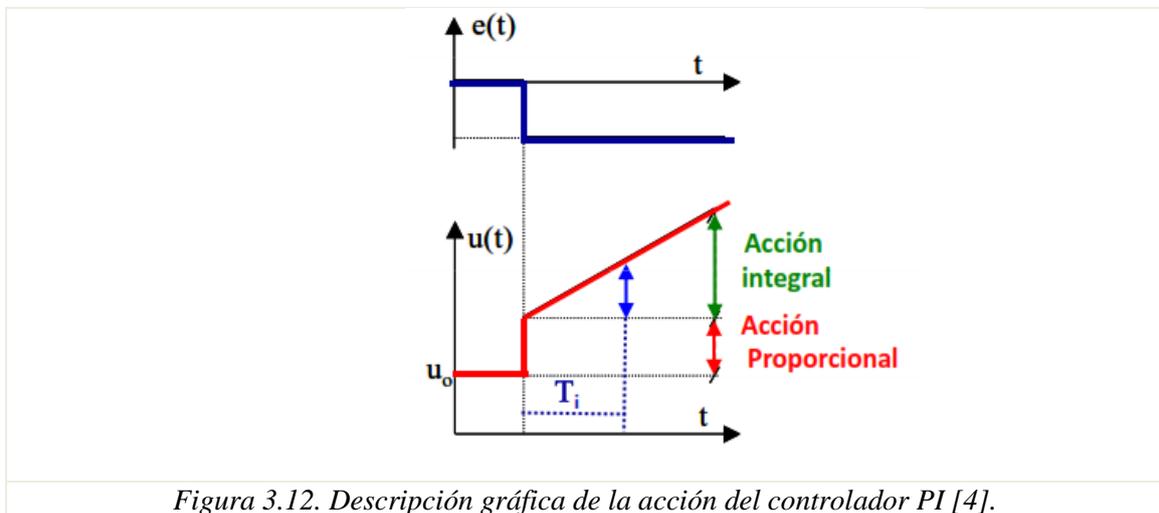
$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right] \quad (3.15)$$

En nuestro caso, se diseñarán controladores tipo PI, prescindiendo de la acción derivativa por la presencia de ruido en las señales, evitando así variaciones continuas y no deseadas.

### 3.4.2. Controlador Proporcional Integral (PI)

El controlador PI consta de parte proporcional y parte integral prescindiendo de parte derivativa, tal y como se puede apreciar en la ecuación 3.16 y en la Figura 3.12.

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \quad (3.16)$$



Para la sintonía de los controladores se ha escogido el método AMIGO, desarrollado por Karl Aström y Tore Hägglund [2]. Es un método de similar sencillez al conocido Ziegler-Nichols pero presenta mayor compromiso entre robustez y rechazo a perturbaciones. Existen múltiples métodos de sintonía, se ha decidido trabajar con éste por las características comentadas y por los resultados obtenidos.

En este caso, procesos de primer orden con retardo y controlador PI, las reglas propuestas para el cálculo de los parámetros  $K_p$  y  $T_i$ , siendo el proceso a controlar  $P(s)$ , corresponden a las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19 respectivamente.

$$K_p = \frac{0.15}{K} + \left(0.35 - \frac{t_r \cdot \tau}{(t_r + \tau)^2}\right) \cdot \frac{\tau}{K \cdot t_r} \quad (3.17)$$

$$T_i = 0.35 \cdot t_r + \frac{13 \cdot t_r \cdot \tau^2}{\tau^2 + 12 \cdot t_r \cdot \tau + 7 \cdot t_r^2} \quad (3.18)$$

$$P(s) = \frac{K}{1 + s \cdot \tau} \cdot e^{-s \cdot t_r} \quad (3.19)$$

Para uno de los lazos de control el método AMIGO no ofrece resultados aceptables. Se han aplicado otras reglas de sintonía [18] hasta conseguir eliminar las oscilaciones producidas por este método. Se han seguido las reglas propuestas en el método SIMC, que ofrece también un buen compromiso frente a seguimiento de consignas y rechazo a perturbaciones y permite fijar la constante de tiempo en lazo cerrado. En nuestro caso se ha escogido  $\tau_{BC} = 0.8 \tau$ , haciendo que sea más rápido que el lazo abierto. Los parámetros para el controlador PI se calcularán mediante las ecuaciones 3.20 y 3.21.

$$K_p = \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau + \frac{t_r}{3}}{(\tau_{BC} + t_r)} \quad (3.20)$$

$$T_i = \min\left(\tau + \frac{t_r}{3}, 4 \cdot (\tau_{BC} + t_r)\right) \quad (3.21)$$

### 3.4.3. Control anticipativo

Para completar el control será necesario hacer frente a las perturbaciones, la radiación solar, el caudal de medio y la temperatura ambiente. Para ello se utilizarán controladores por adelanto o *feedforward* que actúan haciendo frente a los efectos de la perturbación y adelantándose a ellos (ver Figura 3.13).

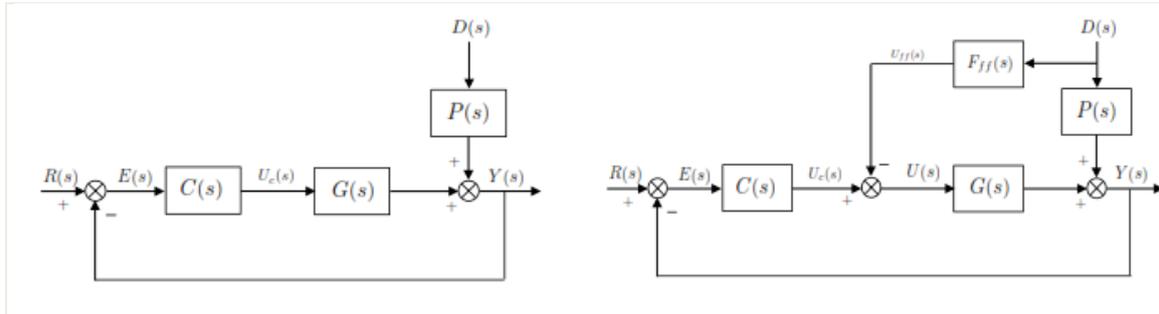


Figura 3.13. Diagrama de bloques esquema de control sin (izquierda) y con (derecha) feedforward [5].

Según la figura anterior, para el esquema sin *feedforward* se cumple lo expuesto en la ecuación 3.22:

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)}{1+G(s) \cdot C(s)} \quad (3.22)$$

Si se implementa el controlador por adelante y se despeja (ver ecuaciones 3.23 y 3.24):

$$G_{yd} = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s) - G(s) \cdot F_{ff}(s)}{1+G(s) \cdot C(s)} \quad (3.23)$$

$$F_{ff}(s) = \frac{P(s)}{G(s)} \quad (3.24)$$

Se obtiene una función que se restará a la señal de control a la entrada del proceso. Ha sido necesario eliminar los términos no invertibles, concretamente los retardos que tras los cálculos quedaban positivos, pues no tiene sentido físico que un sistema se adelante en el tiempo. Esto provocará que la cancelación de perturbaciones no pueda ser perfecta (que en ningún caso podrá serlo debido a la dinámica no modelada).

### 3.4.4. Limitaciones físicas de los actuadores

El control del pH se implementa mediante una válvula que permite el paso de CO<sub>2</sub>, Como cualquier actuador, esta válvula presenta limitaciones físicas, pues permite el paso del dióxido de carbono únicamente desde que se comienza a abrir hasta su

apertura máxima. Este aspecto tendrá que ser tenido en consideración para evitar que el lazo de control se rompa si se superan estos límites. Cuando la señal de control satura por haber alcanzado los límites físicos, el término integral puede tomar valores muy elevados, efecto coloquialmente conocido como *wind-up*, y posteriormente tomar valores de signo contrario durante largos periodos de tiempo cuando el sistema sale de la saturación. Por tanto, para controladores con acción integral es importante hacer frente a estos comportamientos. El método más utilizado a nivel práctico es el conocido como esquema *back-calculation* o esquema *anti-windup* (ver Figura 3.14), con el que se pretende que la entrada a la integral sea nula:

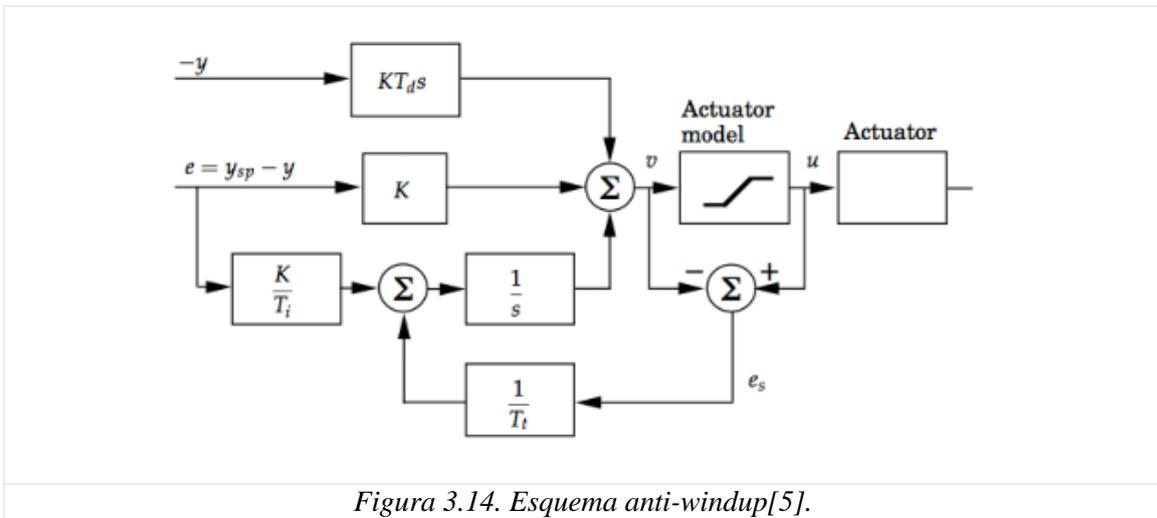
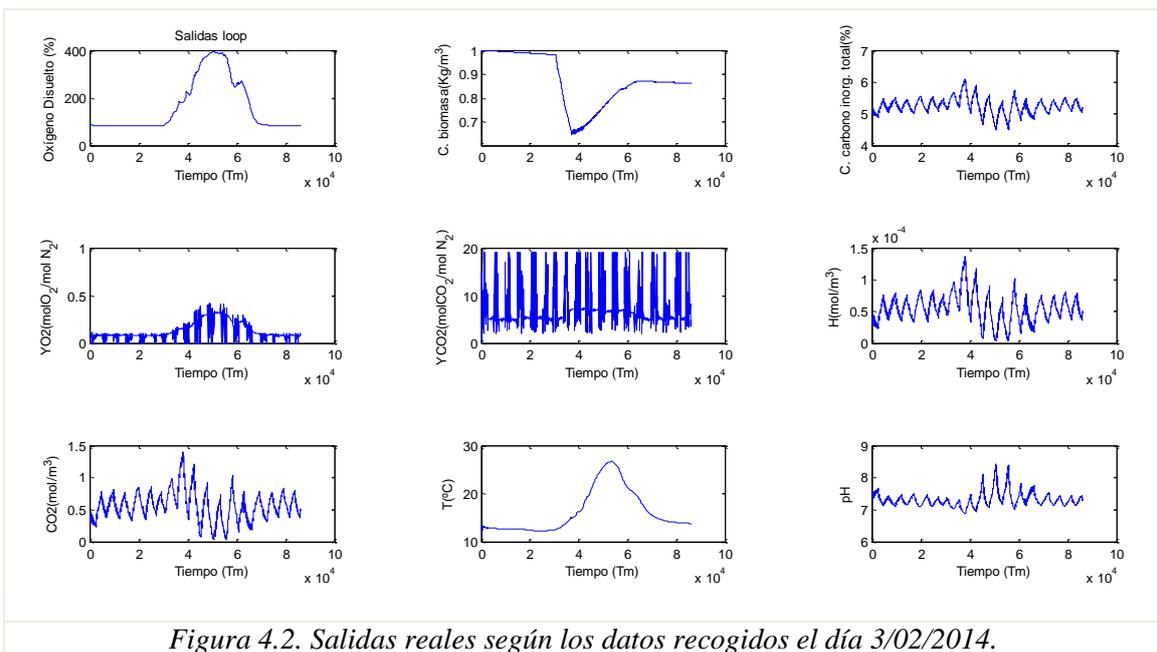
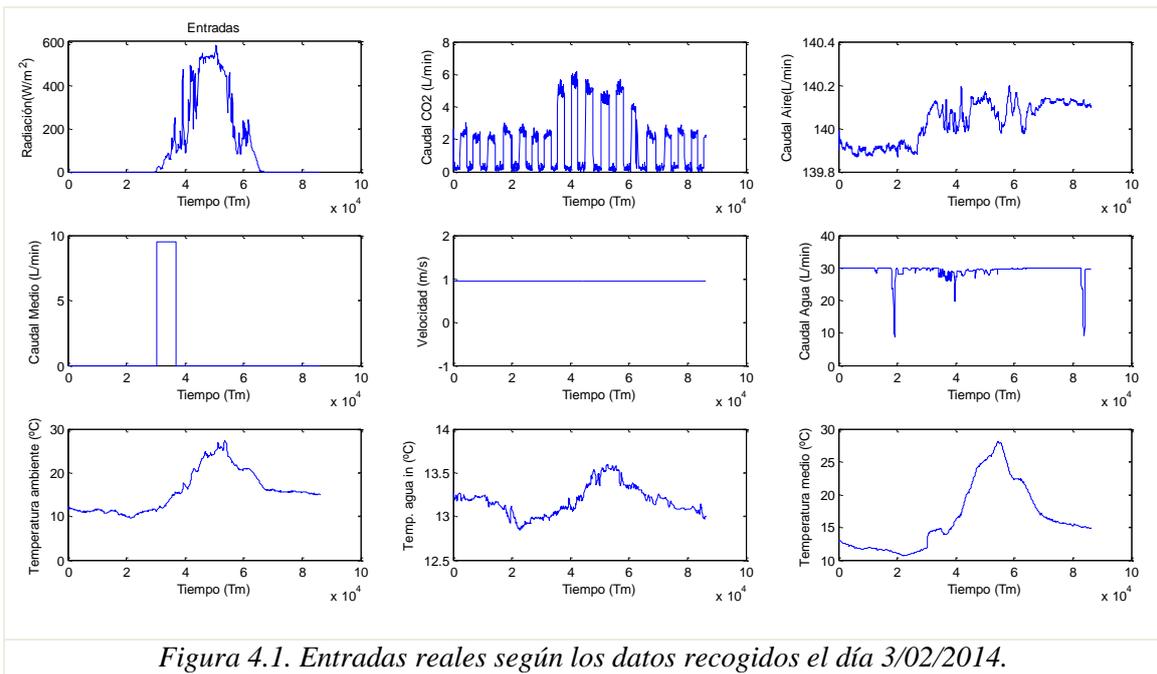


Figura 3.14. Esquema anti-windup[5].

En la práctica, *MATLAB* facilita el uso de *anti-windup*, pues en el mismo bloque del controlador se pueden seleccionar los límites de la señal de control así como el tipo de *anti-windup* a usar. Otro parámetro a seleccionar es la ganancia de *back-calculation*,  $K_b$ , que corresponde a la inversa de la constante de tiempo de *tracking*,  $T_t$ . Esta constante de tiempo determina el ratio con el que se pretende que el término integral sea reseteado. Según reglas de sintonía existentes en la literatura se ha decidido utilizar una constante de *tracking* igual a la raíz cuadrada del tiempo integral:  $T_t = \sqrt{T_i}$ .

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los datos disponibles son los que se muestran en las figuras (Figura 4.1 – Figura 4.8) en modo gráfico. Como se ha indicado, cada día se toman 1440 muestras con un periodo de muestreo de 1 minuto.



Como se observa en las gráficas, las medidas tienen ruido y la evolución de las principales variables viene determinada fundamentalmente por las condiciones ambientales (principalmente radiación solar, que sigue distintos perfiles durante los días escogidos) y por las inyecciones de  $\text{CO}_2$  y valor de la temperatura del medio.

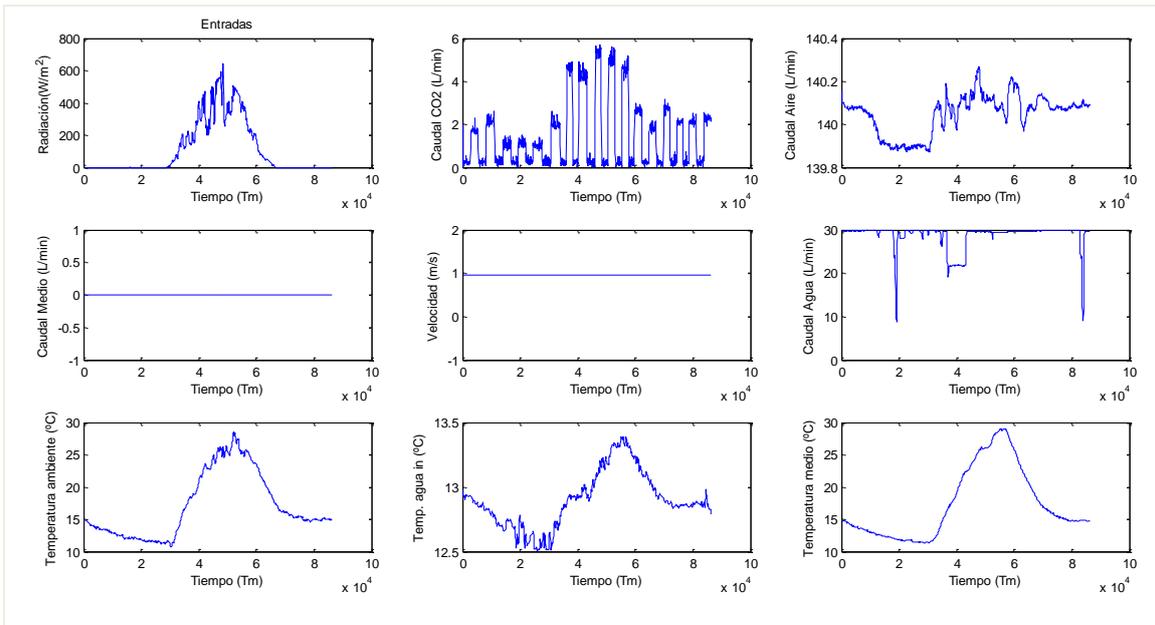


Figura 4.3. Entradas reales según los datos recogidos el día 4/02/2014.

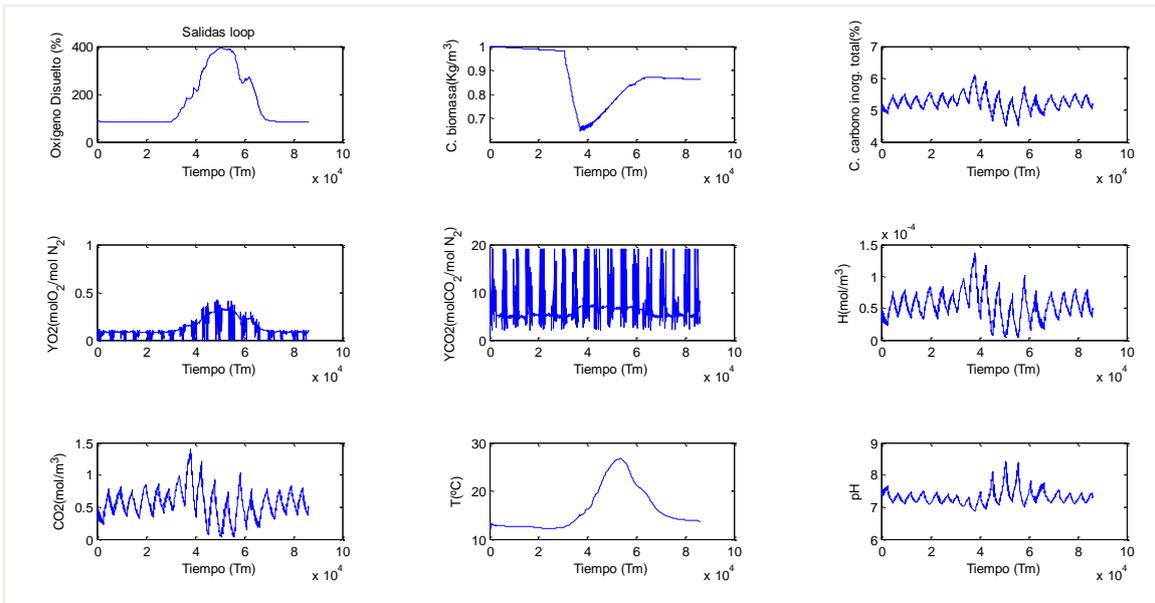


Figura 4.4. Salidas reales según los datos recogidos el día 4/02/2014.

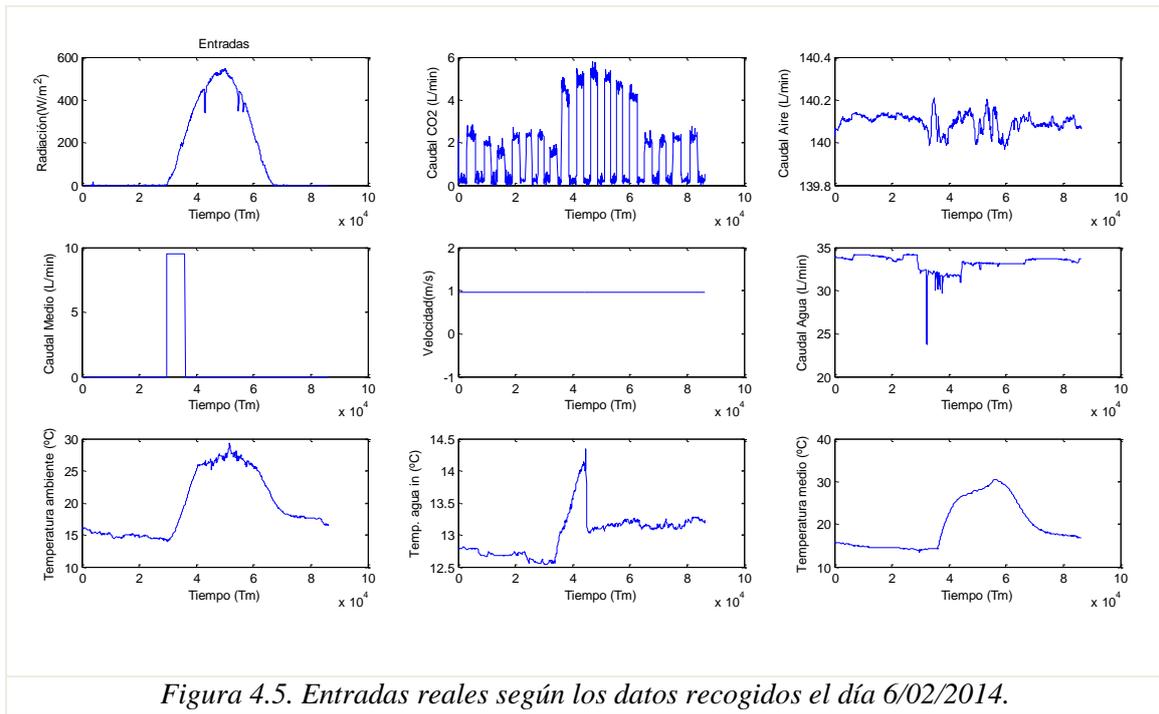


Figura 4.5. Entradas reales según los datos recogidos el día 6/02/2014.

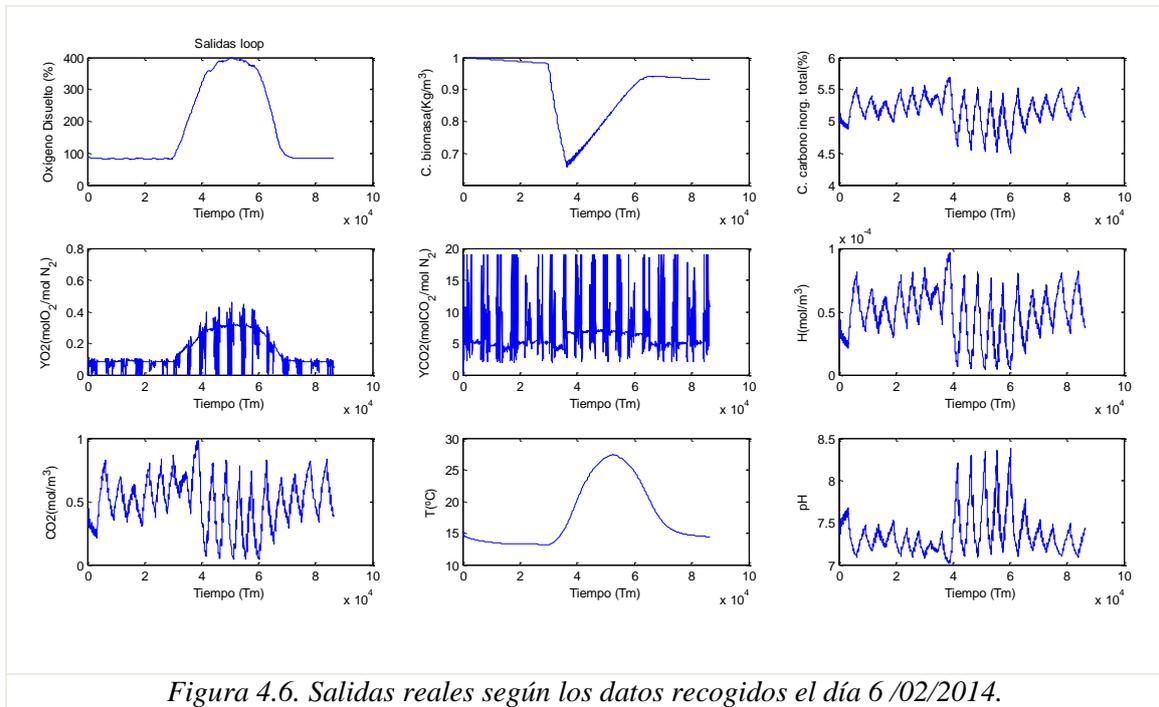


Figura 4.6. Salidas reales según los datos recogidos el día 6/02/2014.

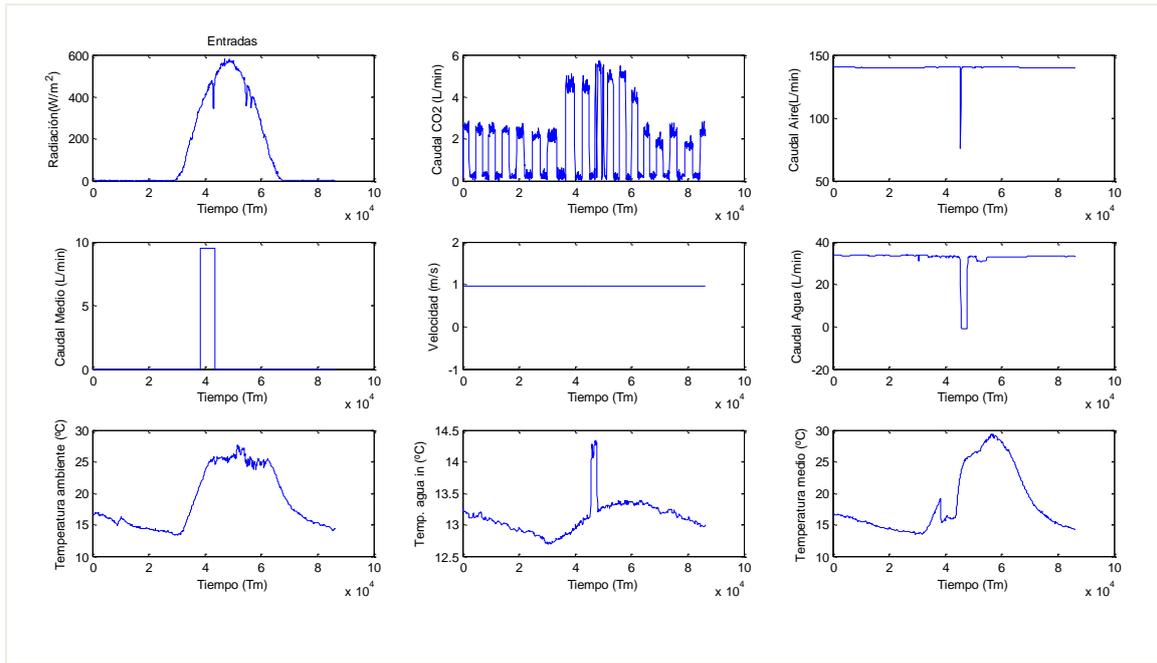


Figura 4.7. Entradas reales según los datos recogidos el día 7/02/2014.

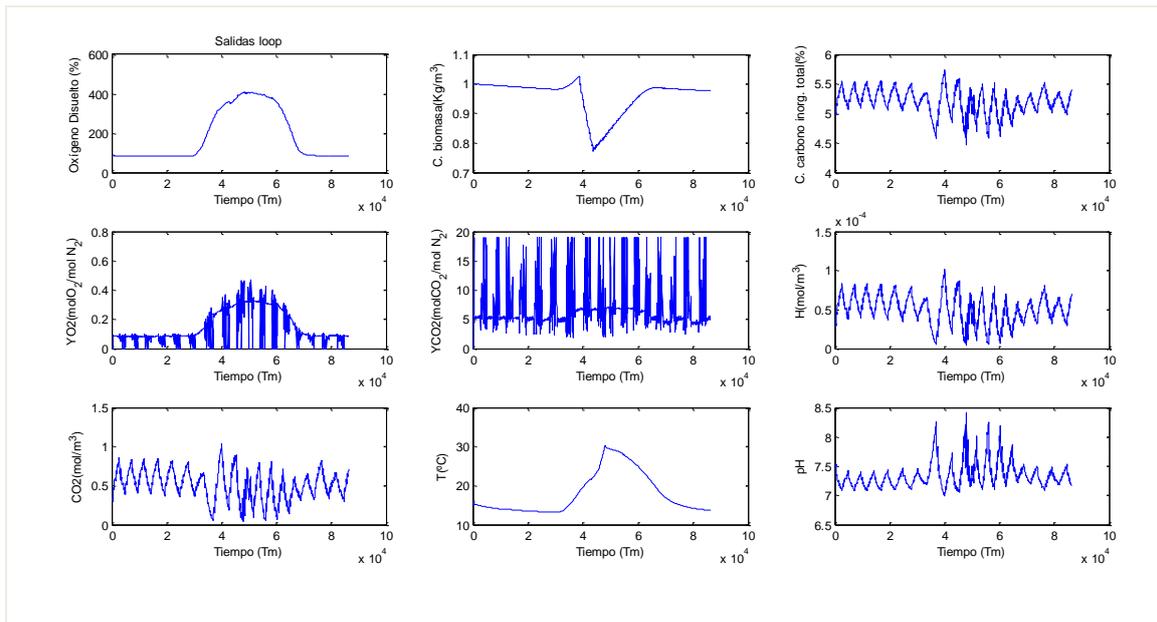


Figura 4.8. Salidas reales según los datos recogidos el día 7/02/2014.

En todos ellos se puede ver la evolución de todas las variables a lo largo del día. Las entradas (ver Figuras 4.1, 4.3, 4.5, 4.7) son similares en todos los casos, en torno al mediodía solar la radiación aumenta con más o menos oscilaciones según la nubosidad de cada día. Como consecuencia las temperaturas aumentan también. En cuanto a la inyección de dióxido de carbono se realiza siguiendo la forma de un tren de pulsos cuya amplitud aumenta durante las horas de mayor radiación para compensar el aumento de pH. La velocidad a la que la bomba impulsa el cultivo permanece constante a  $0.095 \text{ m/s}$ , y los caudales de aire y agua oscilan entre valores fijos presentando algunos picos

puntuales. El aporte de medio, cultivo ‘nuevo’, se realiza mediante una única inyección, los días 3 y 6 en el mismo instante, el día 7 más tarde y el día 4 no se realiza.

En cuanto a las salidas (ver Figuras 4.2, 4.4, 4.6, 4.8) también tienen comportamientos similares todos los días, la diferencia más relevante se encuentra en la gráfica de concentración de biomasa el día 4, dado que no se inyecta medio y por tanto tampoco se retira, no se produce la disminución de biomasa propia del resto de días. Todas las salidas se ven aumentadas con la radiación solar, algunas directamente, como la temperatura, y otras aumentan la amplitud de los picos al igual que se ha aumentado la de la entrada de CO<sub>2</sub>. La concentración de este gas está constantemente variando, por lo que también lo están todas las salidas en las que influye directamente.

En la figura 4.7 se pueden observar errores de medida, debidos a algún tipo de fallo en la comunicación durante la toma de datos que producen cambios inesperados en las entradas de caudal de agua, caudal de aire y temperatura en el intercambiador. Se han corregido los datos dando valores aproximados en las franjas en las que se aprecia este error.

#### 4.1. Modelado del comportamiento nocturno del sistema

A continuación se presentan los resultados obtenidos al introducir trenes de pulsos en las entradas, una a una, dejando el resto en valores constantes medios, excepto la radiación solar que es cero para toda la noche. Los pulsos tienen una amplitud de entre el 10% y el 50% de los valores medios y un periodo de 2400 segundos. Los ensayos duran 24 horas muestreados cada 60 segundos.

Los valores medios seleccionados han sido los detallados en la tabla 4.9. En la tabla 4.10 se muestran los valores de las salidas en el punto de operación.

<b>u<sub>n</sub></b>	<b>Entrada</b>	<b>Valor medio</b>
<b>u0</b>	Radiación solar [W/m <sup>2</sup> ]	0
<b>u1</b>	Caudal de CO <sub>2</sub> [l/min]	1
<b>u2</b>	Caudal de aire [l/min]	140.1
<b>u3</b>	Caudal de medio [l/min]	0
<b>u4</b>	Velocidad [m/s]	0.9520
<b>u5</b>	Caudal de agua [l/min]	30
<b>u6</b>	Temperatura ambiente [°C]	13.5
<b>u7</b>	Temperatura intercambiador [°C]	13.1
<b>u8</b>	Temperatura del medio [°C]	13

Tabla 4.9. Valores medios de las entradas para la noche.

$y_n$	Salida	Punto de operación
y1	$O_2$ [%]	82.3065
y2	$C_b$ [ $kg/m^3$ ]	0.9920
y3	$CT$ [ $kg/m^3$ ]	5.2044
y4	$YO_2$ [ $mol O_2/mol N_2$ ]	0.0961
Y3	$YCO_2$ [ $mol CO_2/mol N_2$ ]	3.0905
y6	$H$ [ $mol/m^3$ ]	5.03e-5
y7	$CO_2$ [ $mol/m^3$ ]	0.5125
y8	$T$ [ $^{\circ}C$ ]	13.2055
y9	pH	7.2984

Tabla 4.10. Valores de las salidas en el punto de operación.

El valor del pH en el punto de trabajo para los días estudiados es de aproximadamente 7.3, inferior al valor deseado, lo que indica que para esos días el control existente no es óptimo.

Las figuras de 4.1.1 a 4.1.8 muestran cómo afectan cada una de las entradas a las salidas. En rojo se muestran dichas salidas cuando todas las entradas permanecen constantes en los valores medios anteriormente comentados. En azul están las respuestas obtenidas tras excitar las entradas, una a una.

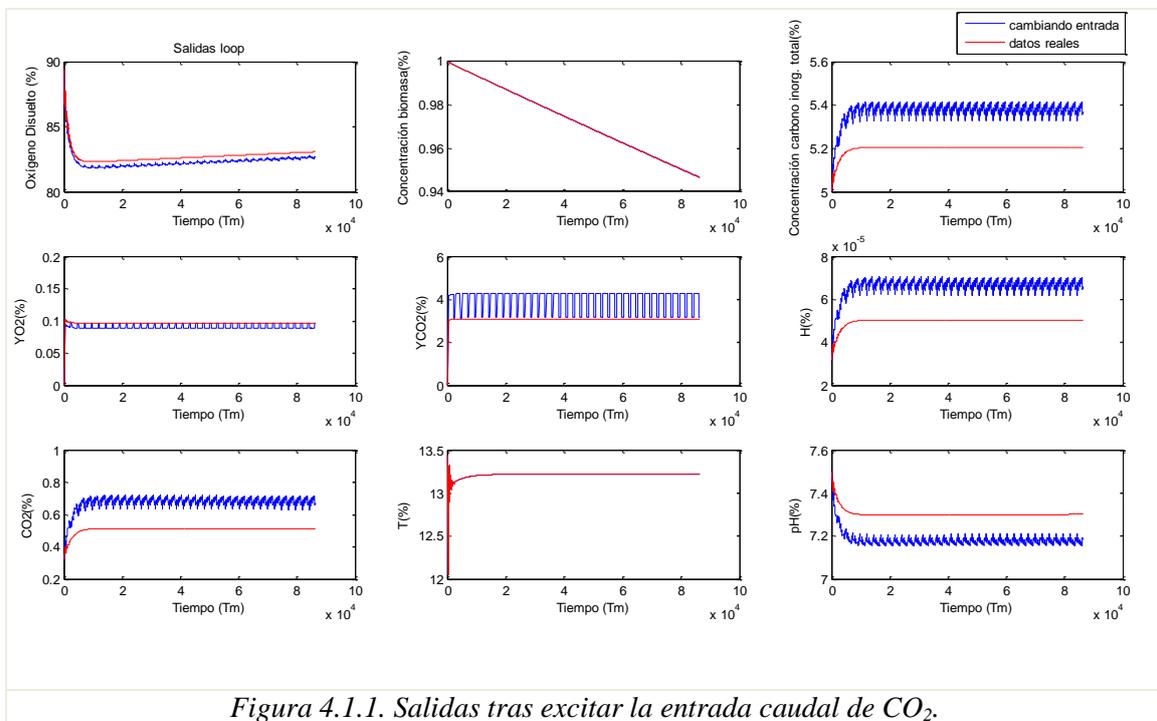


Figura 4.1.1. Salidas tras excitar la entrada caudal de  $CO_2$ .

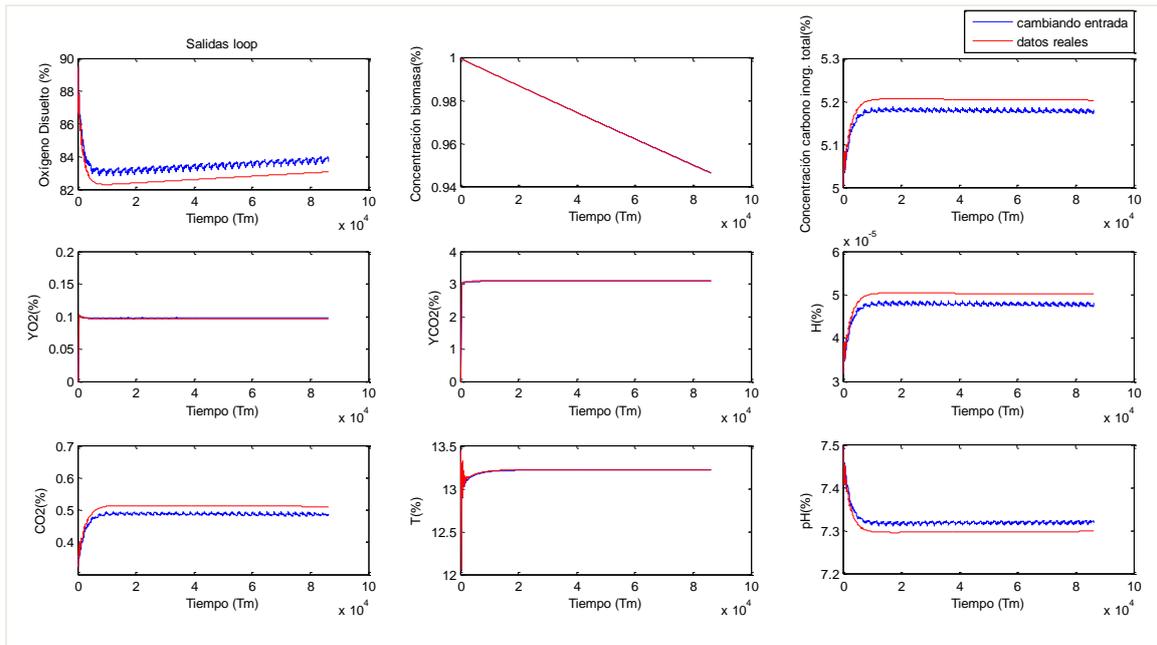


Figura 4.1.2. Salidas tras excitar la entrada de caudal de aire.

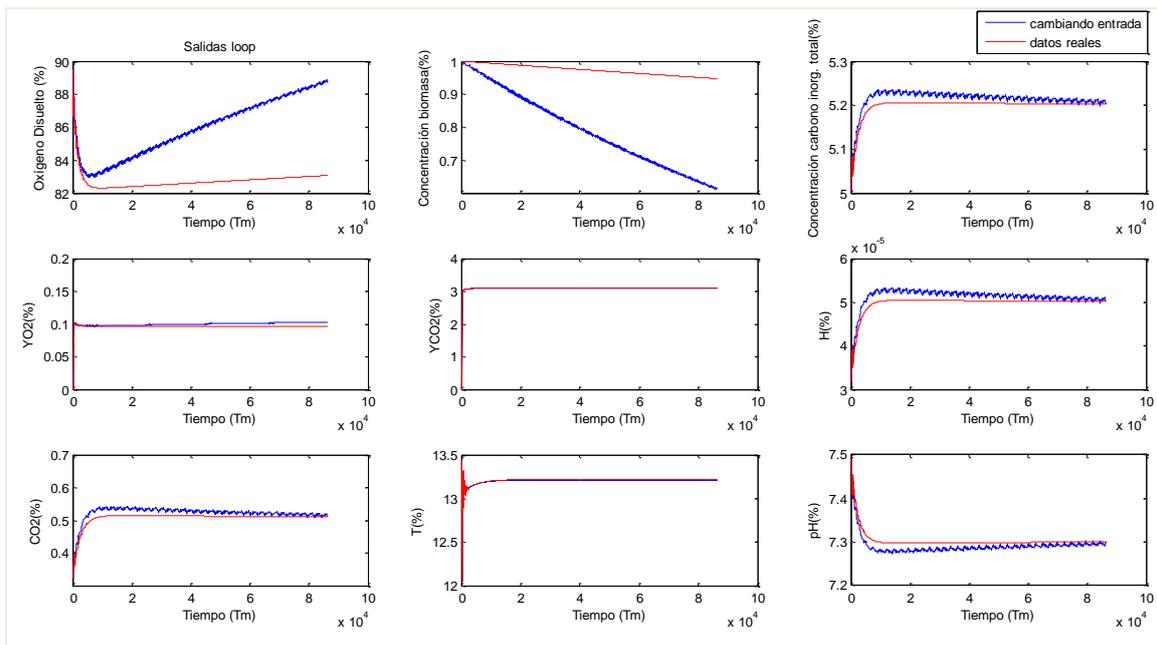


Figura 4.1.3. Salidas tras excitar la entrada de caudal de medio.

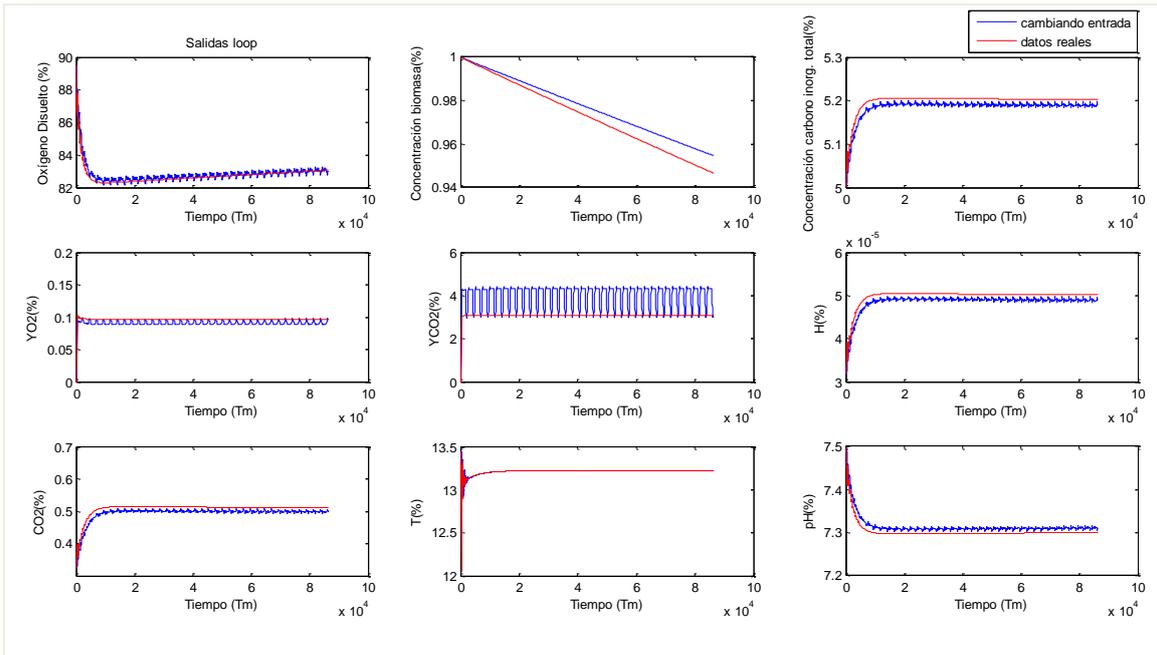


Figura 4.1.4. Salidas tras excitar la entrada de velocidad.

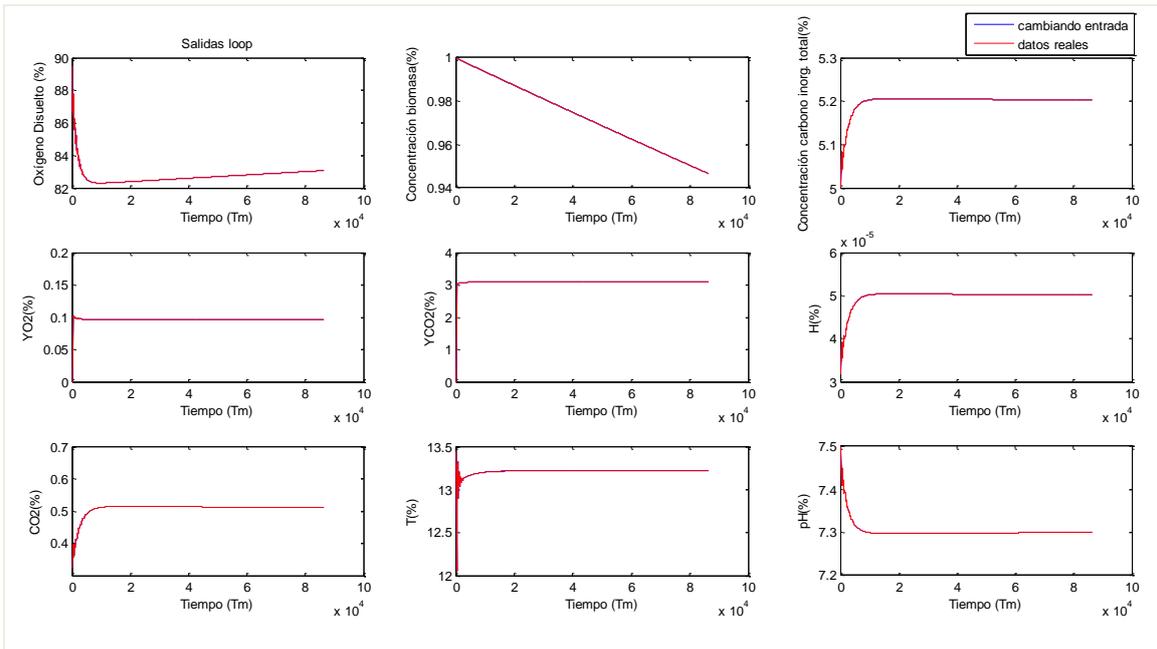


Figura 4.1.5. Salidas tras excitar la entrada de caudal de agua.

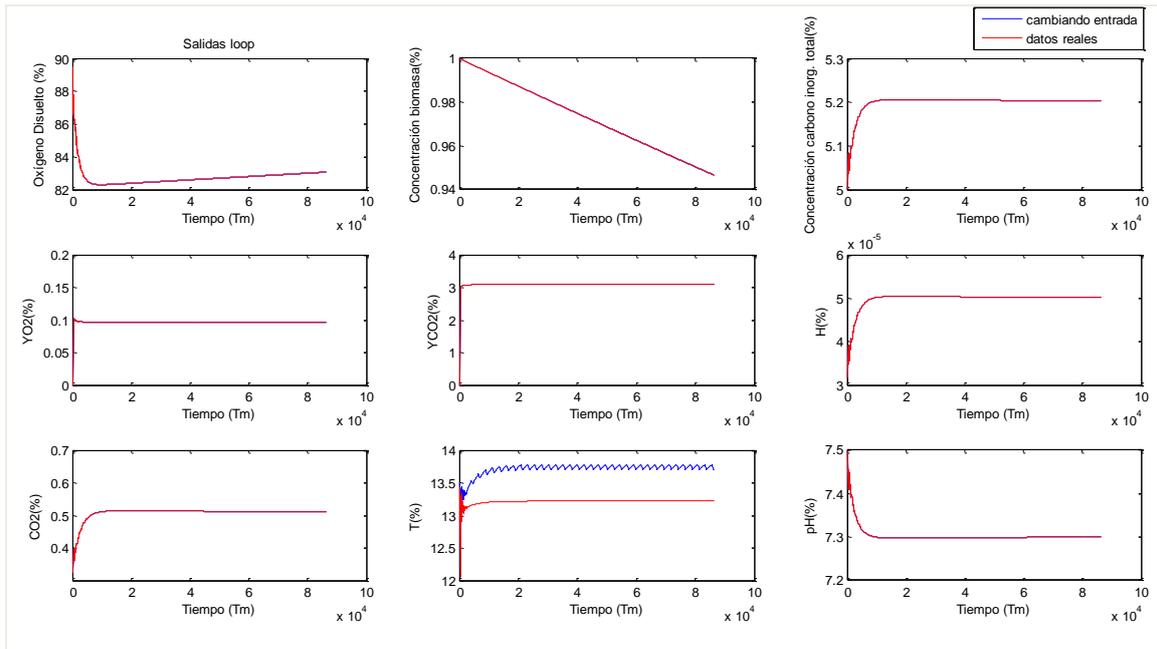


Figura 4.1.6. Salidas tras excitar la entrada temperatura ambiente.

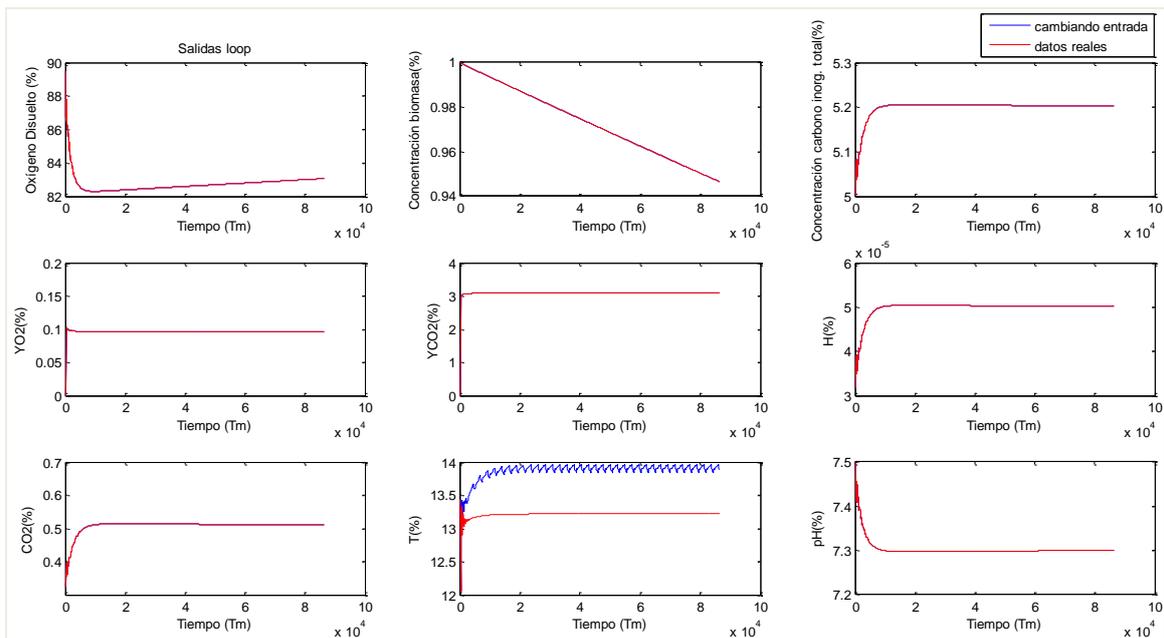


Figura 4.1.7. Salidas tras excitar la entrada temperatura de agua del intercambiador.

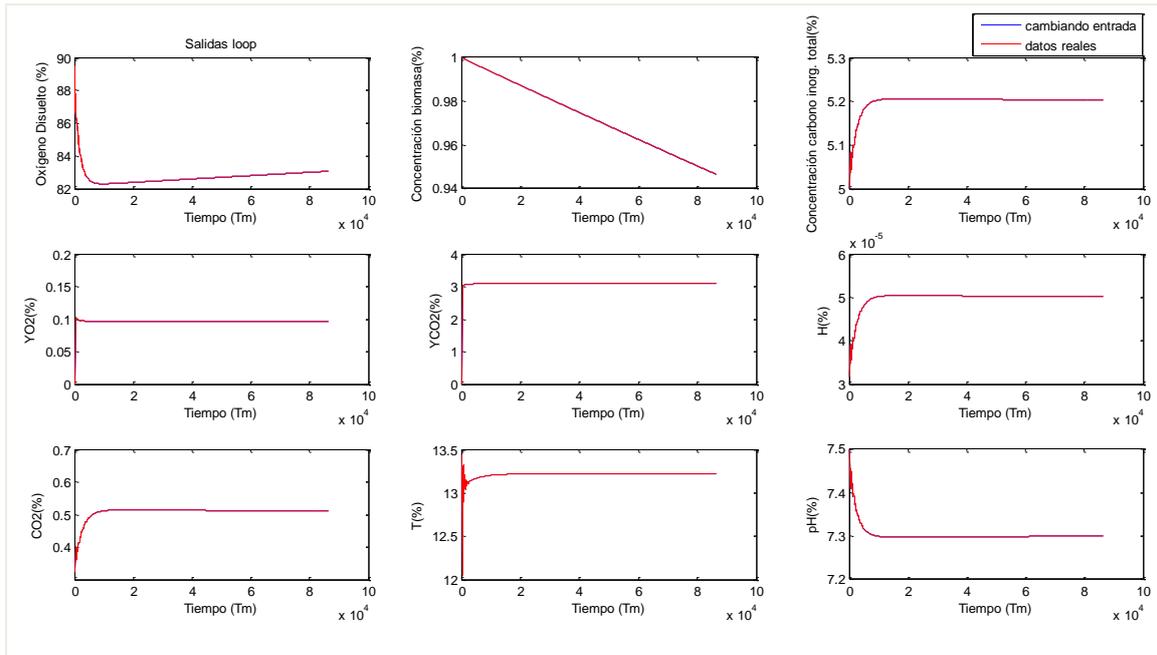


Figura 4.1.8. Salidas tras excitar la entrada temperatura del medio.

Como podemos observar, para algunas entradas, caudal de agua y temperatura del medio principalmente, no se producen cambios en las salidas. Se han realizado pruebas aumentando la excitación hasta valores superiores a los esperados en la realidad y se han considerado despreciables estos efectos. Las entradas que más influencia tienen sobre el cultivo son los caudales de dióxido de carbono, de aire y de medio y la velocidad de circulación, como se puede deducir tras una simple observación del proceso. El modelo lineal correspondiente a la noche, atendiendo a los resultados anteriores, tendrá la siguiente forma (ver ecuación 4.1):

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_{31} & G_{32} & G_{34} & 0 & 0 & 0 \\ G_{41} & 0 & G_{44} & 0 & 0 & 0 \\ G_{51} & 0 & G_{54} & 0 & 0 & 0 \\ G_{61} & G_{62} & G_{64} & 0 & 0 & 0 \\ G_{71} & G_{72} & G_{74} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{87} & 0 \\ G_{91} & G_{92} & G_{94} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_7 \\ U_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{13} \\ G_{23} \\ G_{33} \\ 0 \\ 0 \\ G_{63} \\ G_{73} \\ 0 \\ G_{93} \end{pmatrix} \cdot U_3 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{86} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot U_6 \tag{4.1}$$

Para obtener los modelos del fotobiorreactor se han aplicado los trenes de pulsos comentados anteriormente una vez estabilizados los valores de las salidas (t=12000 s). Mediante la herramienta *ident* de *MATLAB* se han obtenido dichos modelos, a partir de los datos antes de amanecer y en el atardecer. En ambos casos la radiación es nula pero las temperaturas aumentan ligeramente en la tarde, tras haber recibido radiación todo el

día, lo que provoca pequeñas variaciones en los modelos. Estos problemas se deben a que el sistema tiene “memoria” y es difícil capturarla con modelos de bajo orden. Se han calculado por tanto para los dos casos y se ha realizado la media aritmética, obteniendo los valores que más adelante se presentan.

Los modelos se han obtenido de los días 3 y 6 de febrero de 2014, los valores para ambos días son prácticamente idénticos, se presentará la media aritmética de los valores característicos calculados mediante la herramienta *ident*.

Se han tomado primeramente aproximaciones de primer orden con retardo, sin tener en cuenta la recirculación del agua que afecta al sistema provocando pequeñas oscilaciones.

$$G_{ij} = \frac{k}{(\tau \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \tag{4.2}$$

$G_{ij}$	$k[^\ast^{-1}]$	$\tau[s]$	$t_r[s]$
$G_{11}$	-0.69432	1211.05	157.59
$G_{31}$	0.40342	2245.9	135.495
$G_{61}$	$3.8147 \cdot 10^{-5}$	2245.65	135.335
$G_{71}$	0.3909	2246.1	135.33
$G_{91}$	-0.28385	2250.75	138.935
$G_{12}$	0.0873	2005.3	170.34
$G_{32}$	-0.0025026	2265.5	193.39
$G_{62}$	$-2.34 \cdot 10^{-7}$	2265.9	193.46
$G_{72}$	-0.0023969	2265.55	193.46
$G_{92}$	0.002075	2267.25	192.64
$G_{13}$	7.2141	48973	241.825
$G_{23}$	-1.51775	$2.07 \cdot 10^{-5}$	276.985
$G_{33}$	0.0355	1706.45	222.515
$G_{63}$	$3.33 \cdot 10^{-6}$	1704.95	222.53
$G_{73}$	0.034146	1705.65	222.52
$G_{93}$	-0.02804	1712	222.515
$G_{14}$	2.7146	101.086	0
$G_{34}$	-0.18636	2628.25	0
$G_{44}$	-0.08039	120.47	22.724
$G_{54}$	12.5727	115.365	21.404
$G_{64}$	$-1.7489 \cdot 10^{-5}$	2798.9	0
$G_{74}$	-0.17905	2790.15	0
$G_{94}$	0.15327	2792.2	0
$G_{86}$	0.2794	4252.925	0
$G_{87}$	0.6878	4182.125	224.325

Tabla 4.11. Parámetros de modelos para la noche.

Dos de los modelos incluyen un cero siguiendo la siguiente expresión:

$$G_{ij} = \frac{k(\beta s + 1)}{(\tau s + 1)} \cdot e^{-t_r s} \quad (4.3)$$

$G_{ij}$	$k$ [* <sup>-1</sup> ]	$\tau$ [s]	$t_r$ [s]	$\beta$ [s]
$G_{41}$	-0.0128	1638.65	327.055	1539.9
$G_{51}$	2.0234	2625.7	322.67	2421.65

Tabla 4.12. Parámetros de modelos con cero para la noche.

[\*<sup>-1</sup>] Las unidades de la ganancia  $k$  serán diferentes para cada función. Serán equivalentes al cociente de las unidades de cada salida dividido entre las de cada entrada.

Una vez realizado el ajuste de parámetros de los modelos de bajo orden propuestos, se ha procedido a realizar una etapa de validación usando datos diferentes a los utilizados en el proceso de calibración. A continuación se muestran unas gráficas que permiten analizar de forma visual la bondad de los modelos obtenidos.

❖ Día 4/02/2014 antes de la salida del sol:

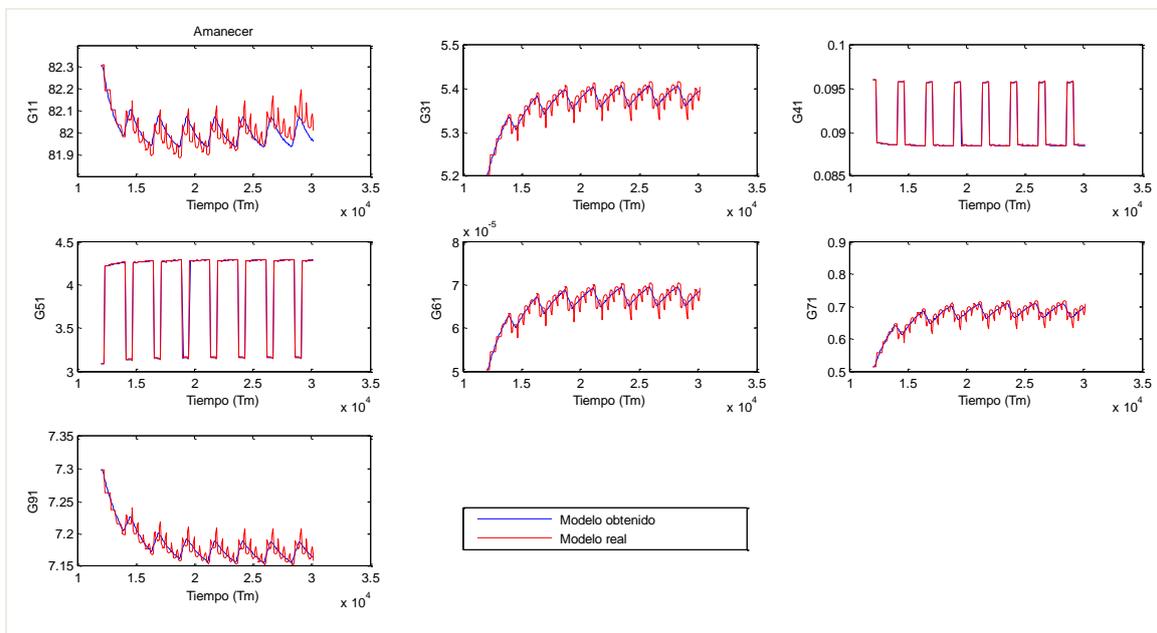


Figura 4.1.9. Validación de modelos para entrada caudal de  $CO_2$  con los datos tomados el día 4/02/2014.

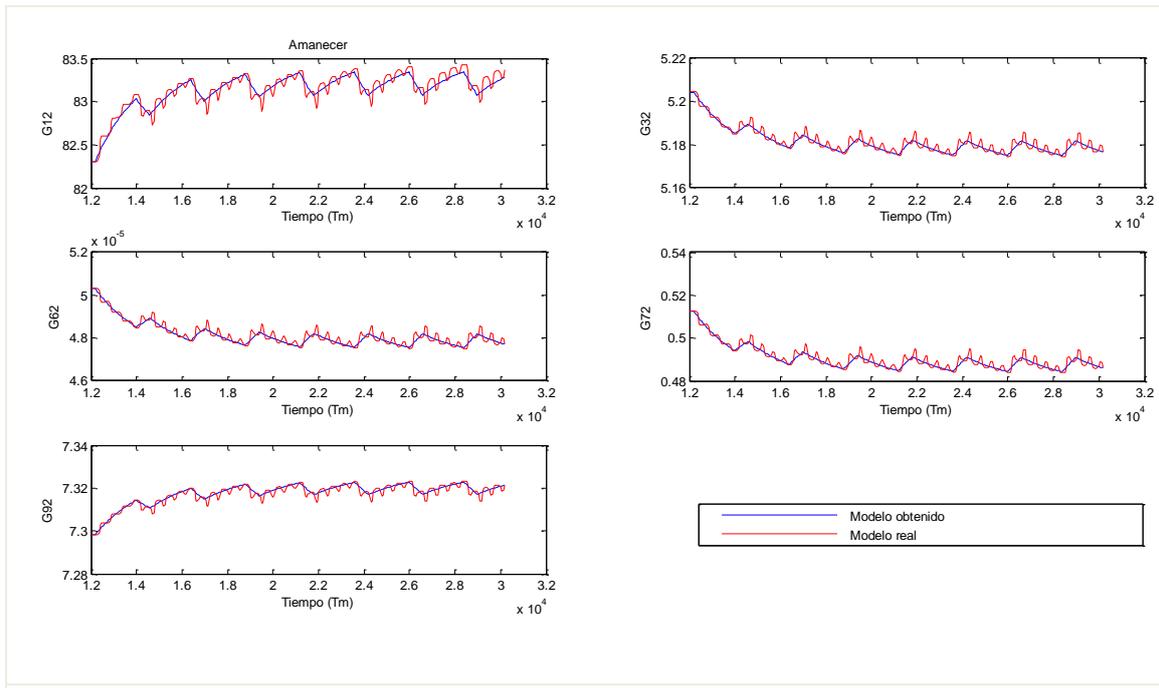


Figura 4.1.10. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 4/02/2014.

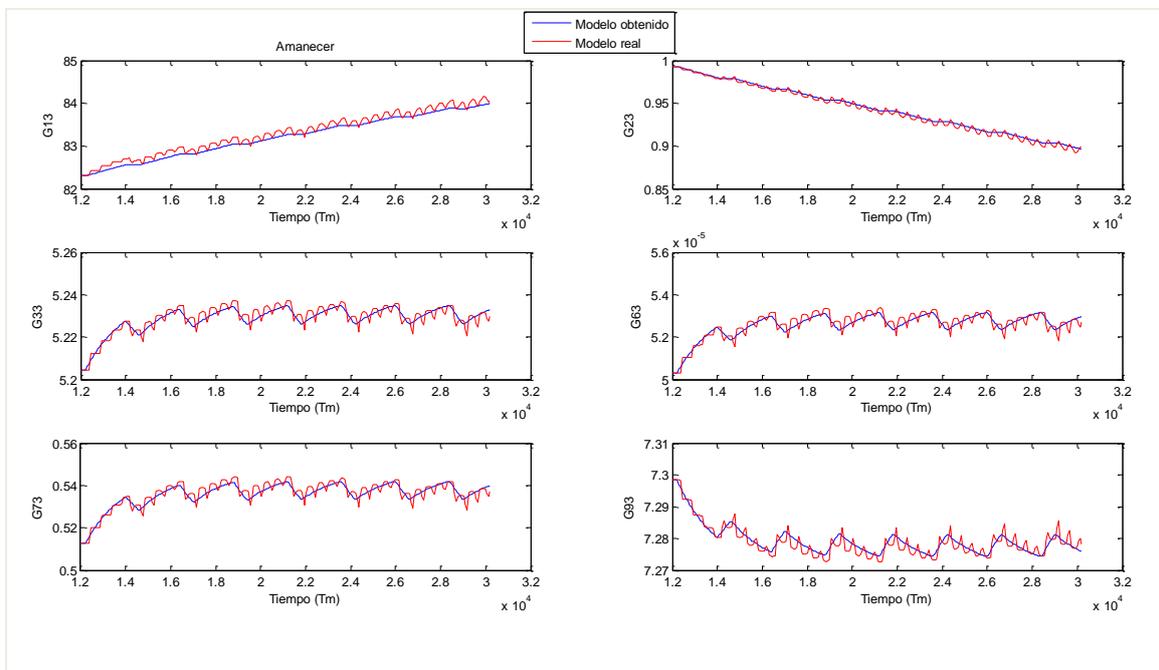


Figura 4.1.11. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 4/02/2014.

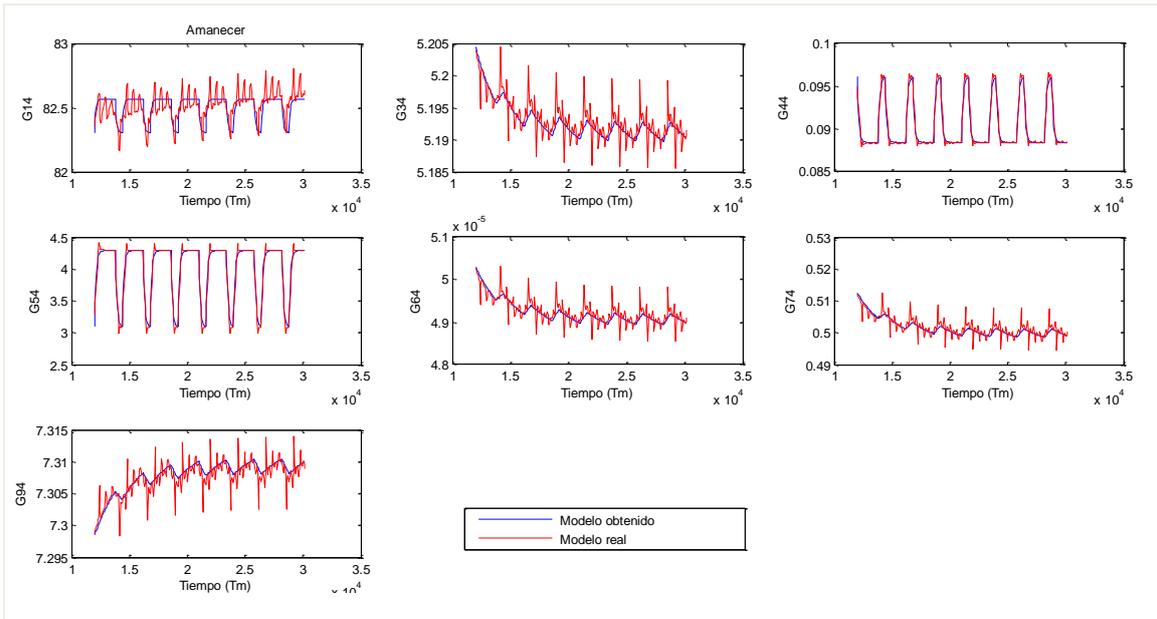


Figura 4.1.12. Validación de modelos para entrada velocidad con los datos del día 4/02/2014.

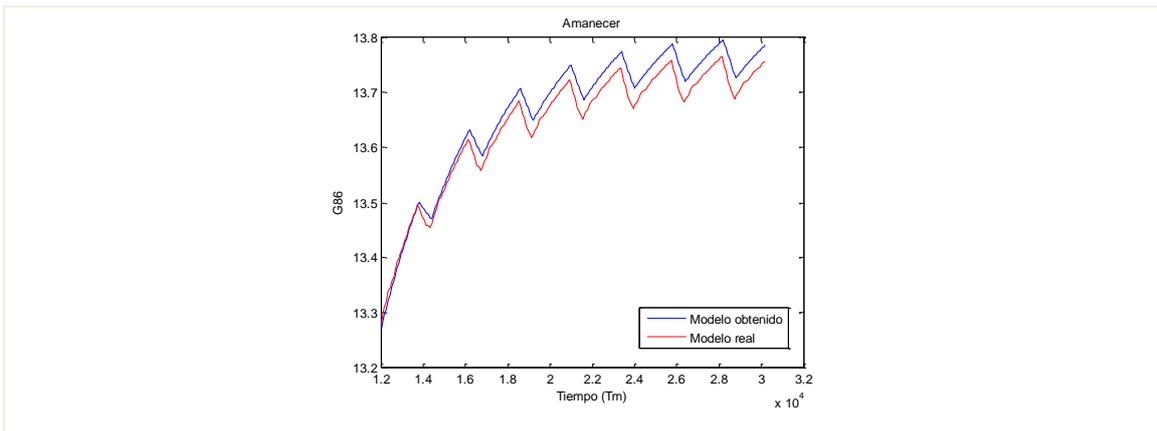


Figura 4.1.13. Validación de modelos para entrada temperatura ambiente con los datos del día 4/02/2014.

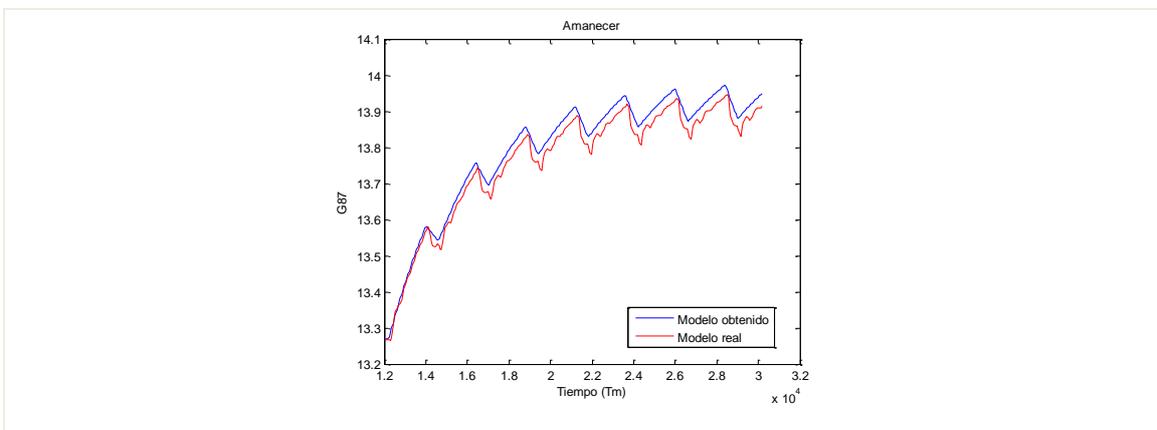


Figura 4.1.14. Validación de modelos para entrada temp. en intercambiador con los datos del día 4/02/2014.

En las figuras anteriores (Figura 4.1.9 - 4.1.14) se presentan las comparaciones gráficas entre las respuestas obtenidas del simulador tras excitar las entradas, en color rojo, y los modelos obtenidos en *MATLAB*, en color azul. Se aprecian pocas diferencias, se puede decir que estos modelos recogen de manera adecuada la dinámica principal del sistema. Estas figuras corresponden a las validaciones realizadas para el día 4 de febrero de 2014 antes de la salida del sol.

❖ Día 4/02/2014 después de la puesta de sol:

Para la validación después de la puesta de sol se han utilizado los mismos modelos para otro punto de operación, en el que los valores de las entradas son los mismos y los de las salidas varían ligeramente, de ahí que en algunos casos las validaciones no sean tan exactas (Ver figuras de 4.1.15 a 4.1.20).

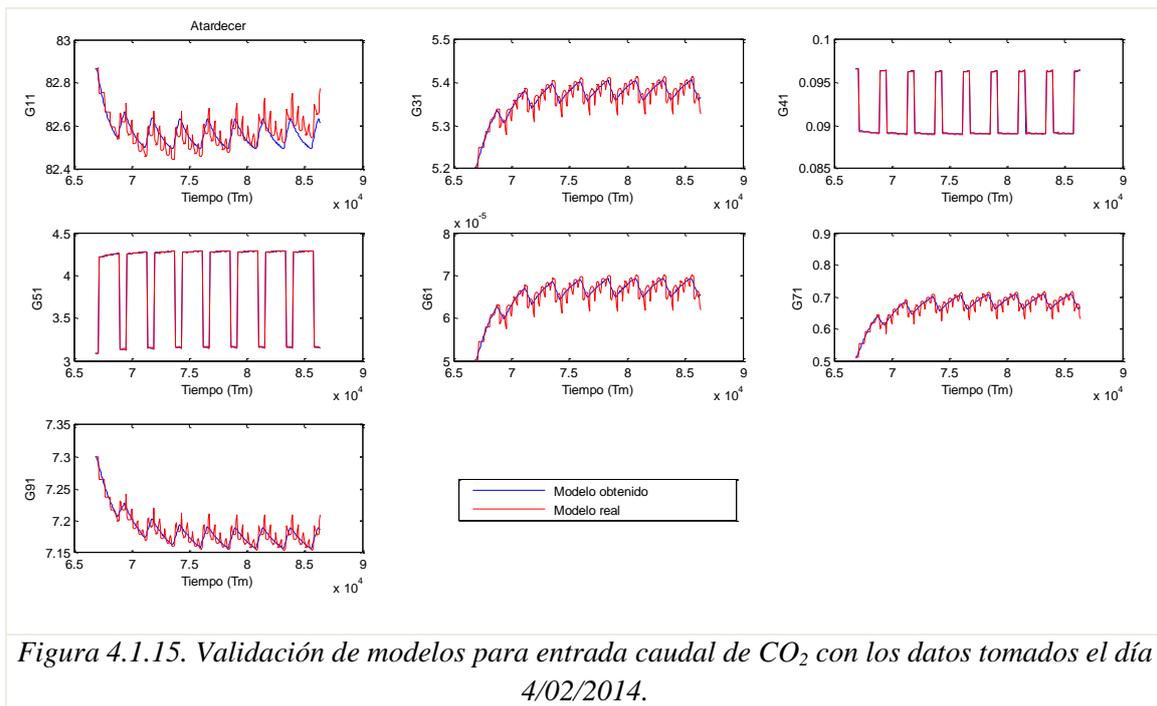


Figura 4.1.15. Validación de modelos para entrada caudal de  $CO_2$  con los datos tomados el día 4/02/2014.

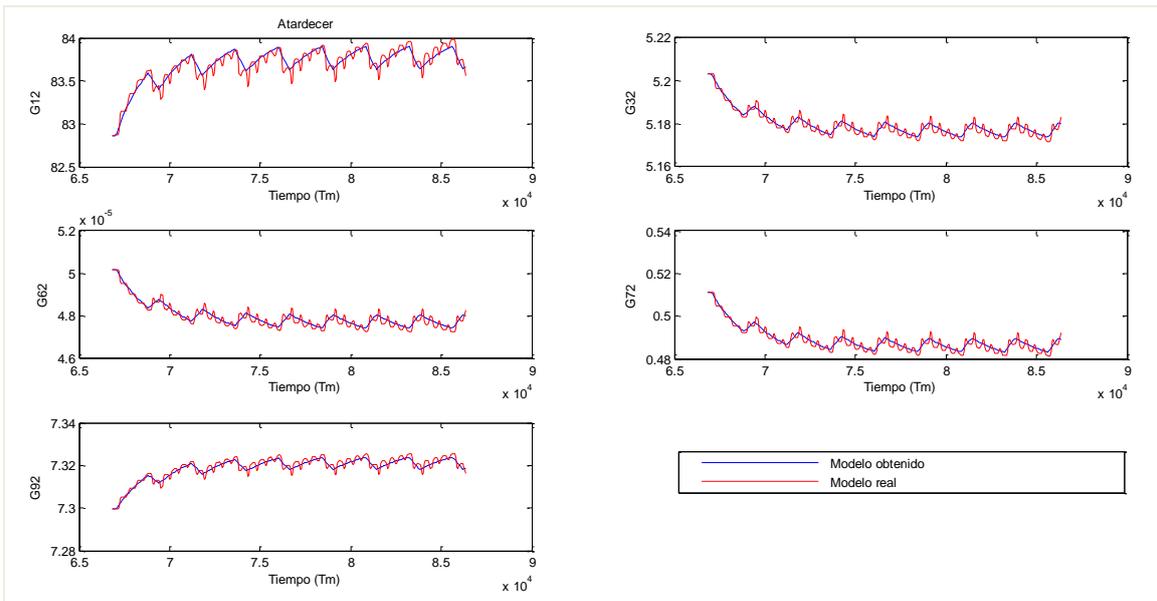


Figura 4.1.16. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 4/02/2014.

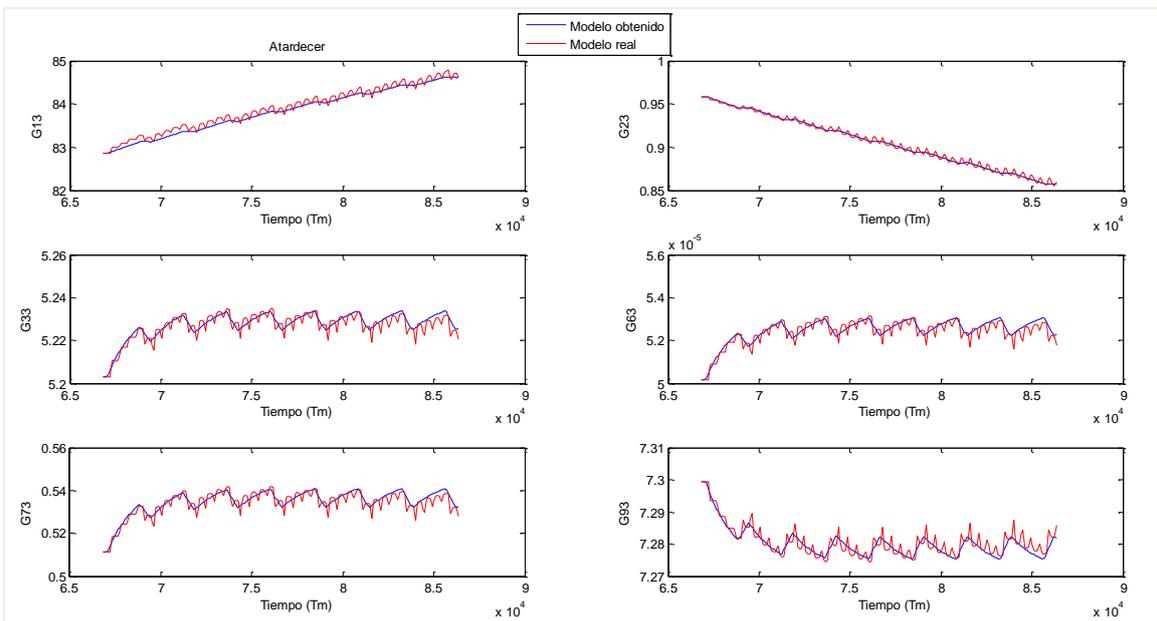


Figura 4.1.17. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 4/02/2014.

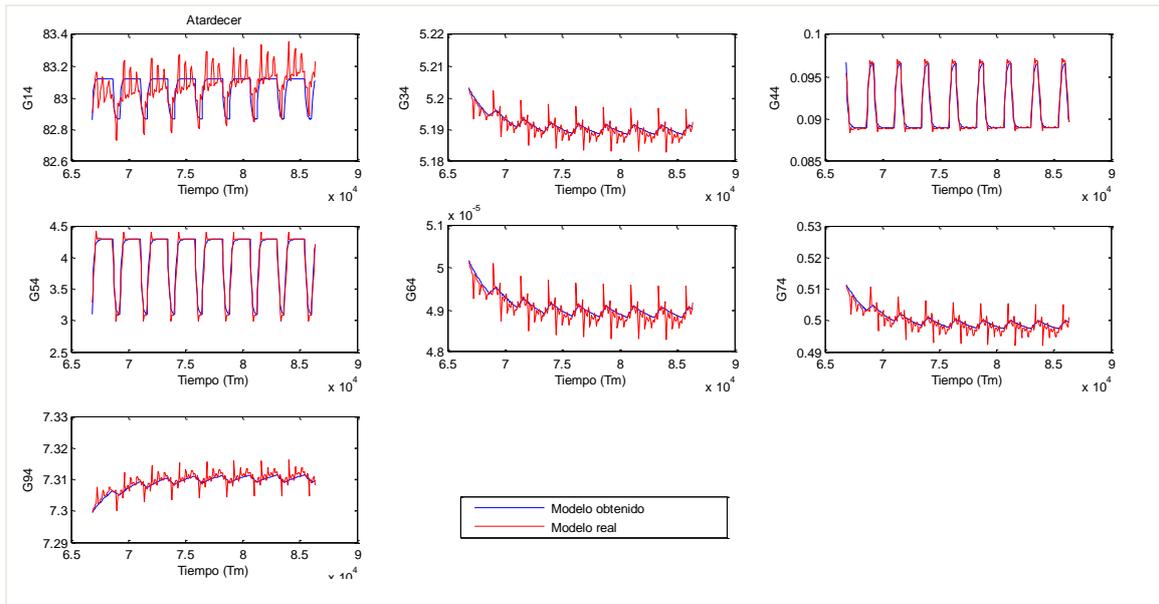


Figura 4.1.18. Validación de modelos para entrada velocidad con los datos del día 4/02/2014.

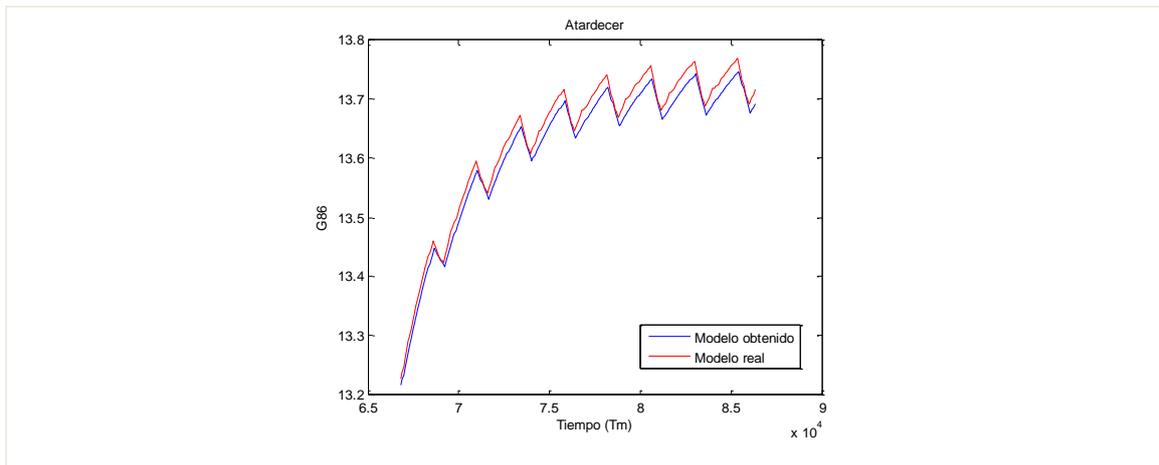


Figura 4.1.19. Validación de modelos para entrada temp. ambiente con los datos tomados el día 4/02/2014.

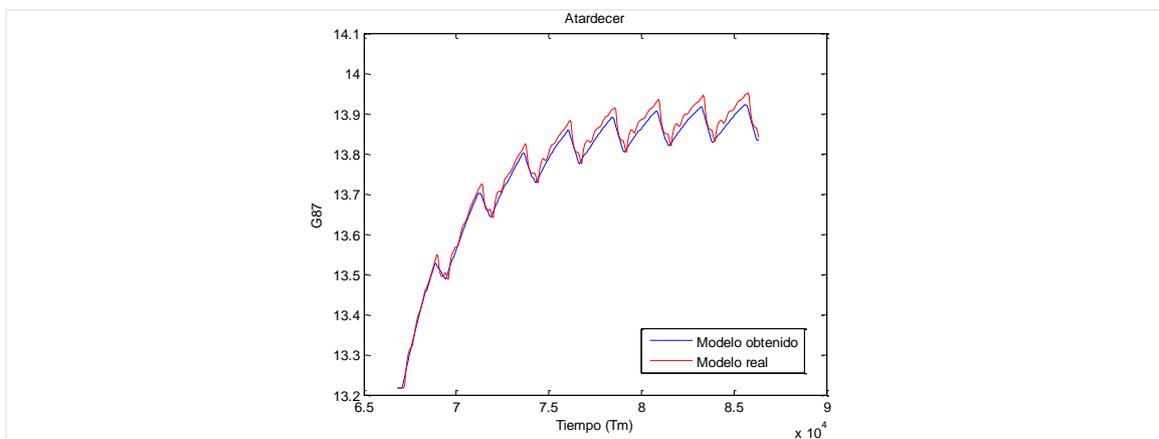


Figura 4.1.20. Validación de modelos para entrada temp. en intercambiador con los datos del día 4/02/2014.

❖ Día 7/02/2014 antes de la salida del sol:

Se repiten los mismos pasos para el día 7 de febrero de 2014, obteniendo resultados similares. De la figura 4.1.21 a la 4.1.26 se presentan los resultados para el tramo antes de la salida del sol y de la 4.1.27 a la 4.1.32 los del anochecer.

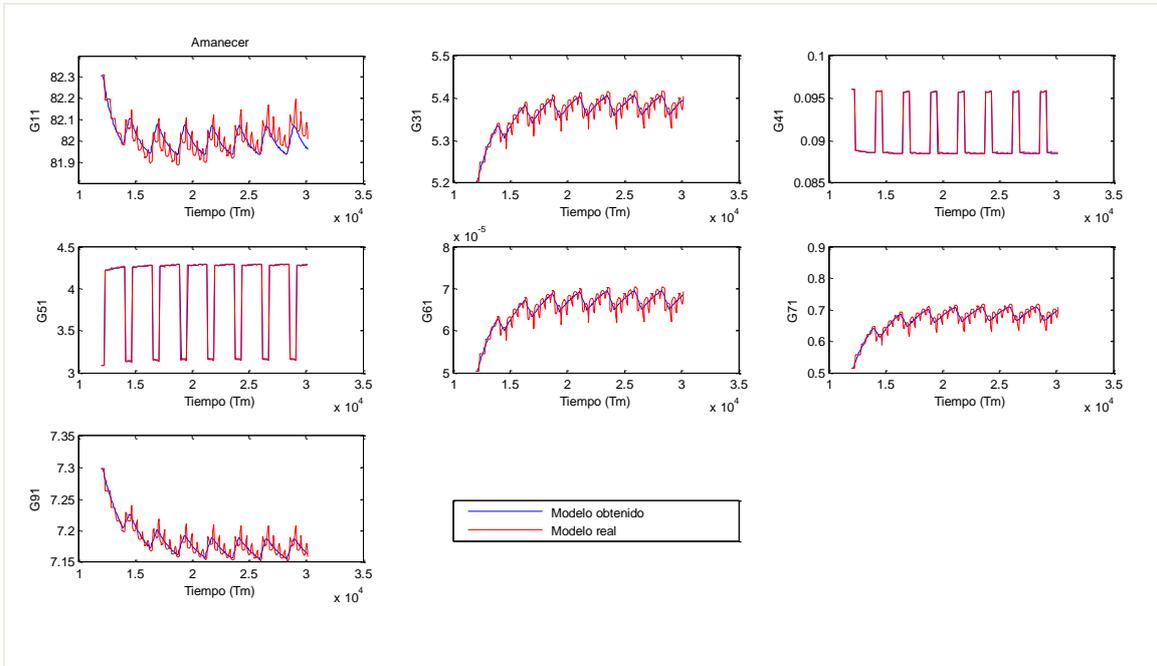


Figura 4.1.21. Validación de modelos para entrada caudal de  $CO_2$  con los datos tomados el día 7/02/2014.

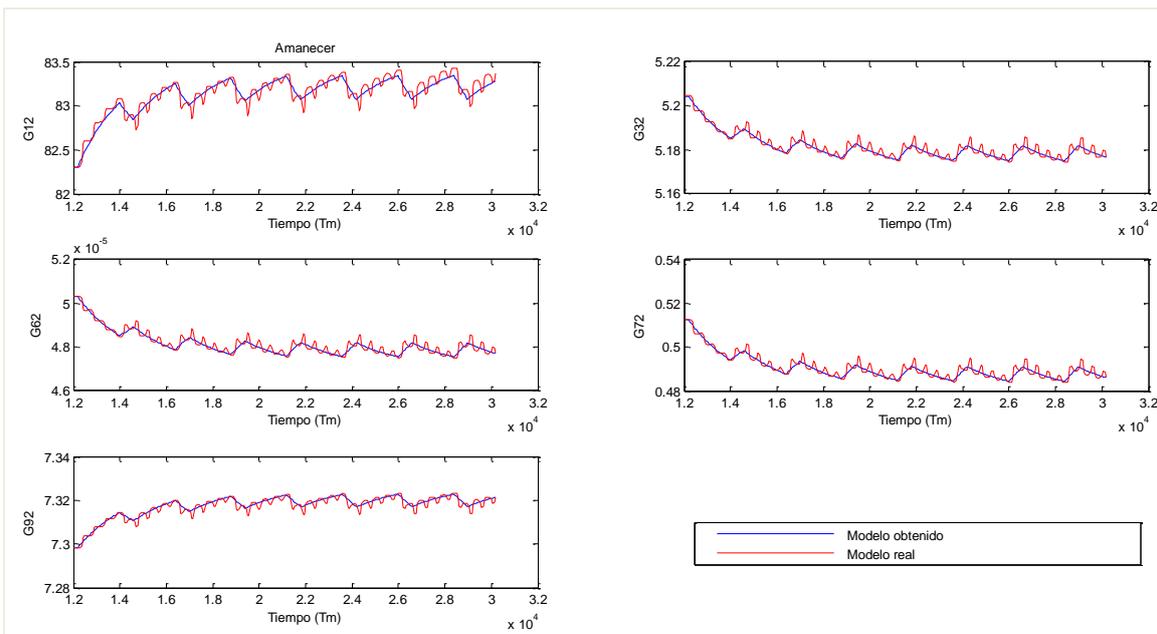


Figura 4.1.22. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 7/02/2014.

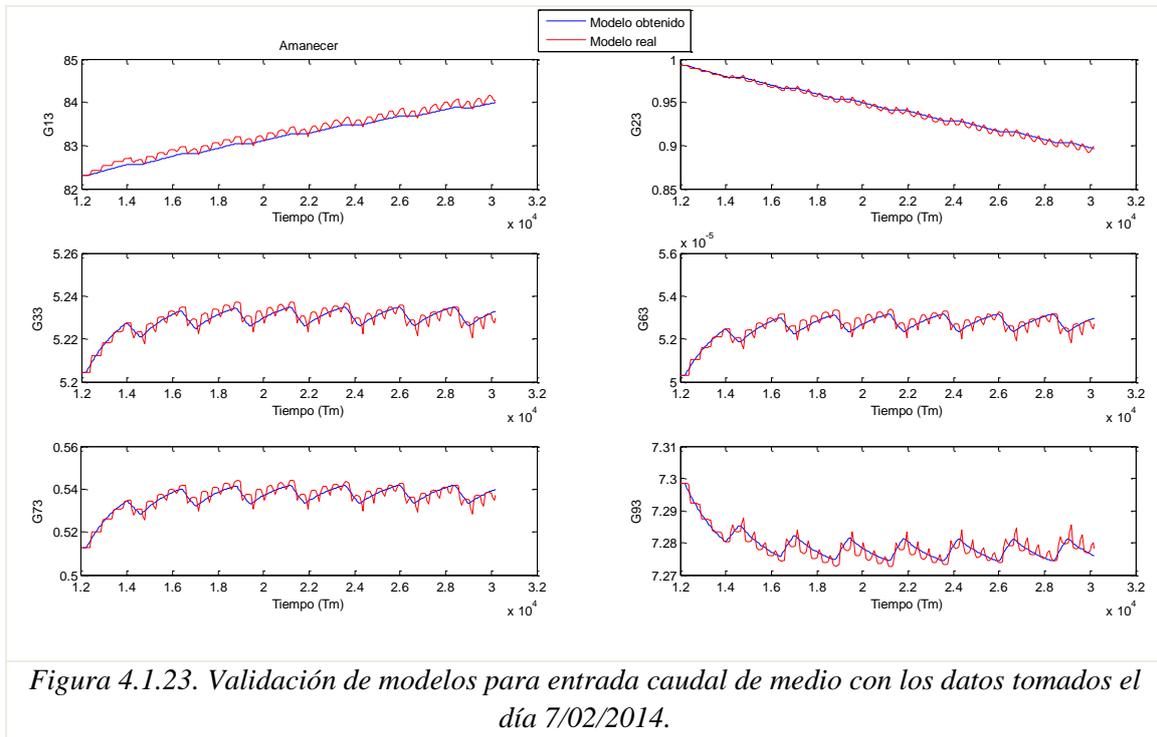


Figura 4.1.23. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 7/02/2014.

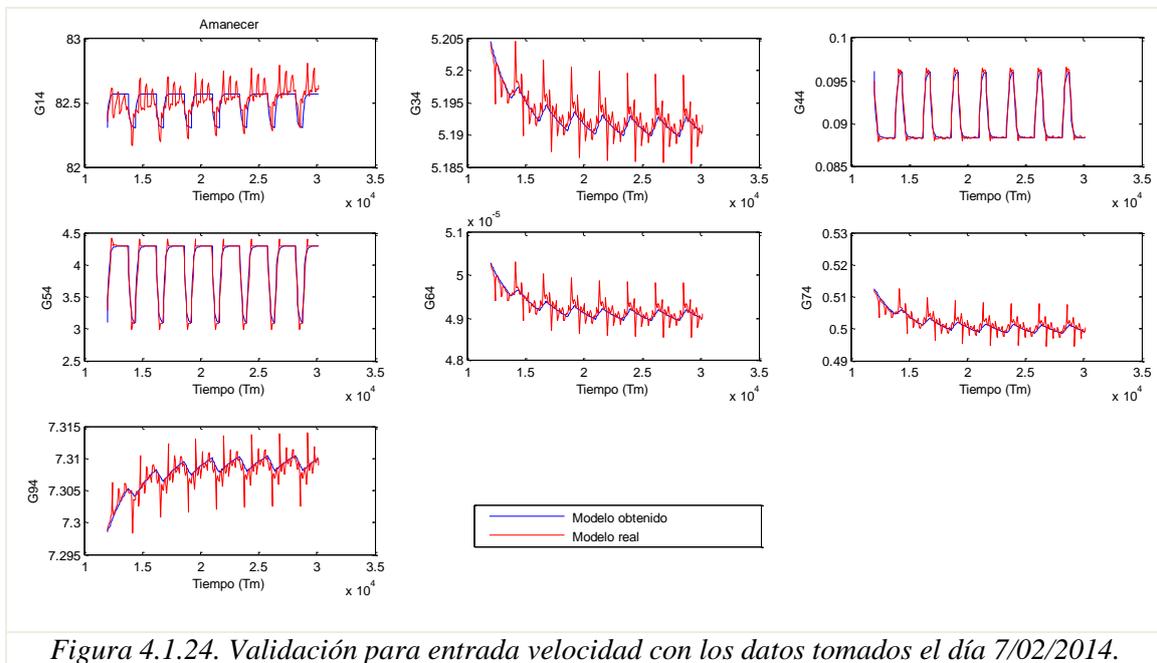
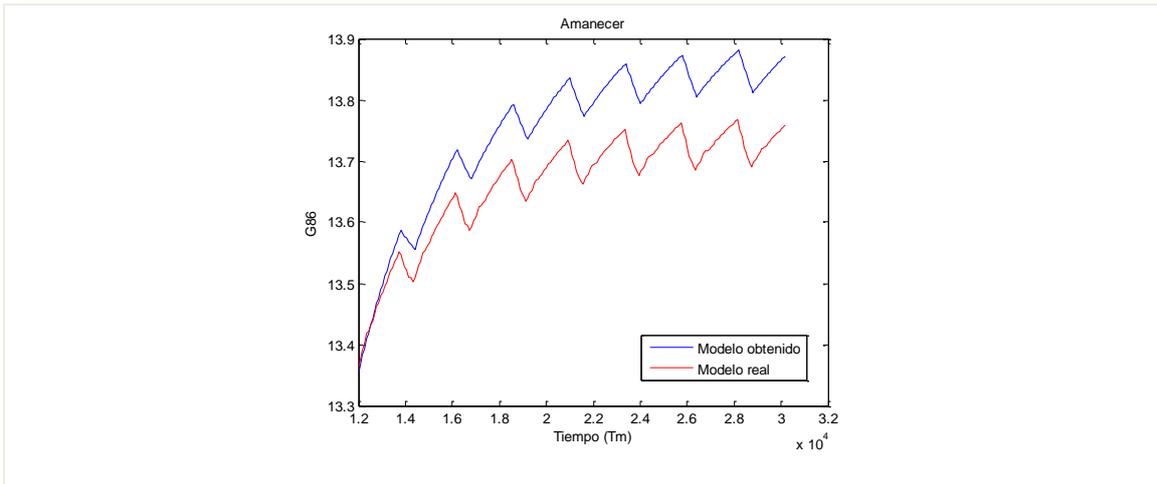
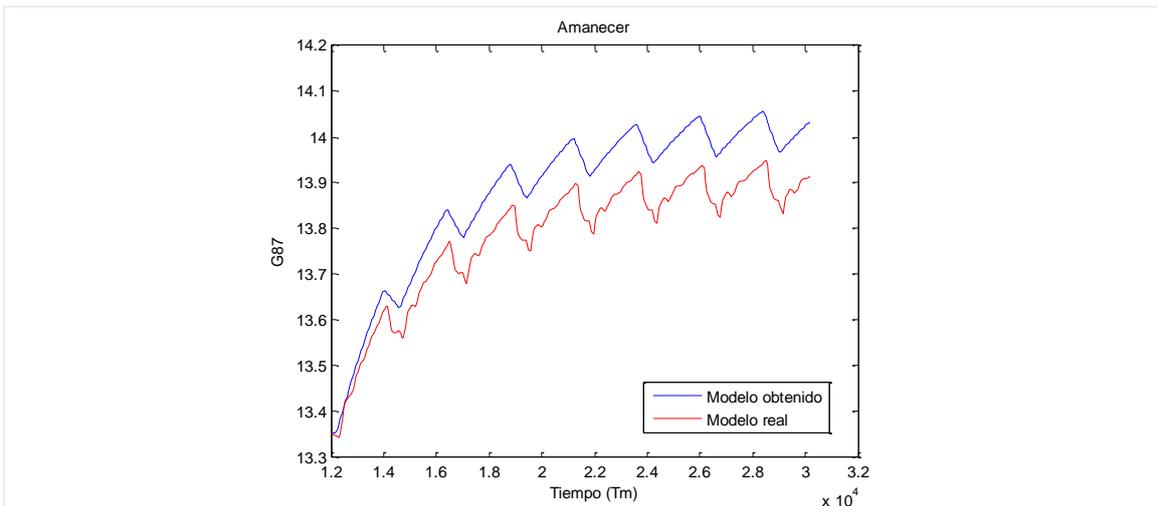


Figura 4.1.24. Validación para entrada velocidad con los datos tomados el día 7/02/2014.



*Figura 4.1.25. Validación de modelos para entrada temp. ambiente con los datos tomados el día 7/02/2014.*



*Figura 4.1.26. Validación de modelos para entrada temp. en el intercambiador con los datos del día 7.*

Por lo general las gráficas muestran la bondad de los modelos obtenidos, sin embargo, en las figuras 4.1.25 y 4.1.26 se aprecian diferencias de ganancia estática, debido a errores en la identificación. No se le ha dado demasiada importancia a este hecho, ya que se trata de modelos lineales que representan cambios en torno al punto de operación. Estos errores se compensarán más tarde, en primer lugar se reajustará el sistema completo considerando todas las entradas a la vez y en segundo lugar al usarse dentro de un lazo de control gracias a la realimentación.

❖ Día 7/02/2014 después de la puesta de sol:

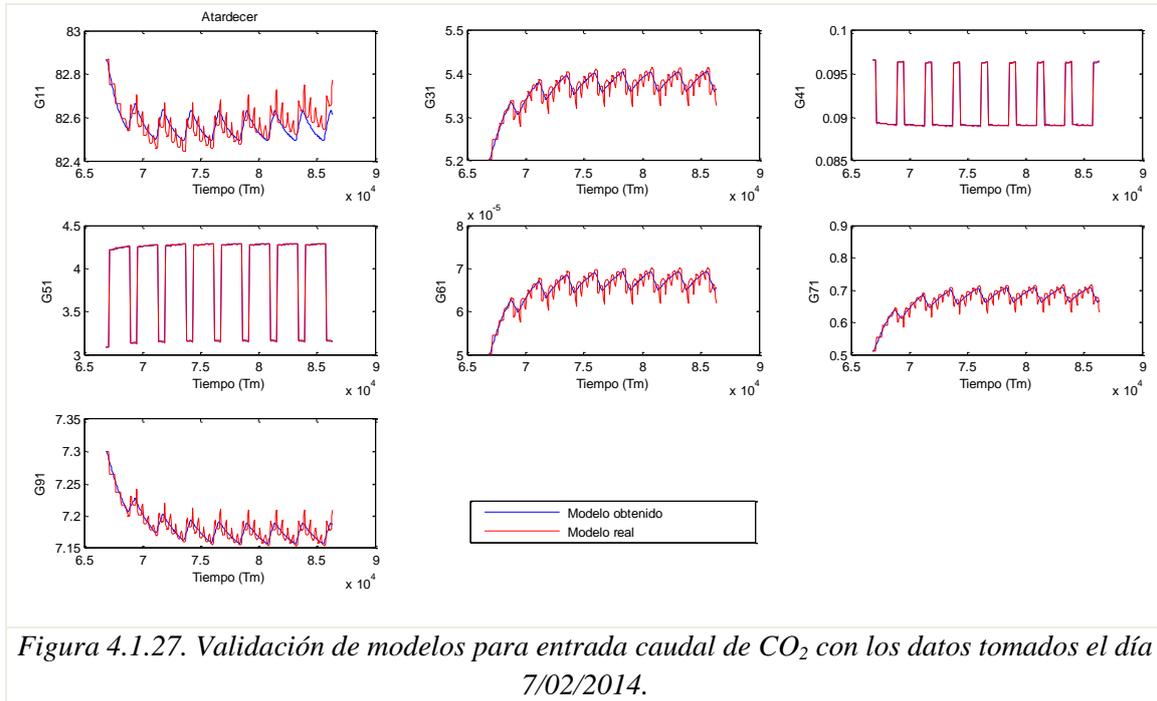


Figura 4.1.27. Validación de modelos para entrada caudal de  $\text{CO}_2$  con los datos tomados el día 7/02/2014.

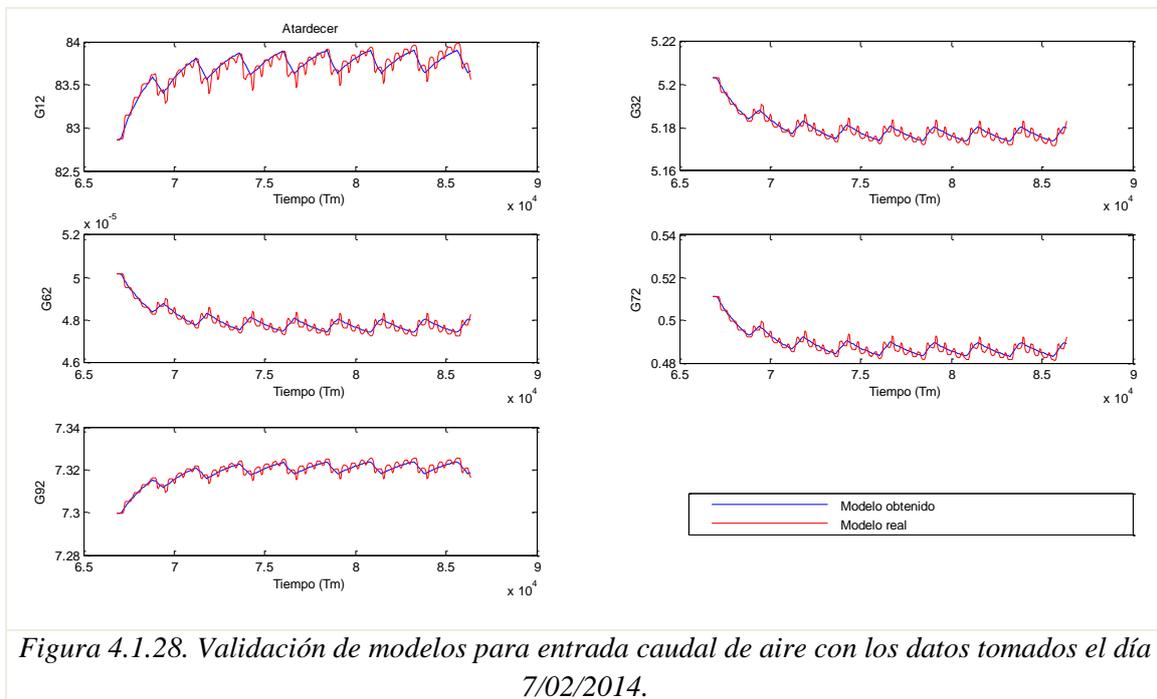


Figura 4.1.28. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 7/02/2014.

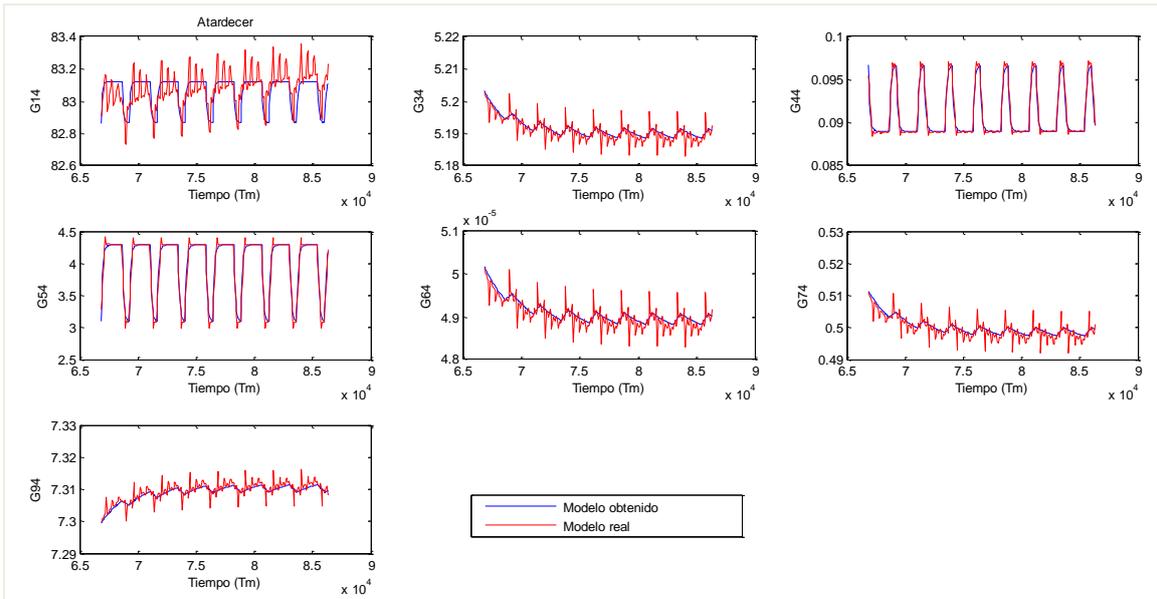


Figura 4.1.29. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 7/02/2014.

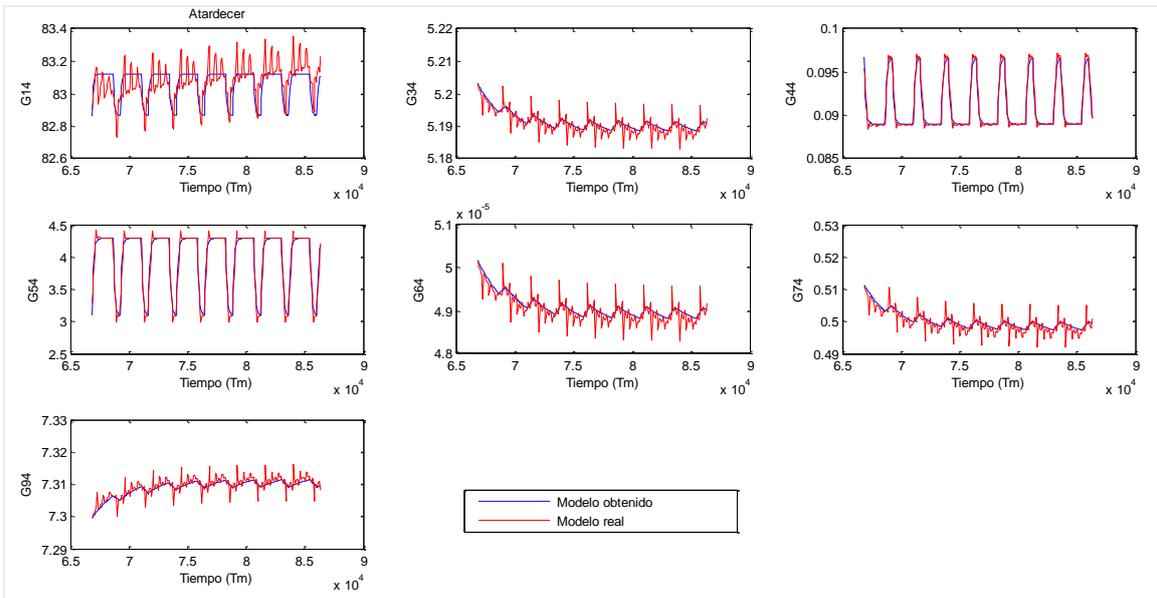


Figura 4.1.30. Validación para entrada velocidad con los datos tomados el día 7/02/2014.

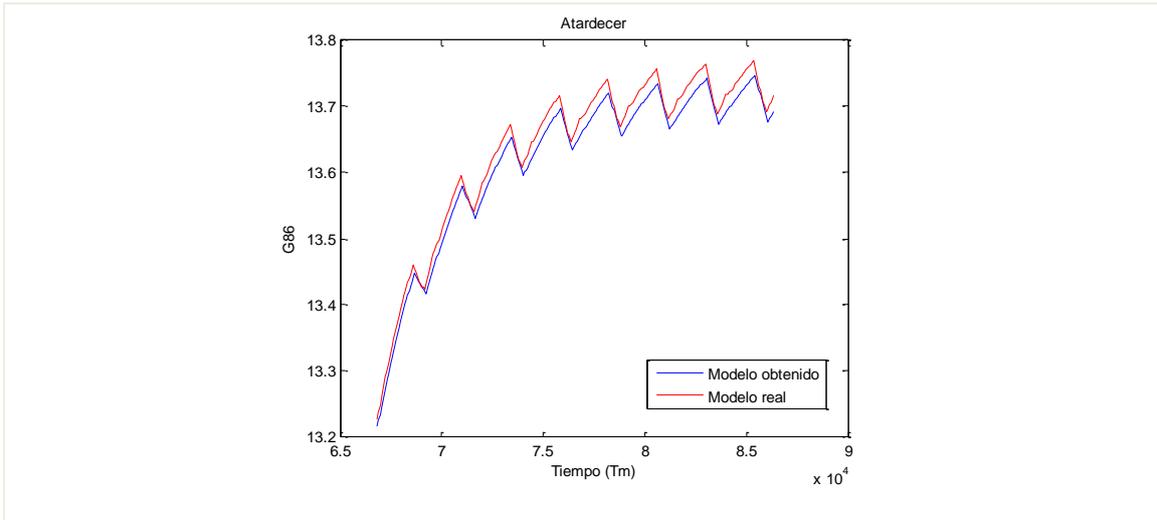


Figura 4.1.31. Validación de modelos para entrada temp. ambiente con los datos tomados el día 7/02/2014.

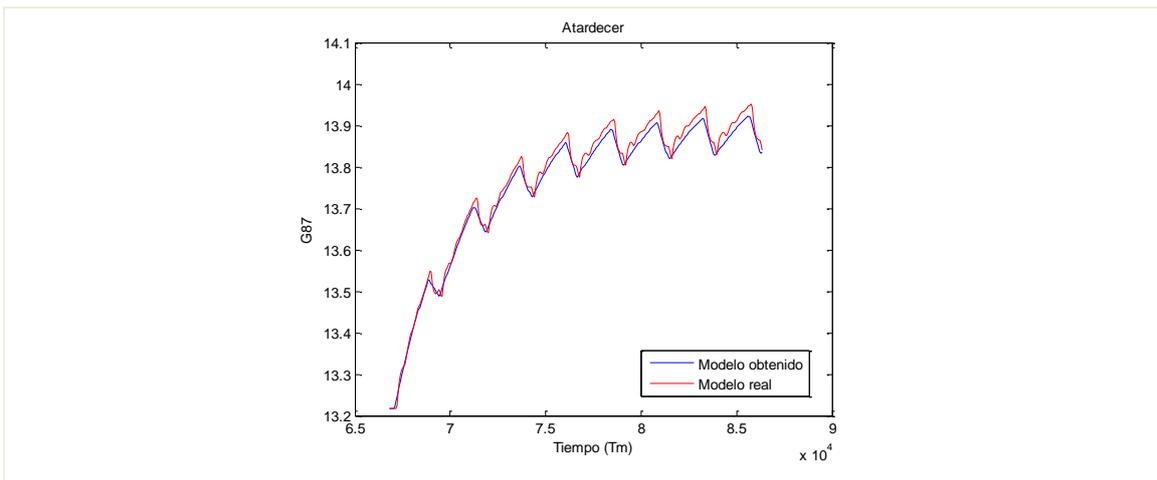


Figura 4.1.32. Validación de modelos para entrada temp. en intercambiador con los datos del día 7/02/2014.

Comprobamos que los modelos propuestos se ajustan bastante al sistema real, hay algunos casos, sobre todo en las temperaturas, en los que dependiendo del día y del tramo las validaciones empeoran ligeramente, es propio de un sistema tan complicado de linealizar como este, en el que afectan múltiples variables y las condiciones de trabajo cambian constantemente.

## 4.2. Modelado del comportamiento diurno del sistema

Para el modelado del día se han seguido los mismos pasos que para la noche, pero esta vez el punto de trabajo es distinto, se ha escogido en torno al mediodía solar y se estudiarán los efectos de las entradas mientras la radiación sea diferente de cero. El tren de pulsos se le ha dado en  $t=48000$  [s]. El punto de trabajo queda definido por:

$u_n$	Entrada	Punto de trabajo
u0	Radiación solar [ $W/m^2$ ]	530
u1	Caudal de $CO_2$ [ $l/min$ ]	3
u2	Caudal de aire [ $l/min$ ]	140.1
u3	Caudal de medio [ $l/min$ ]	0
u4	Velocidad [ $m/s$ ]	0.9520
u5	Caudal de agua [ $l/min$ ]	30
u6	Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]	24
u7	Temperatura intercambiador [ $^{\circ}C$ ]	13.4
u8	Temperatura del medio [ $^{\circ}C$ ]	24

Tabla 4.13. Valores de las entradas en el punto de trabajo durante el día.

$y_n$	Salida	Punto de operación
y1	$O_2$ [%]	414.46
y2	$C_b$ [ $kg/m^3$ ]	1.57
y3	$CT$ [ $kg/m^3$ ]	5.18
y4	$YO_2$ [ $mol O_2/mol N_2$ ]	0.36
Y3	$YCO_2$ [ $mol CO_2/mol N_2$ ]	5.82
y6	$H$ [ $mol/m^3$ ]	4.77e-5
y7	$CO_2$ [ $mol/m^3$ ]	0.49
y8	$T$ [ $^{\circ}C$ ]	27.58
y9	pH	7.32

Tabla 4.14. Valores de las salidas en el punto de trabajo durante el día.

A continuación se muestran en rojo las respuestas del sistema cuando todas las entradas son constantes y en azul las correspondientes al sistema cuando se excitan estas variables una a una. Se comentan los resultados más adelante.

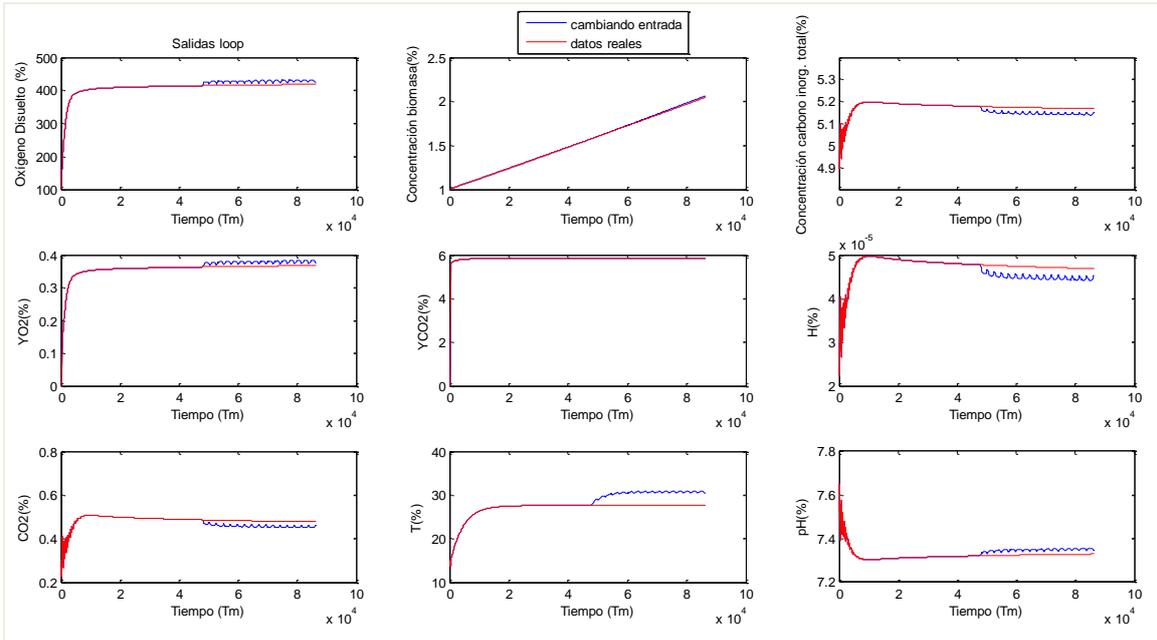


Figura 4.2.1 Salidas tras excitar la entrada radiación.

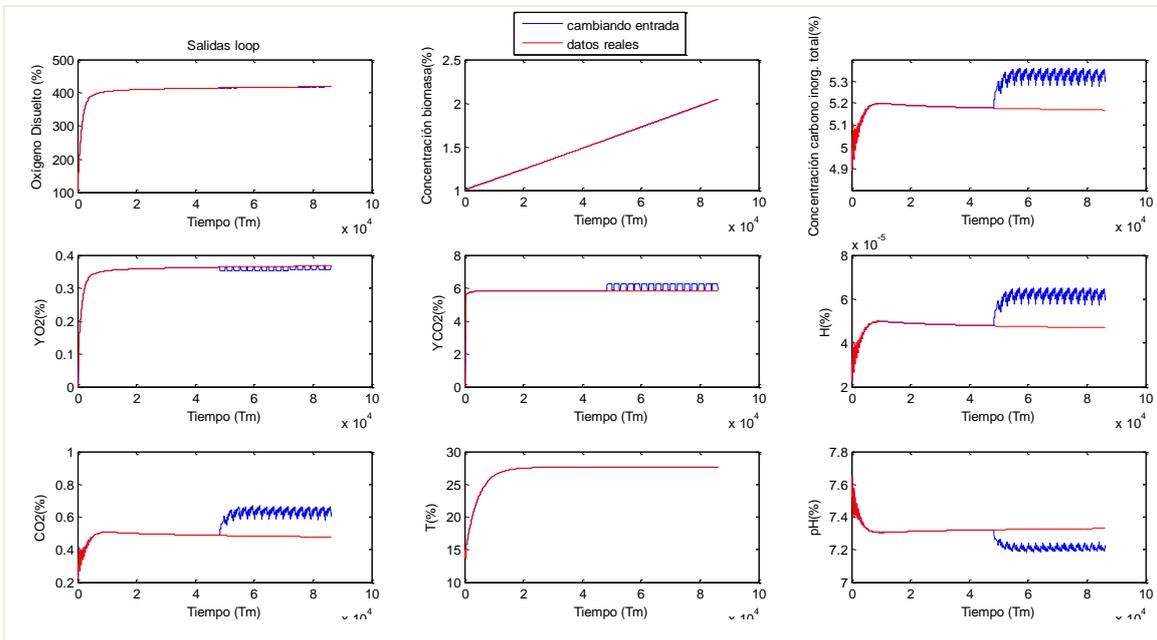


Figura 4.2.2. Salidas tras excitar la entrada caudal de CO<sub>2</sub>.

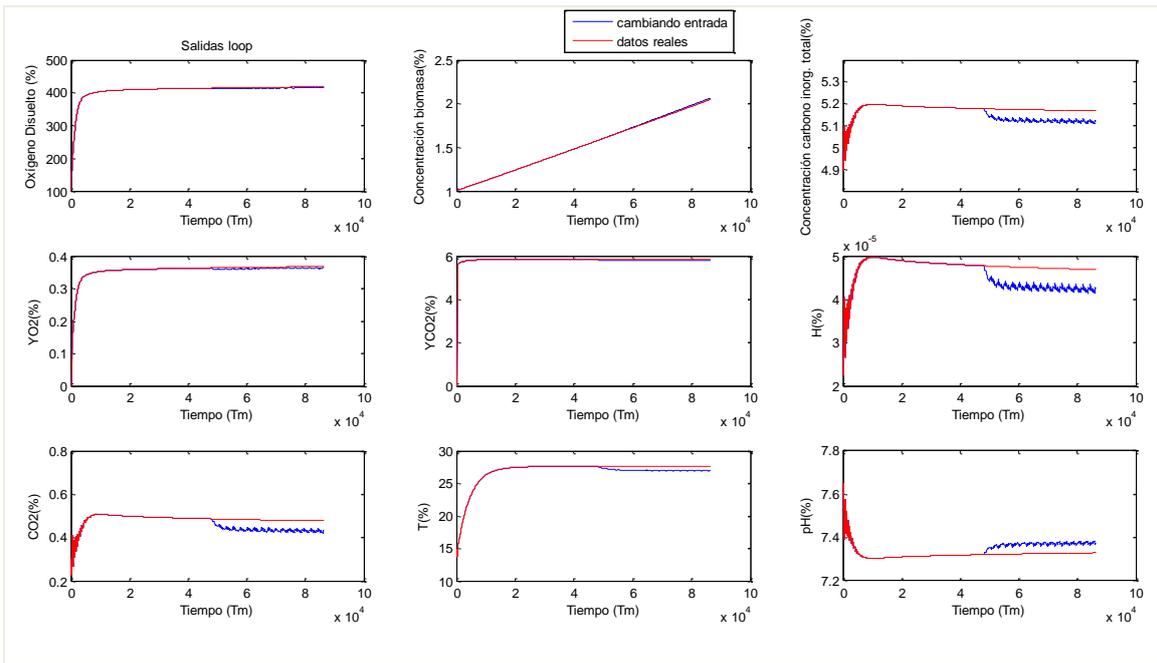


Figura 4.2.3. Salidas tras excitar la entrada caudal de aire.

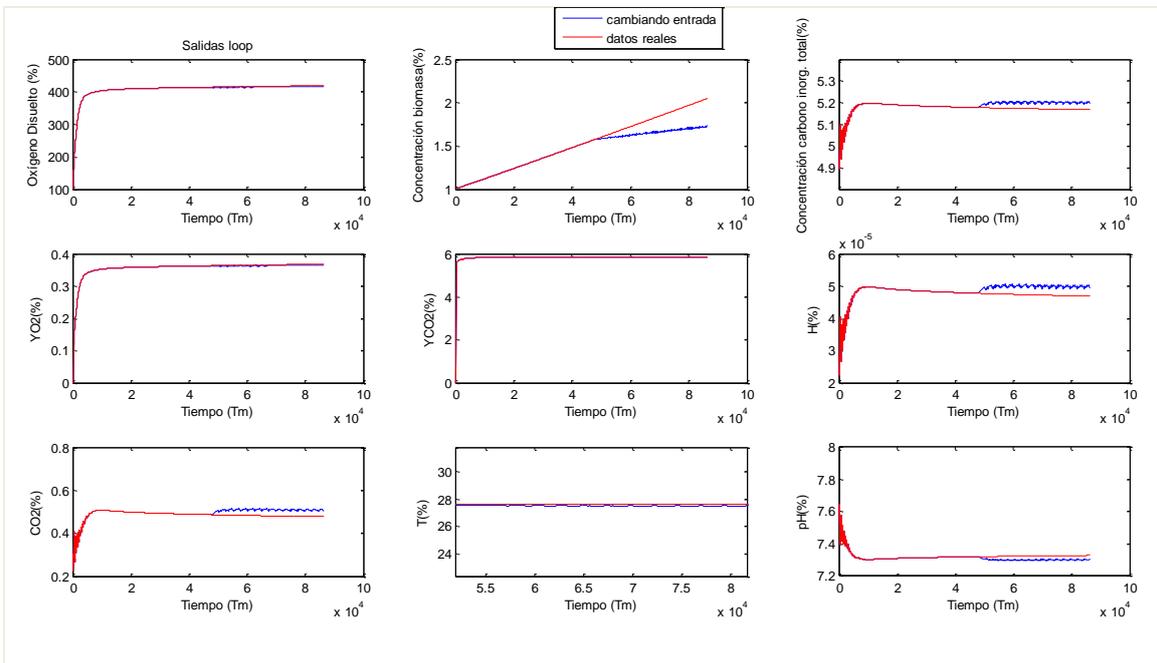


Figura 4.2.4. Salidas tras excitar la entrada caudal de medio.

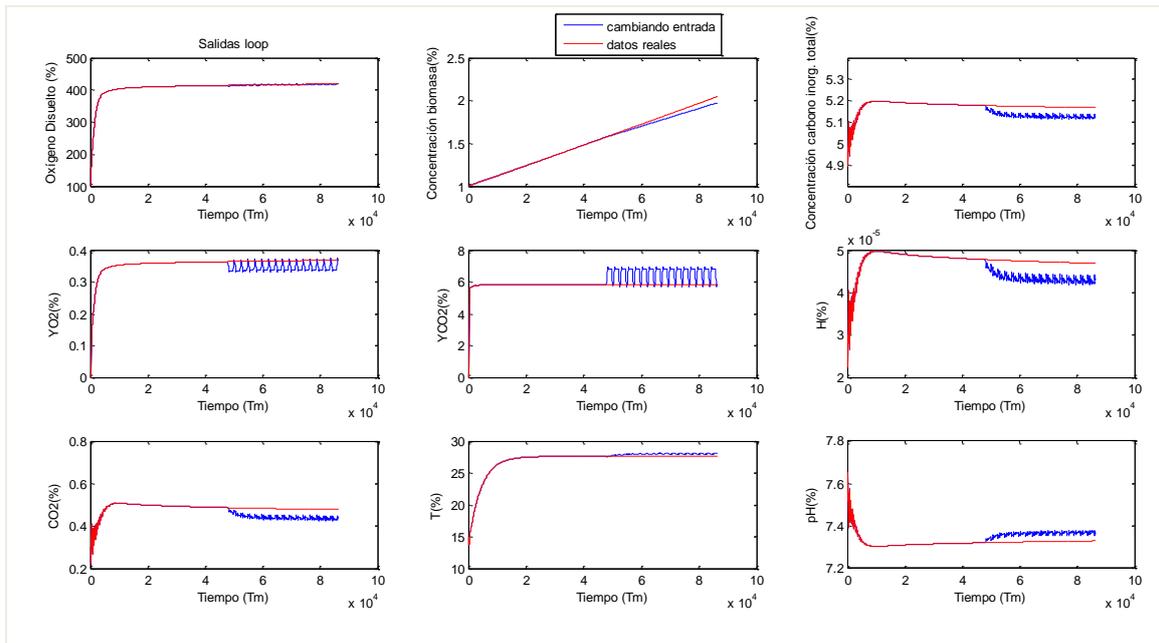


Figura 4.2.5. Salidas tras excitar la entrada velocidad.

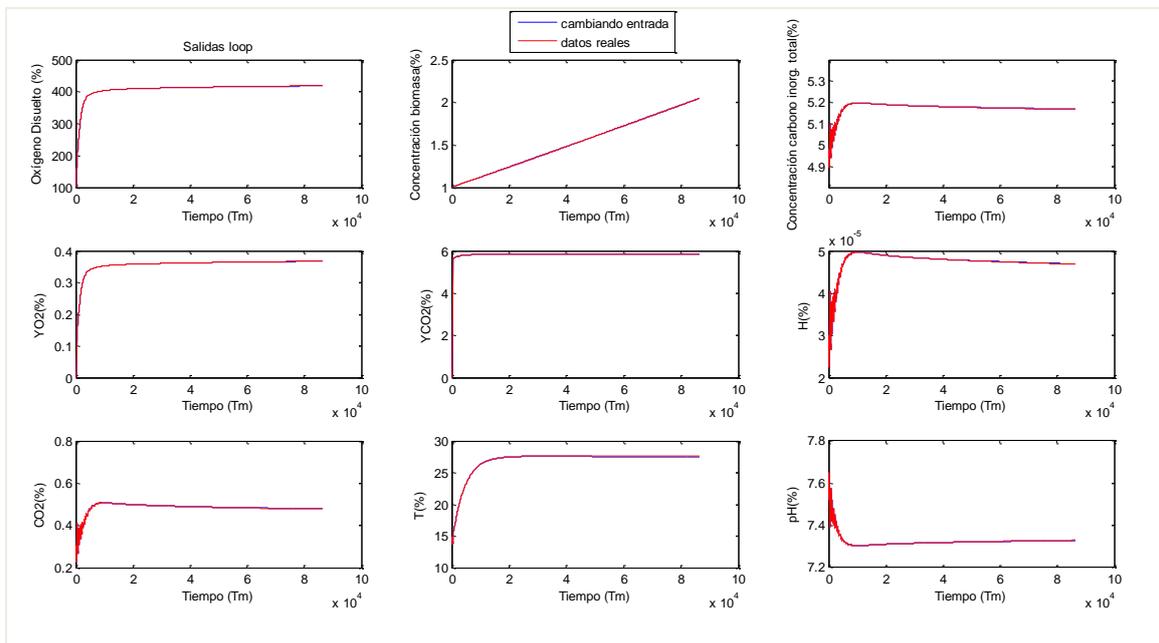


Figura 4.2.6. Salidas tras excitar la entrada caudal de agua.

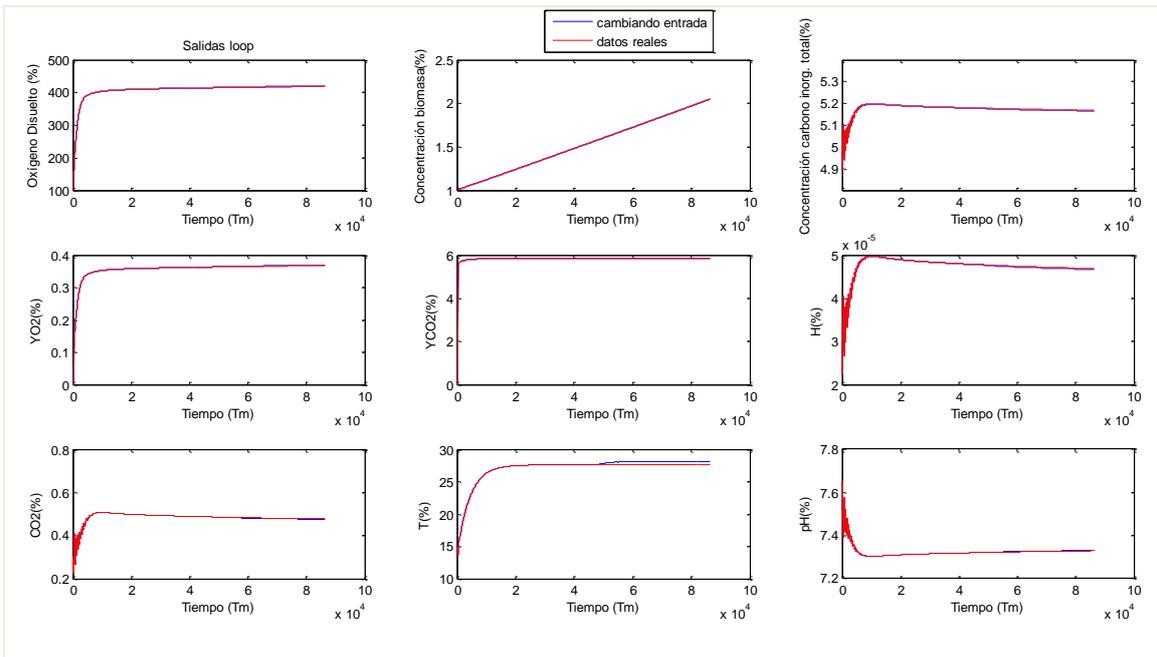


Figura 4.2.7. Salidas tras excitar la entrada temperatura ambiente.

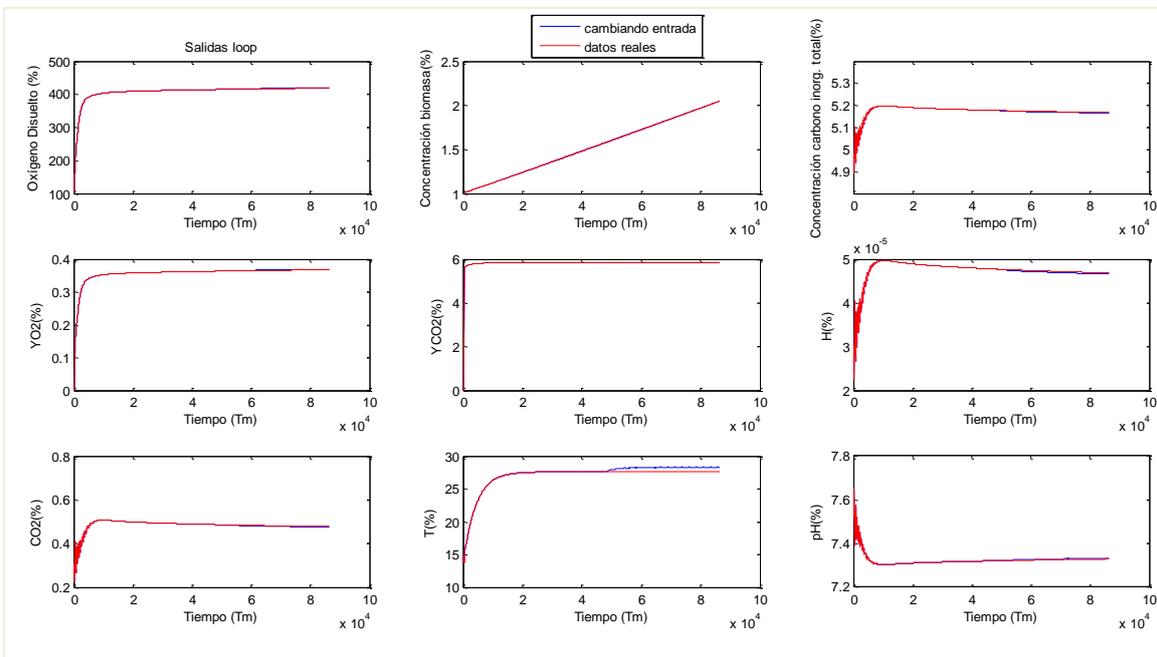


Figura 4.2.8. Salidas tras excitar la entrada temperatura de agua del intercambiador.

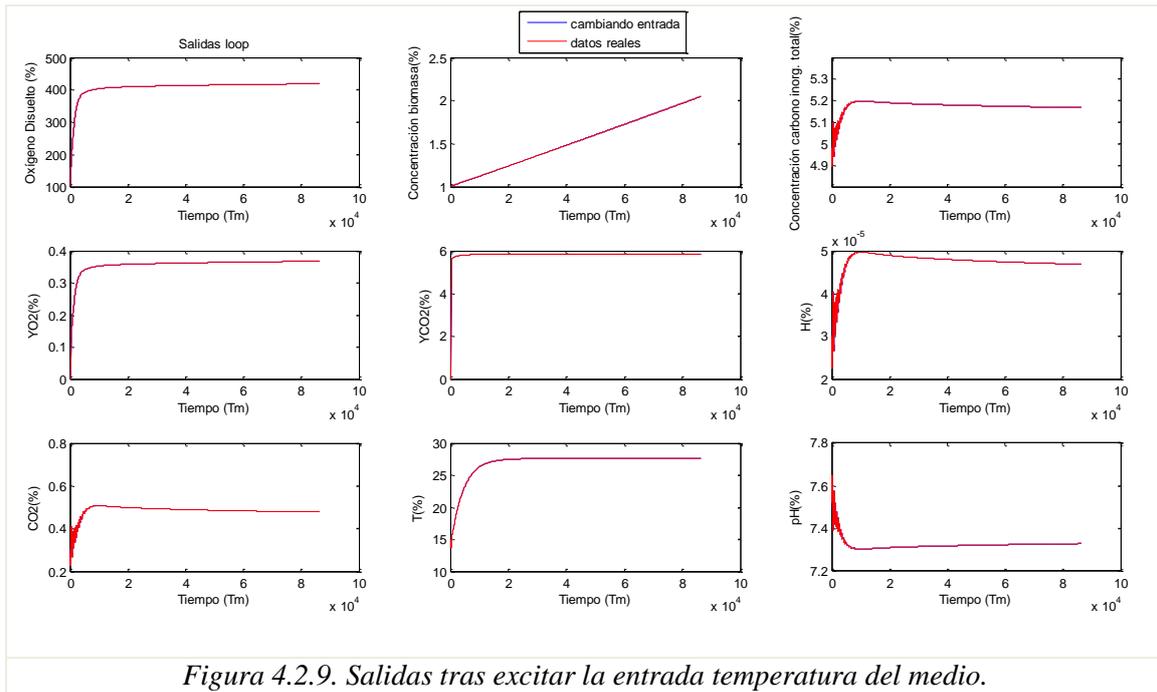


Figura 4.2.9. Salidas tras excitar la entrada temperatura del medio.

Los resultados que muestran las figuras anteriores (figuras de la 4.2.1 a 4.2.9) son similares a los de la noche, las variables que más repercusión tienen en el sistema son el caudal de CO<sub>2</sub>, el de aire y el de medio y la velocidad de circulación del cultivo, como novedad, se añade a estas la radiación solar, que afecta a la mayoría de variables de salida además de influir en el comportamiento de algunas de ellas frente a otras entradas, como es el caso de las temperaturas que serán más vulnerables a los cambios que durante la noche. Por el contrario, debido a la fotosíntesis de las microalgas la concentración de oxígeno aumentará considerablemente y se verá menos influenciada por muchas de las entradas. Según las respuestas del sistema el modelo queda:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \\ Y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & G_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_{31} & G_{32} & G_{34} & 0 & 0 & 0 \\ G_{41} & 0 & G_{44} & 0 & 0 & 0 \\ G_{51} & 0 & G_{54} & 0 & 0 & 0 \\ G_{61} & G_{62} & G_{64} & 0 & 0 & 0 \\ G_{71} & G_{72} & G_{74} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{82} & G_{84} & 0 & G_{87} & 0 \\ G_{91} & G_{92} & G_{94} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_7 \\ U_8 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{10} \\ 0 \\ G_{30} \\ G_{40} \\ 0 \\ G_{60} \\ G_{70} \\ G_{80} \\ G_{90} \end{pmatrix} \cdot U_0 + \begin{pmatrix} 0 \\ G_{23} \\ G_{33} \\ 0 \\ G_{63} \\ G_{73} \\ 0 \\ G_{93} \end{pmatrix} \cdot U_3 + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ G_{86} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot U_6 \quad (4.4)$$

Los modelos obtenidos con los datos de los días 3 y 6 difieren algo más entre sí que los de la noche, pues en la radiación solar afectan múltiples factores que hacen imposible que se repita el mismo registro solar dos días diferentes. Se realizará la media aritmética de los valores de ambos días.

Durante el día se encuentran tanto modelos de primer orden como de segundo, incluyendo algunos de ellos tiempo de retardo y/o ceros:

$$G_{ij} = \frac{k}{(\tau \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (4.5)$$

$$G_{ij} = \frac{k \cdot (\beta \cdot s + 1)}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (4.6)$$

$G_{ij}$	$k[*^1]$	$\tau_1[s]$	$\tau_2[s]$	$t_r[s]$	$\beta[s]$
$G_{31}$	0.35436	2167.55	-	127.37	-
$G_{41}$	-0.018534	-	-	300	-
$G_{51}$	0.709805	-	-	300	-
$G_{61}$	$3.33655 \cdot 10^{-5}$	2169.75	-	127.07	-
$G_{71}$	0.34178	2169.45	-	127.07	-
$G_{91}$	-0.26384	2137.9	-	132.48	-
$G_{32}$	-0.00512175	2442.6	-	216.145	-
$G_{62}$	$-4.75125 \cdot 10^{-7}$	2440.55	-	216.33	-
$G_{72}$	$-4.8731 \cdot 10^{-3}$	2441.4	-	216.315	-
$G_{82}$	-0.059466	4038.1	-	216.51	-
$G_{92}$	0.0045723	2472.35	-	214.945	-
$G_{23}$	$4.2211 \cdot 10^{-6}$	41943.5	Integrador[* <sup>2</sup> ]	1800	47599.5
$G_{33}$	0.033778	2041.1	-	209.48	-
$G_{63}$	$3.148 \cdot 10^{-6}$	2040	-	209.445	-
$G_{73}$	0.0321915	2038.35	-	209.46	-
$G_{93}$	-0.0279055	2033.05	-	209.95	-
$G_{14}$	13.575	6121.15	-	79.5262	-12143.5
$G_{34}$	-0.680905	3029.25	-	-	-
$G_{44}$	-0.290795	90.269	-	26.72	-
$G_{54}$	10.3795	111.61	-	21.8665	-
$G_{64}$	$-6.32 \cdot 10^{-5}$	3027.15	-	-	-
$G_{74}$	-0.64825	3026.65	-	-	-
$G_{84}$	5.98765	4936.65	85.1525	-	-804.645
$G_{94}$	0.60564	3090.2	-	-	-
$G_{86}$	0.291155	4264.55	-	-	-
$G_{87}$	0.70502	4176.2	-	223.66	-
$G_{10}$	0.09089	5882.9	209.01	8.5498	2544.65
$G_{30}$	$-2.095 \cdot 10^{-4}$	4527.85	197.225	4.627	1293.65
$G_{40}$	$8.80765 \cdot 10^{-5}$	736.84	-	13.954	-
$G_{60}$	$-1.9053 \cdot 10^{-8}$	3788.8	201.93	-	1147.25
$G_{70}$	$-1.999 \cdot 10^{-4}$	4529.9	196.93	4.5606	1286.3
$G_{80}$	0.0209	4287.8	-	-	-
$G_{90}$	$1.8314 \cdot 10^{-4}$	4532	199.32	4.3928	1316.35

Tabla 4.15. Parámetros de los modelos obtenidos para el día.

[\*<sup>1</sup>] Las unidades de la ganancia  $k$  serán diferentes para cada función. Serán equivalentes al cociente de las unidades de cada salida dividido entre las de cada entrada.

[\*<sup>2</sup>] La función  $G_{23}$  tiene un polo en el origen o integrador, quedando su función de transferencia definida por la ecuación 4.7:

$$G_{ij} = \frac{k \cdot (\beta \cdot s + 1)}{s \cdot (\tau_1 \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (4.7)$$

Estos modelos se han validado utilizando diferentes datos a los empleados para su obtención, es decir, los de los días 4 y 7:

❖ Para el día 4/02/2014:

Las validaciones realizadas son también aceptables, en azul podemos ver cómo los modelos obtenidos simulan la dinámica principal del sistema. Se aprecia el efecto de la recirculación del cultivo en las pequeñas oscilaciones que aparecen en muchas de las gráficas. Este efecto no es tenido en cuenta por estos modelos (Ver figuras 4.2.10 a 4.2.16).

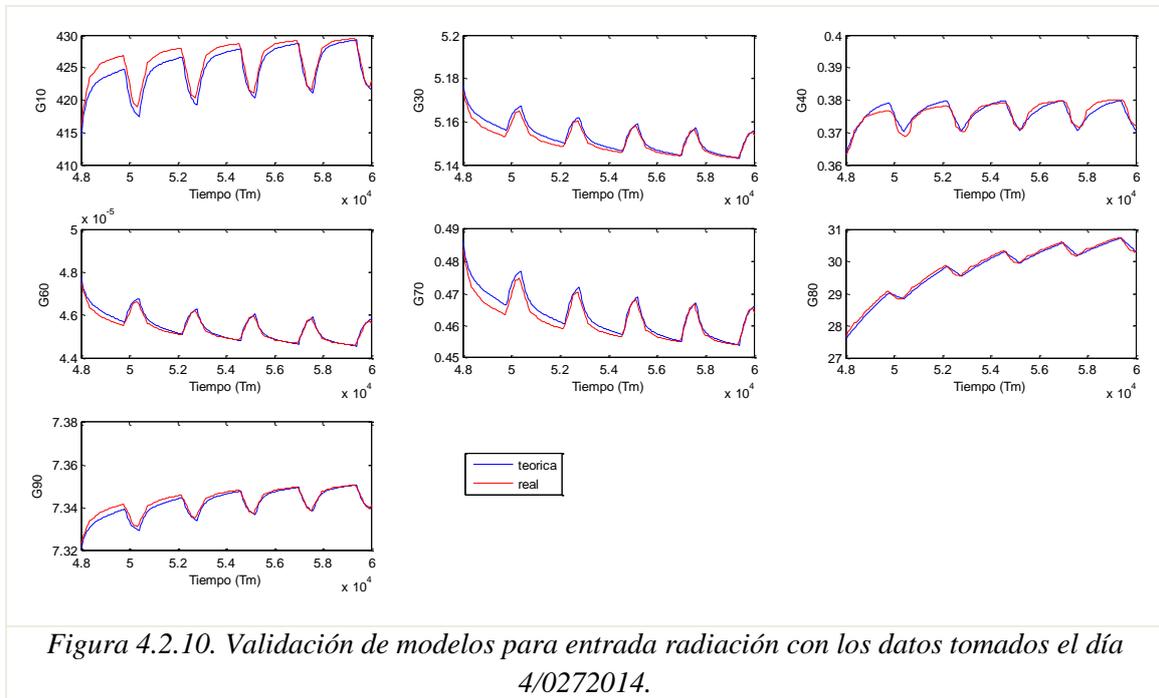


Figura 4.2.10. Validación de modelos para entrada radiación con los datos tomados el día 4/02/2014.

Los constantes cambios en la radiación solar hacen que esta franja horaria sea más compleja de modelar, por lo general los resultados son algo peores que los de la noche.

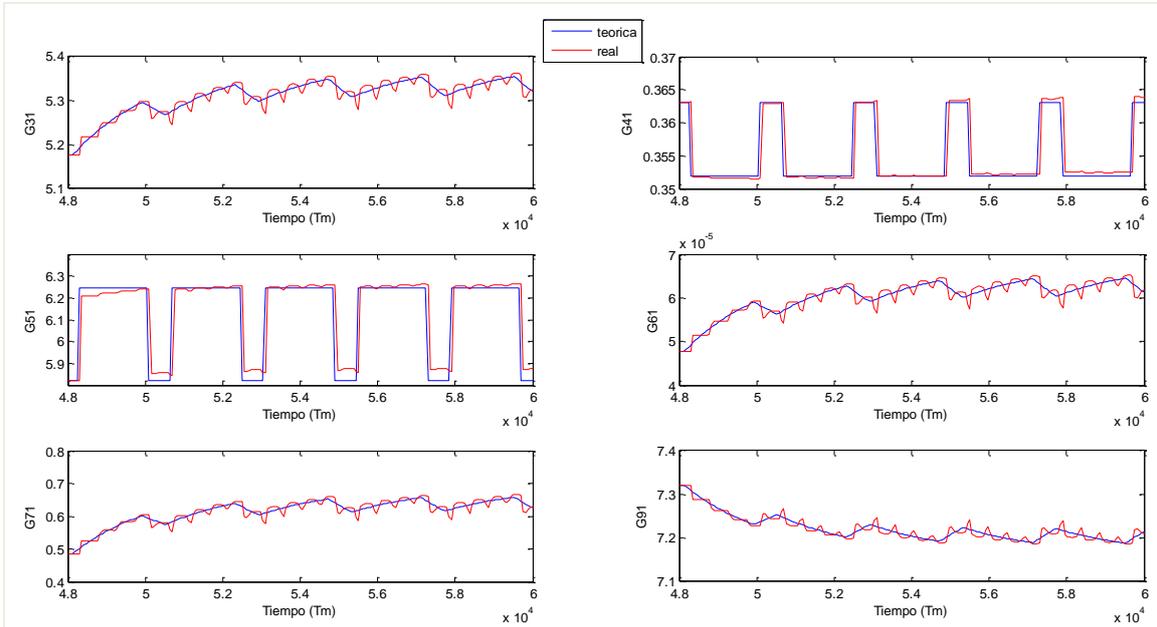


Figura 4.2.11. Validación de modelos para entrada caudal de  $CO_2$  con los datos tomados el día 4/02/2014.

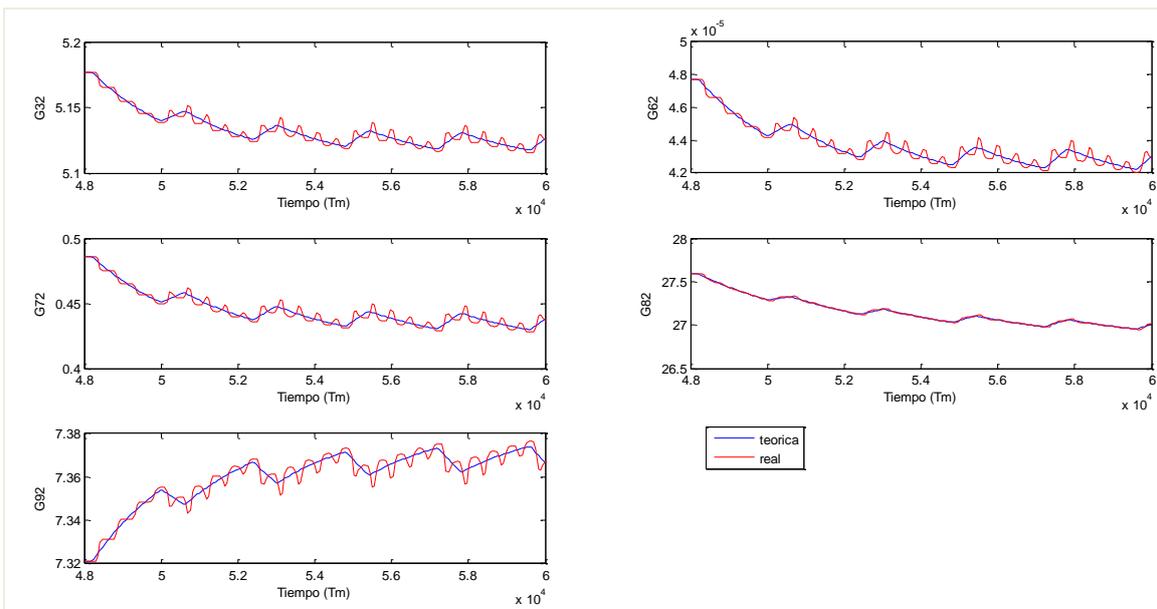


Figura 4.2.12. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 4/02/2014.

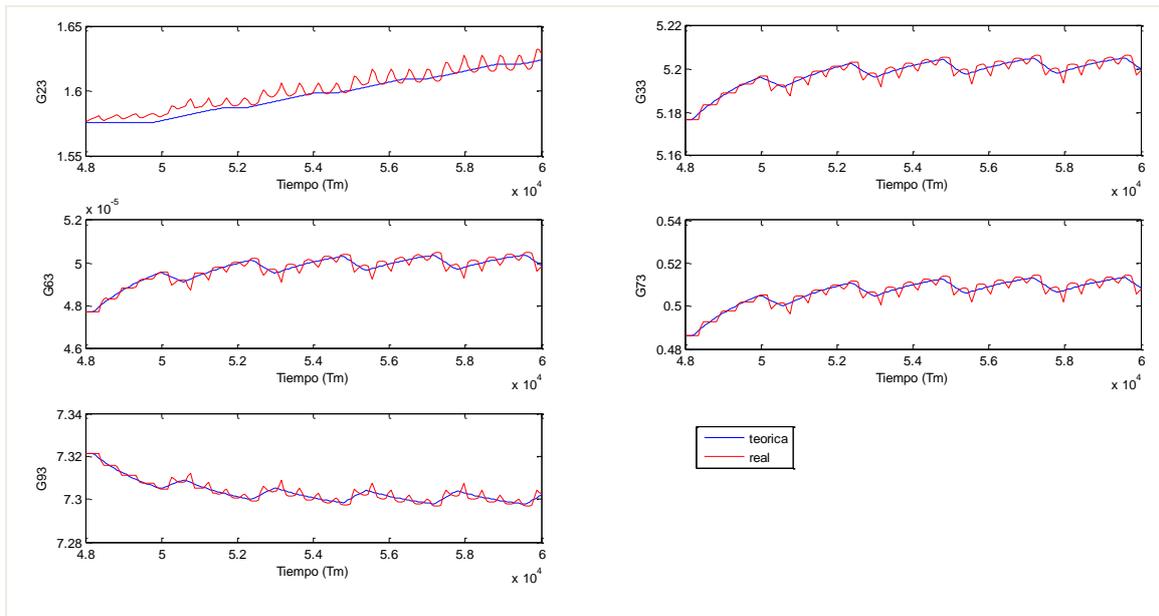


Figura 4.2.13. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 4/02/2014.

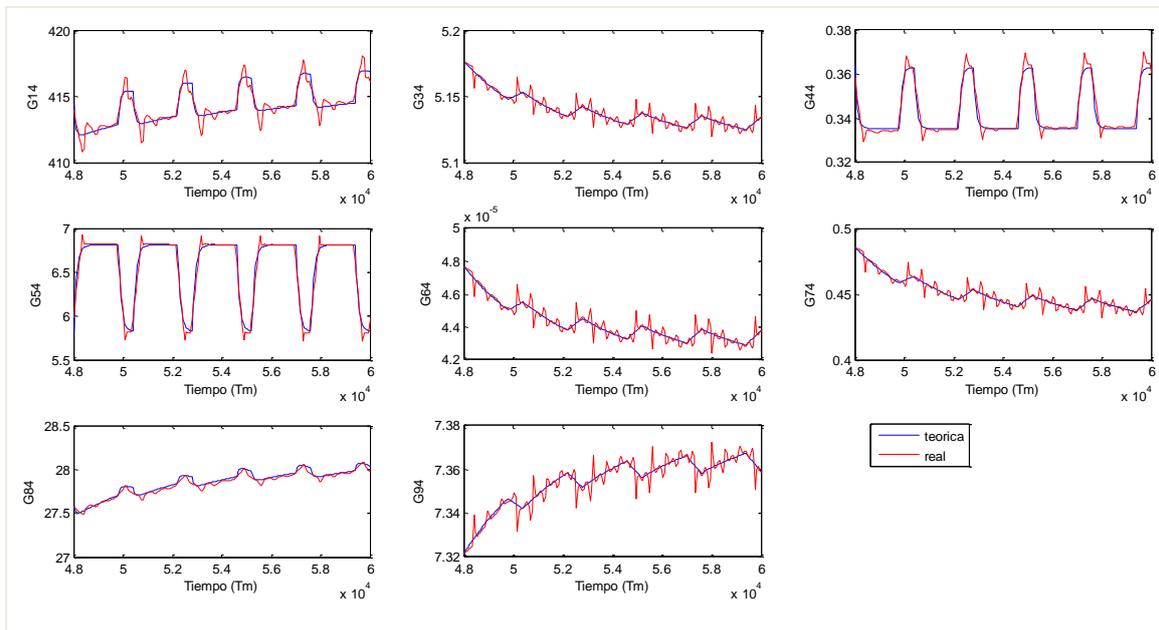


Figura 4.2.14. Validación de modelos para entrada velocidad con los datos tomados el día 4/02/2014.

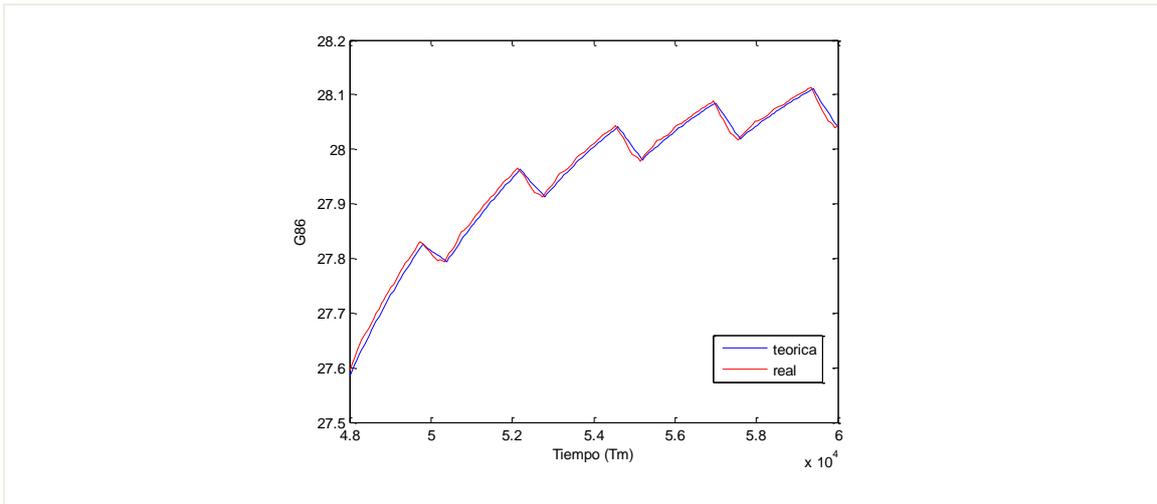


Figura 4.2.15. Validación de modelos para entrada temperatura ambiente con los datos del día 4/02/2014.

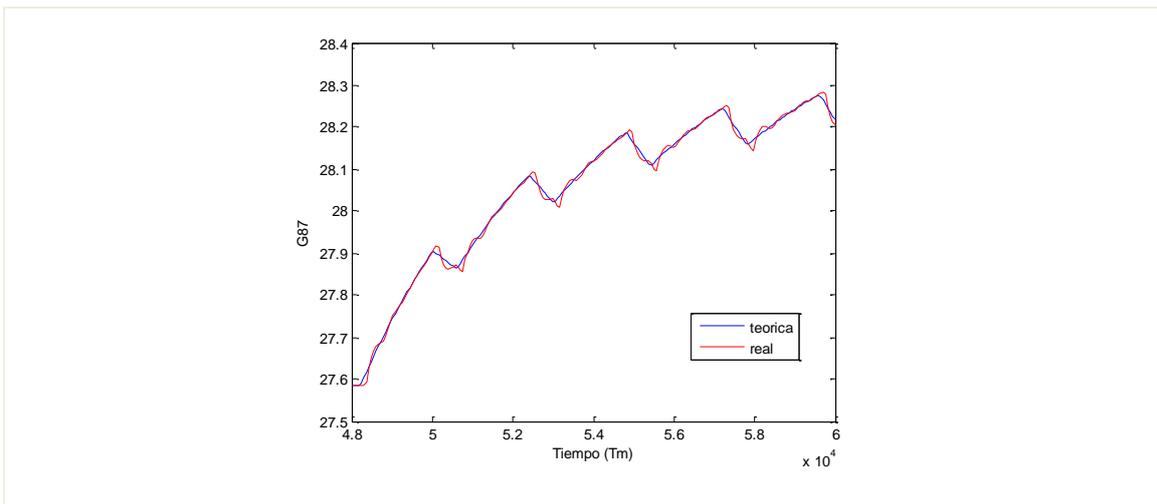


Figura 4.2.16. Validación de modelos para entrada temp. en intercambiador con los datos del día 4/02/2014.

❖ Para el día 7/02/2014:

Observando las siguientes imágenes (ver figuras 4.2.17 a 4.2.23) se llega a las mismas conclusiones que para el día 4.

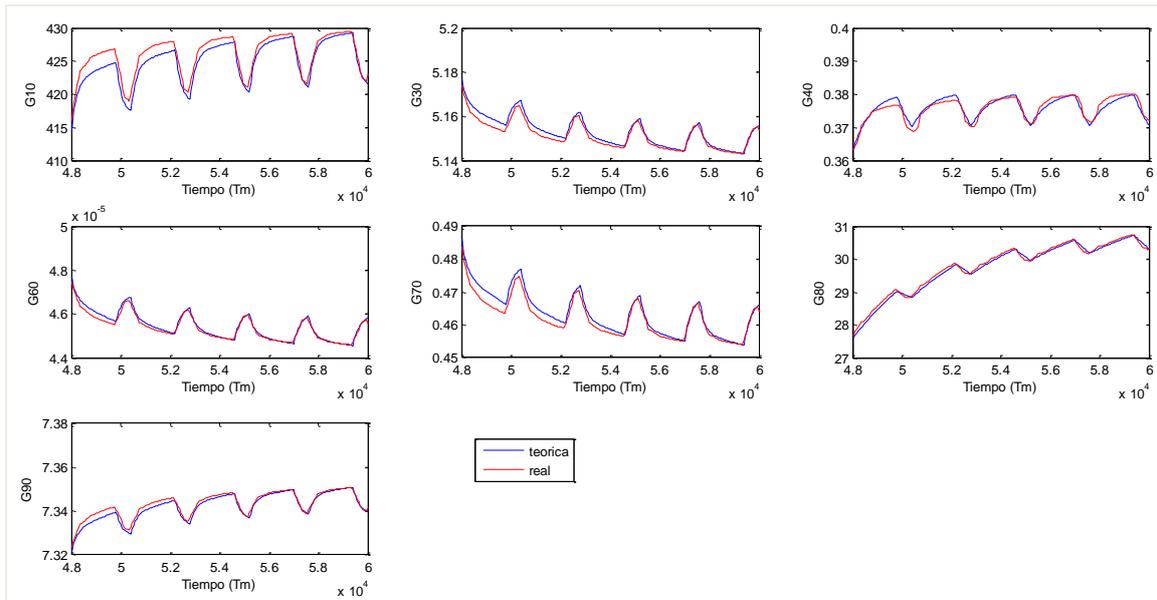


Figura 4.2.17. Validación de modelos para entrada radiación con los datos tomados el día 7/02/2014.

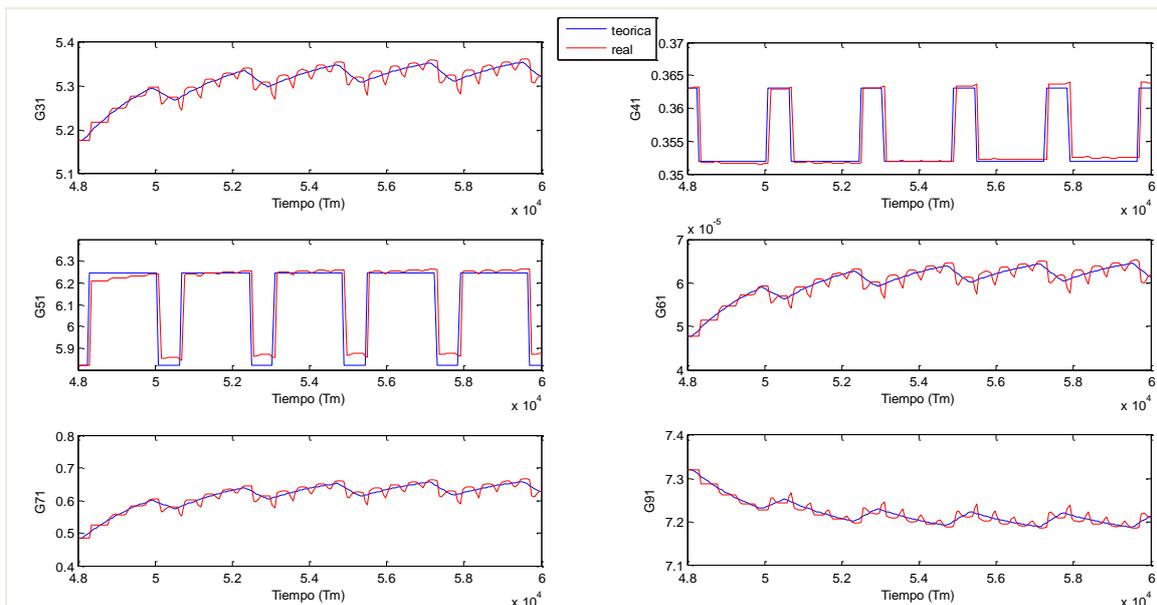


Figura 4.2.18. Validación de modelos para entrada caudal de  $\text{CO}_2$  con los datos tomados el día 7/02/2014.

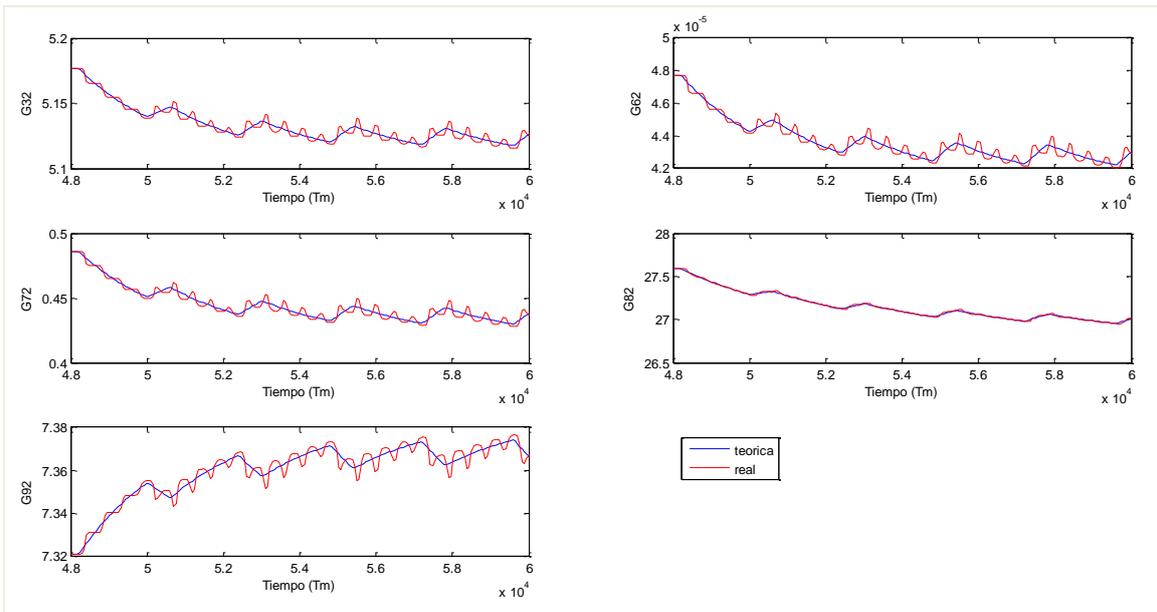


Figura 4.2.19. Validación de modelos para entrada caudal de aire con los datos tomados el día 7/02/2014.

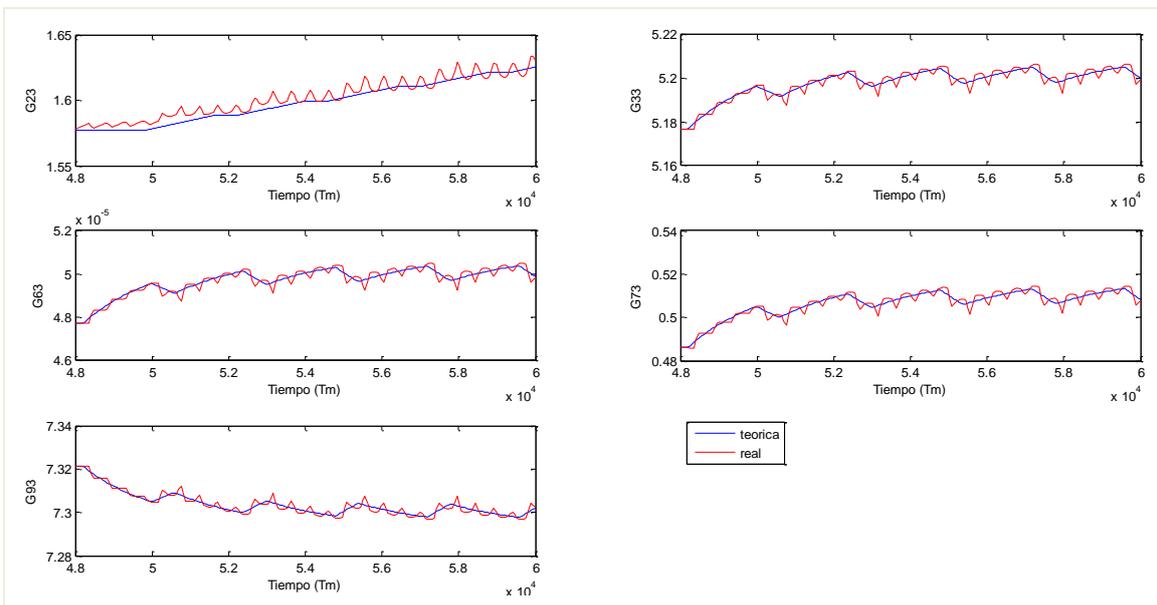


Figura 4.2.20. Validación de modelos para entrada caudal de medio con los datos tomados el día 7/02/2014.

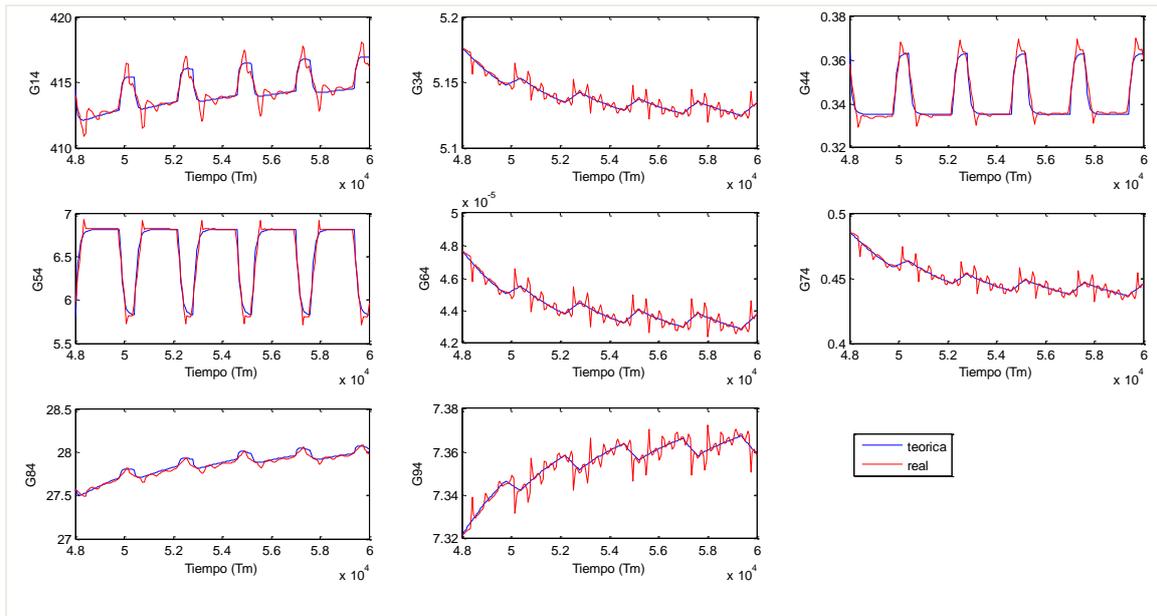


Figura 4.2.21. Validación de modelos para entrada velocidad con los datos del día 7/02/2014.

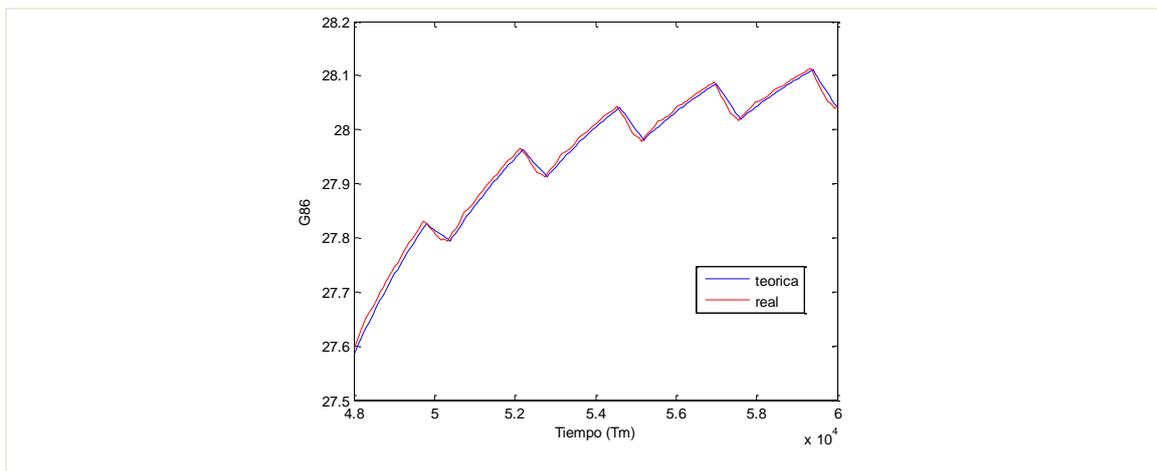


Figura 4.2.22. Validación de modelos para entrada temperatura ambiente con los datos del día 7/02/2014.

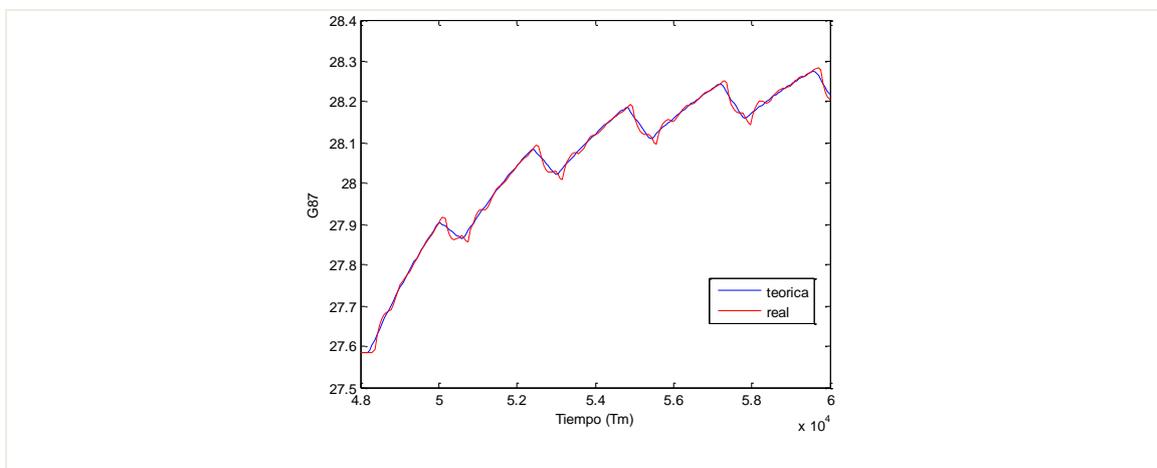
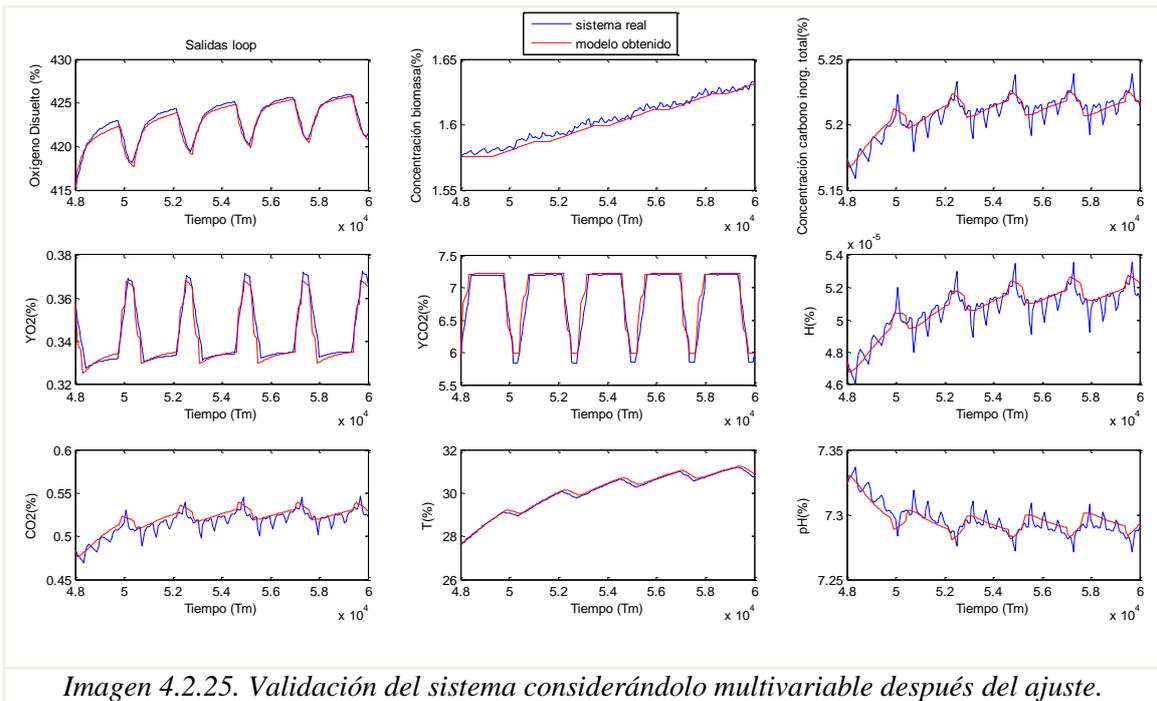
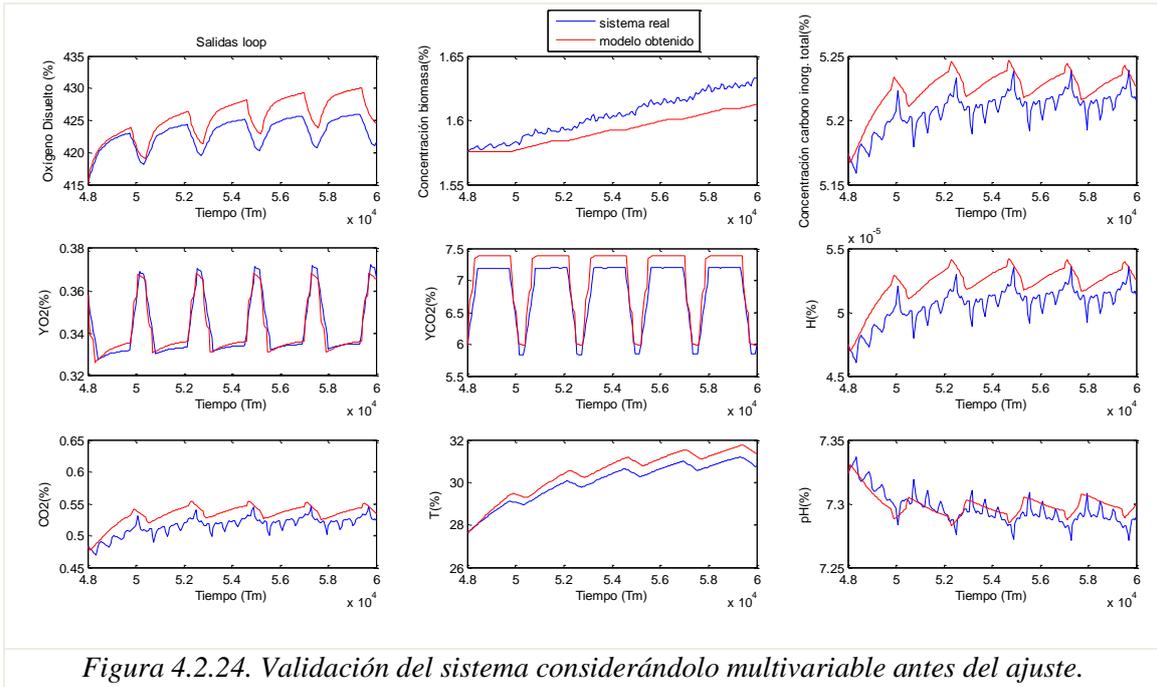


Figura 4.2.23. Validación de modelos para entrada temp. intercambiador con los datos tomados el día 7/02/2014.

Para mayor precisión en el control, se ha realizado una validación conjunta de todas las variables, se ha construido un esquema en simulación y se han reajustado los modelos. Se ha calibrado el sistema haciendo pequeños cambios en las ganancias y en algunas constantes de tiempo, estos cambios no han sido demasiado grandes, se ha intentado no perjudicar las validaciones individuales anteriormente hechas. Los resultados son los siguientes (ver figuras 4.2.24 y 4.2.25):



La mejora es indiscutible, el sistema real opera con variaciones en más de una entrada a la vez por lo que los cambios realizados en los parámetros supondrán una mejoría en todos los aspectos. Los nuevos parámetros se recogen en la tabla 4.16.

$G_{ij}$	$k[*^1]$	$\tau_1[s]$	$\tau_2[s]$	$t_r[s]$	$\beta[s]$
$G_{31}$	0.32836	2567.55	-	127.37	-
$G_{41}$	-0.018947	-	-	300	-
$G_{51}$	0.469805	-	-	350	-
$G_{61}$	$3.25 \cdot 10^{-5}$	2769.75	-	127.07	-
$G_{71}$	0.32778	2469.45	-	127.07	-
$G_{91}$	-0.27384	2337.9	-	132.48	-
$G_{32}$	-0.0052717	2442.6	-	216.145	-
$G_{62}$	$-4.8512 \cdot 10^{-7}$	2440.55	-	216.33	-
$G_{72}$	$-5.003 \cdot 10^{-3}$	2441.4	-	216.315	-
$G_{82}$	-0.05799	4538.1	-	190.51	-
$G_{92}$	0.004472	2472.35	-	214.945	-
$G_{23}$	$7.811 \cdot 10^{-6}$	46043.5	Integrador[* <sup>2</sup> ]	1300	38599.5
$G_{33}$	0.034278	2041.1	-	209.48	-
$G_{63}$	$3.208 \cdot 10^{-6}$	2240	-	209.445	-
$G_{73}$	0.0311915	2438.35	-	209.46	-
$G_{93}$	-0.029055	2033.05	-	209.95	-
$G_{14}$	9.075	6021.15	-	79.5262	-12143.5
$G_{34}$	-0.689905	3029.25	-	-	-
$G_{44}$	-0.300795	90.269	-	26.72	-
$G_{54}$	10.0	90.61	-	21.8665	-
$G_{64}$	$-6.428 \cdot 10^{-5}$	2627.5	-	-	-
$G_{74}$	-0.64825	3026.65	-	-	-
$G_{84}$	5.5765	5436.65	85.1525	-	-804.645
$G_{94}$	0.59564	3090.2	-	-	-
$G_{86}$	0.288155	4564.55	-	-	-
$G_{87}$	0.685502	4596.2	-	225.66	-
$G_{10}$	0.06009	4582.9	209.01	8.5498	2544.65
$G_{30}$	-0.0002054	4527.85	197.225	4.627	1293.65
$G_{40}$	$8.80765 \cdot 10^{-5}$	736.84	-	13.954	-
$G_{60}$	$-2.0053 \cdot 10^{-8}$	3488.8	201.93	-	1147.25
$G_{70}$	$-2.0096 \cdot 10^{-4}$	4029.9	196.93	4.5606	1286.3
$G_{80}$	0.018	4407.8	-	-	-
$G_{90}$	$1.9314 \cdot 10^{-4}$	4532	199.32	4.3928	1316.35

Tabla 4.16. Parámetros para el modelo del sistema considerándolo multivariable.

[\*<sup>1</sup>] Las unidades de la ganancia  $k$  serán diferentes para cada función. Serán equivalentes al cociente de las unidades de cada salida dividido entre las de cada entrada.

[\*<sup>2</sup>] La función  $G_{23}$  tiene un polo en el origen o integrador, quedando su función de transferencia definida por la ecuación 4.7.

### 4.3. Modelado teniendo en cuenta la recirculación

#### 4.3.1. Modelado del comportamiento nocturno del sistema

Para recoger el comportamiento oscilatorio del agua ha sido necesario añadir funciones de segundo orden y polos complejos conjugados de manera que quedan definidos de la siguiente manera:

$$G_{ij} = \frac{k}{(1+\tau \cdot s)} \cdot \frac{(\beta \cdot s + 1)}{(T_w^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \delta \cdot T_w \cdot s + 1)} \cdot e^{-t_r \cdot s} \quad (4.8)$$

Se han obtenido modelos de mayor orden y complejidad pero que recogen el comportamiento real más fielmente.

$G_{ij}$	$k$ [* <sup>1</sup> ]	$\tau$ [s]	$t_r$ [s]	$\beta$ [s]	$T_w = 1/\omega_n$ [s]	$\delta$
$G_{11}$	-0.6966	1353.35	-	-109.27	77.93	0.0374
$G_{31}$	0.40537	2353.4	-	-	78.018	0.003888
$G_{41}$	-0.0128	1638.65	327.055	1539.9	-	-
$G_{51}$	2.0234	2625.7	322.67	2421.65	-	-
$G_{61}$	$3.8313 \cdot 10^{-5}$	2378	185.81	114.38	76.3805	0.034672
$G_{71}$	0.39261	2373.05	185.805	114.375	76.3805	0.03467
$G_{91}$	-0.2849	2371.5	173.425	88.71	76.497	0.033754
$G_{12}$	0.08746	2066.6	144.63	-	76.646	0.02643
$G_{32}$	-0.00251	2324.1	152.665	-	76.453	0.02129
$G_{62}$	$-2.352 \cdot 10^{-7}$	2408.9	-	-147.5	79.4095	0.03201
$G_{72}$	-0.0024015	2323.75	152.69	-	76.4525	0.021434
$G_{92}$	0.0020793	2324.95	152.515	-	76.458	0.02078
$G_{13}$	6.3706	44869.5	169.21	-	76.8275	0.003728
$G_{23}$	-1.3924	$1.8936 \cdot 10^5$	176.61	-	76.8635	0.003134
$G_{33}$	0.035598	1770	186.825	-	76.2705	0.025461
$G_{63}$	$3.335 \cdot 10^{-6}$	1768.45	186.815	-	76.2705	0.025414
$G_{73}$	0.034197	1773.65	186.815	-	76.2705	0.025423
$G_{93}$	-0.02809	1775.55	186.98	-	76.26	0.0258
$G_{14}$	9.599	54045.5	-	9147.25	88.0195	0.04993
$G_{34}$	-0.18974	3223.6	100.171	423.095	85.311	0.0247
$G_{44}$	-0.07966	-	-	68.163	124.78	0.77325
$G_{54}$	12.456	-	-	55.199	114.69	0.769

$G_{ij}$	$k [^*1]$	$\tau [s]$	$t_r [s]$	$\beta [s]$	$T_w = 1/\omega_n [s]$	$\delta$
$G_{64}$	$-1.752 \cdot 10^{-5}$	2811.3	-	233.14	42.33	0.02356
$G_{74}$	-0.17941	2813.15	-	233.315	42.335	0.02355
$G_{94}$	0.1555	3230.2	100.269	426.585	85.3345	0.02468
$G_{86}$	0.29403	4355.5	-	-	92.2965	0.001
$G_{87}$	0.715235	44274.35	-	-	152.255	0.53225

Tabla 4.17. Parámetros de los modelos con recirculación durante la noche.

Repetiremos los mismos pasos que en el anterior apartado para las validaciones. En rojo se muestran las respuestas del simulador del fotobiorreactor y en azul los modelos obtenidos utilizando las herramientas de *MATLAB*.

❖ Día 4/02/2014. Antes de la salida del sol:

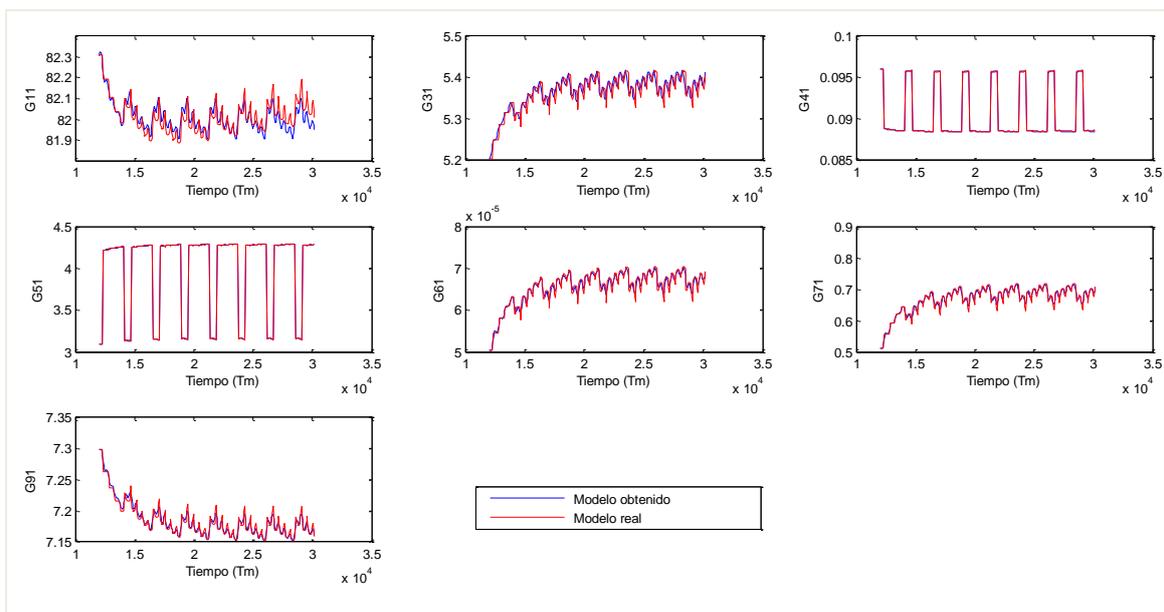


Figura 4.3.1.1. Validación de modelos para la entrada caudal de  $CO_2$  el día 4/02/2014.

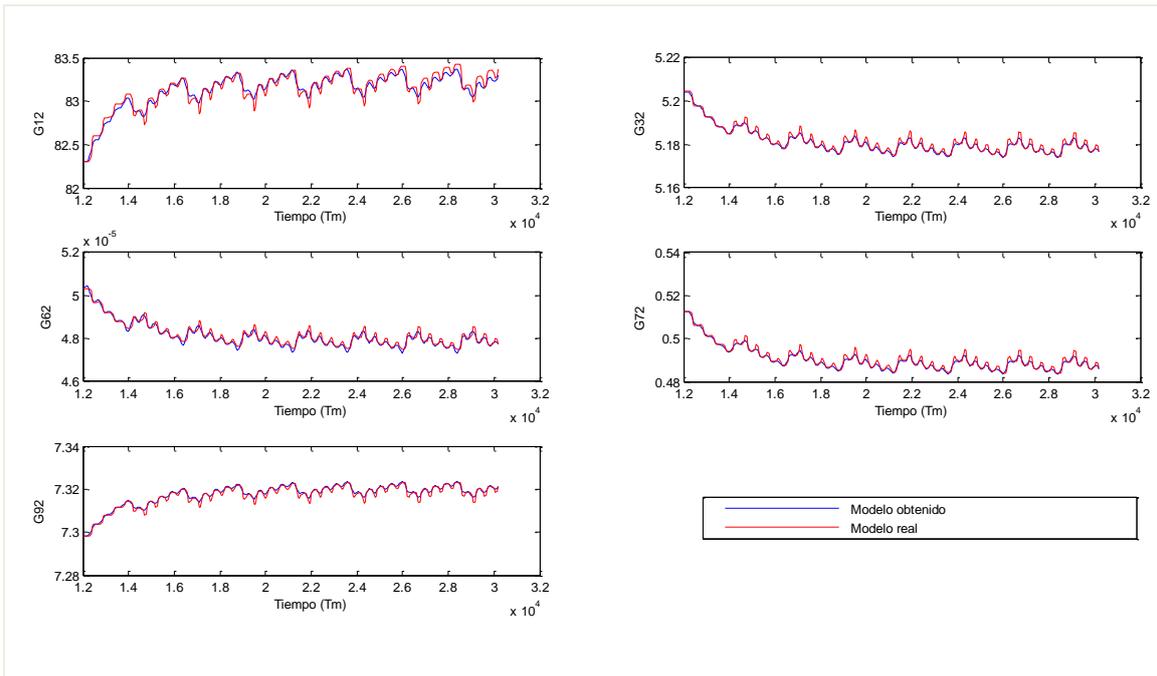


Figura 4.3.1.2. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 4/02/2014.

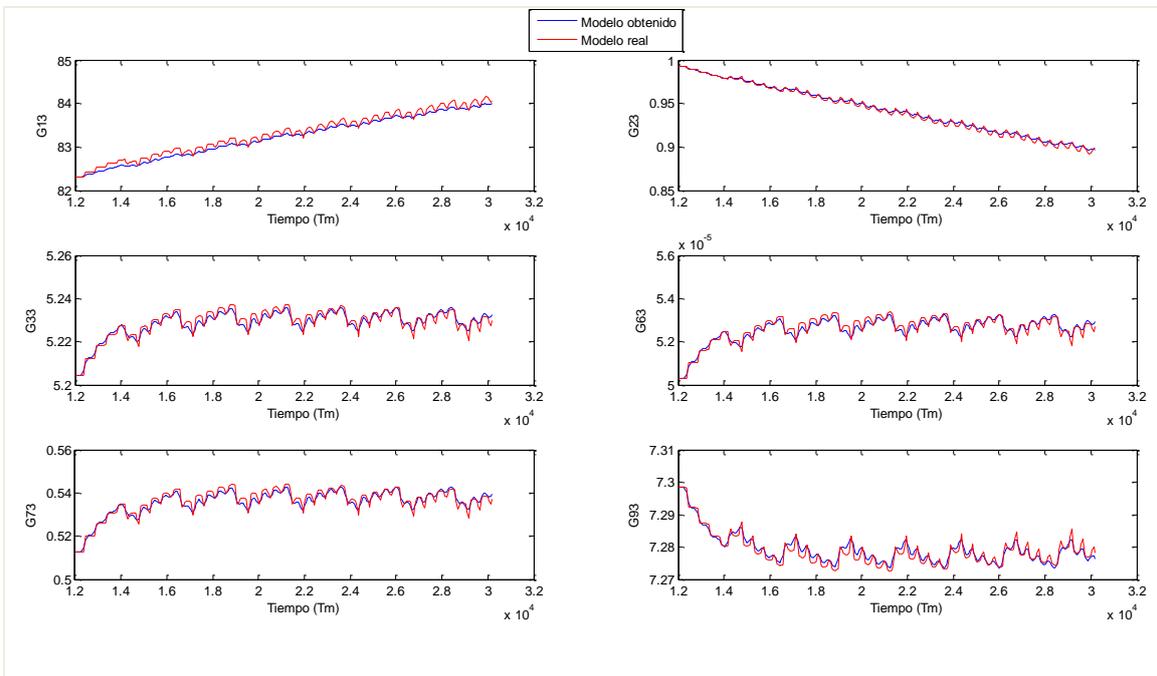


Figura 4.3.1.3. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 4/02/2014.

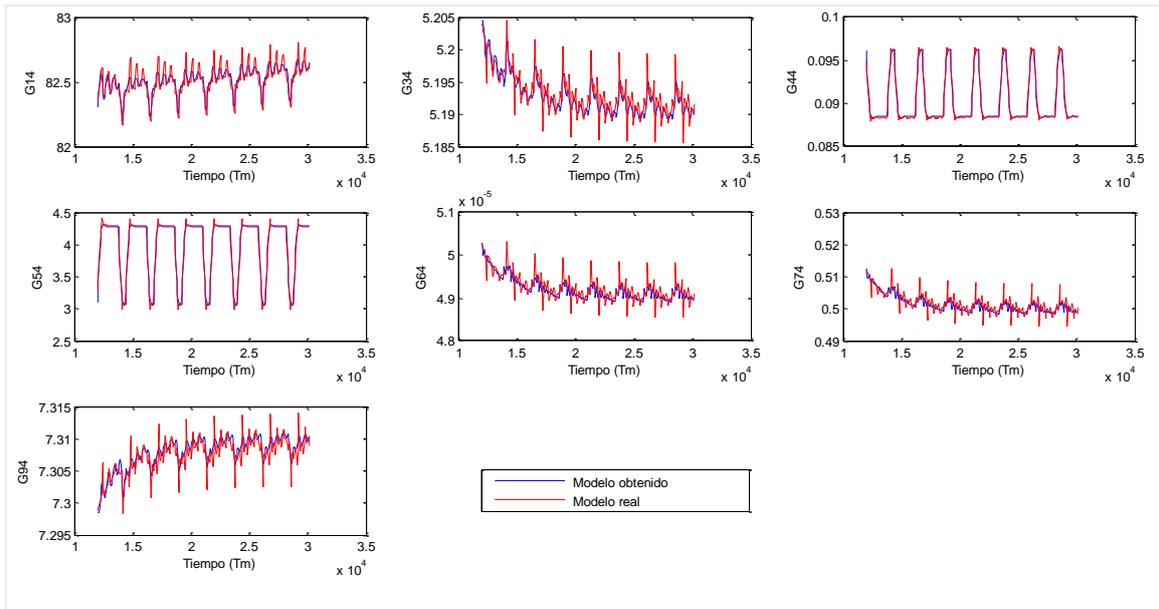


Figura 4.3.1.4. Validación de modelos para la entrada velocidad el día 4/02/2014.

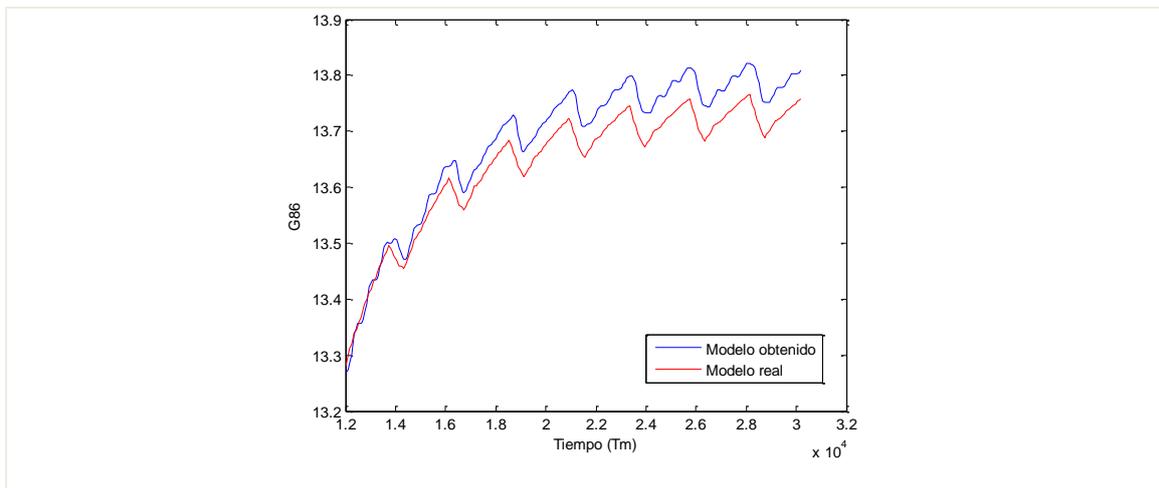


Figura 4.3.1.5. Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 4.

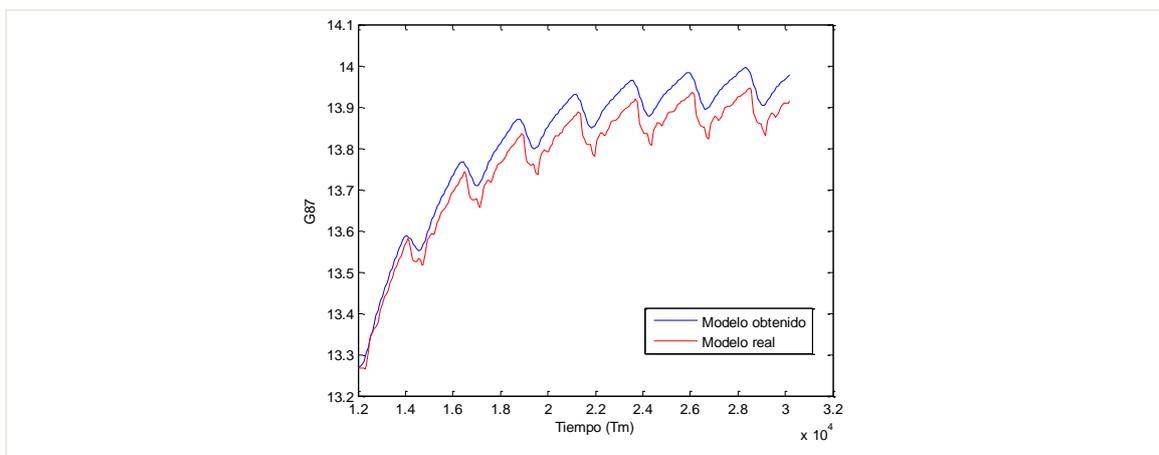


Figura 4.3.1.6. Validación de modelos para la entrada temperatura agua del intercambiador el día 4.

Las validaciones en esta caso tanto para el amanecer (ver figuras 4.3.1.1 a 4.3.1.6) como para el atardecer (ver figuras 4.3.1.7 a 4.3.1.12) son similares a las anteriores, el comportamiento principal del modelo no lineal (denominado ‘Modelo real’ en la leyenda de las gráficas) es recogido por el modelo obtenido, pero además se consigue captar las oscilaciones propias de la recirculación del cultivo.

En las figuras 4.3.1.5 y 4.3.1.6 vuelven a aparecer diferencias en las ganancias estáticas. Como ya comentamos estos errores serán subsanados al incluir los modelos en lazos de control, gracias a la realimentación.

❖ Día 4/02/2014. Después de la puesta de sol:

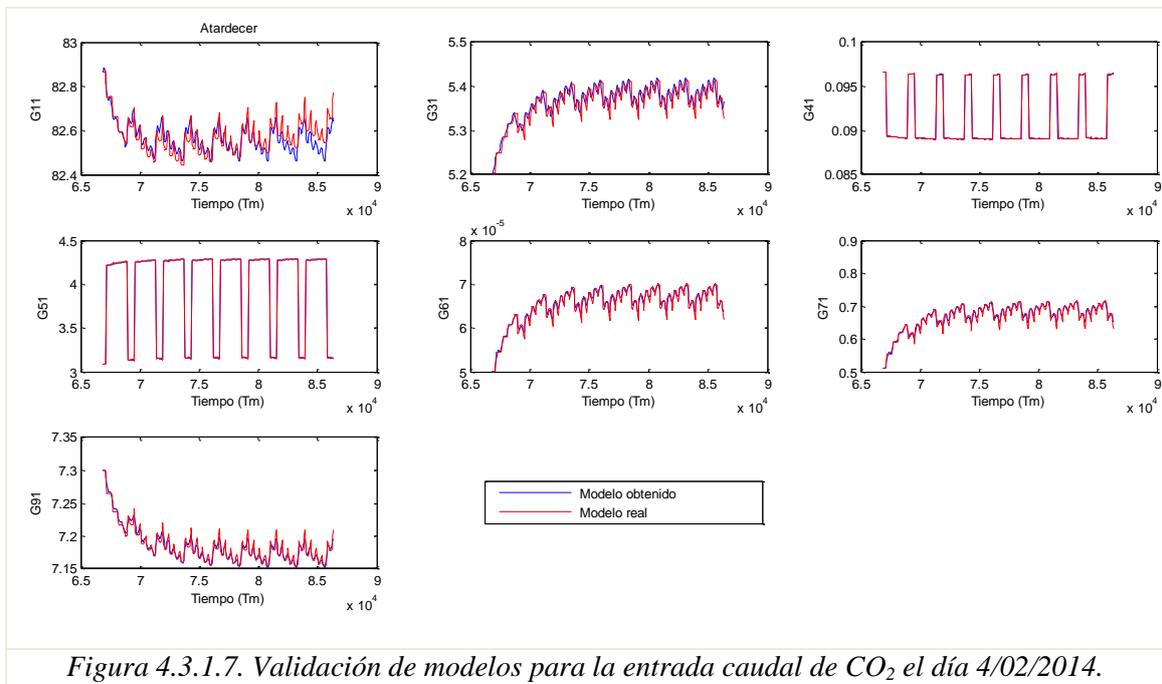


Figura 4.3.1.7. Validación de modelos para la entrada caudal de CO<sub>2</sub> el día 4/02/2014.

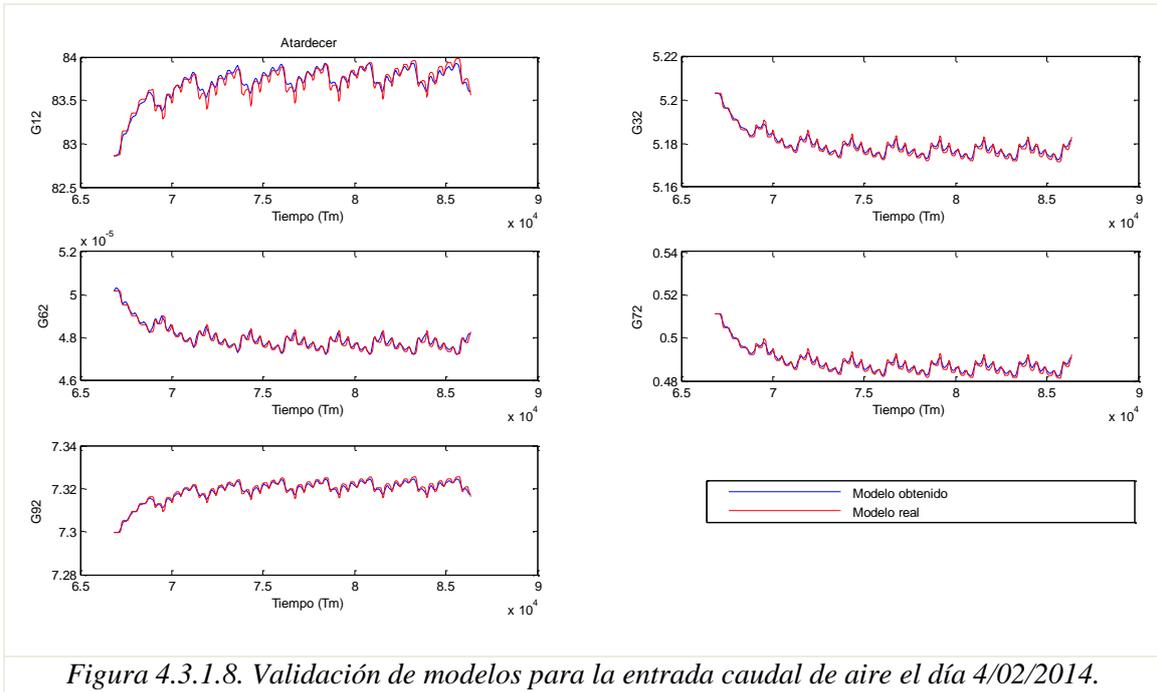


Figura 4.3.1.8. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 4/02/2014.

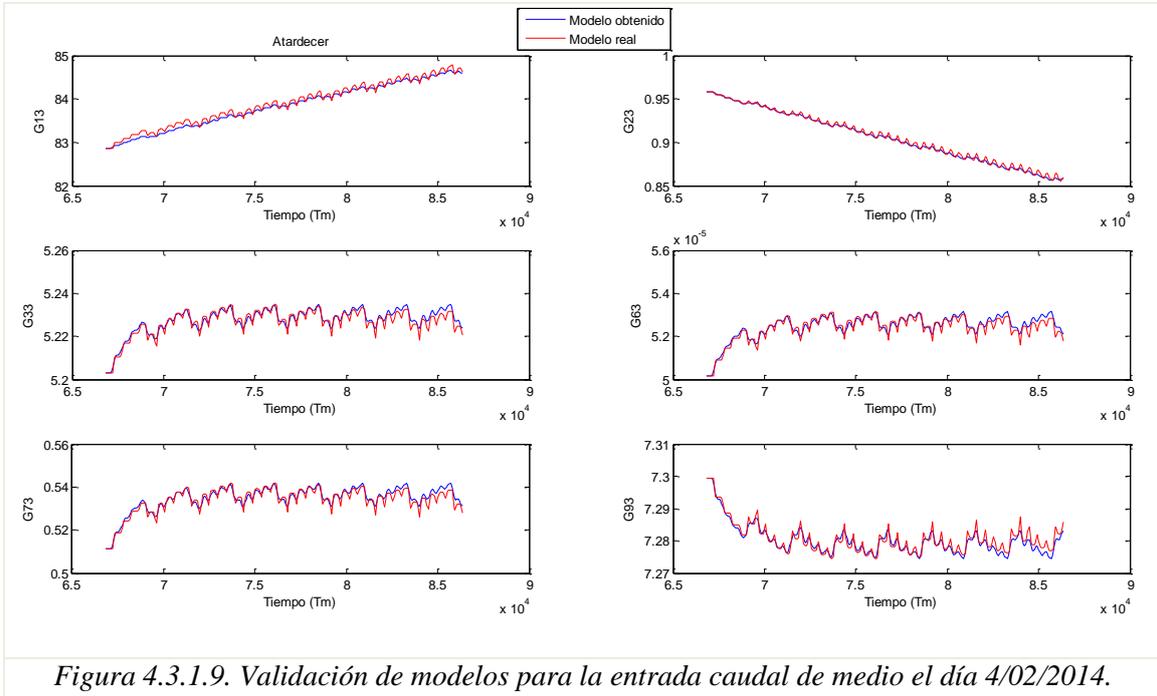


Figura 4.3.1.9. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 4/02/2014.

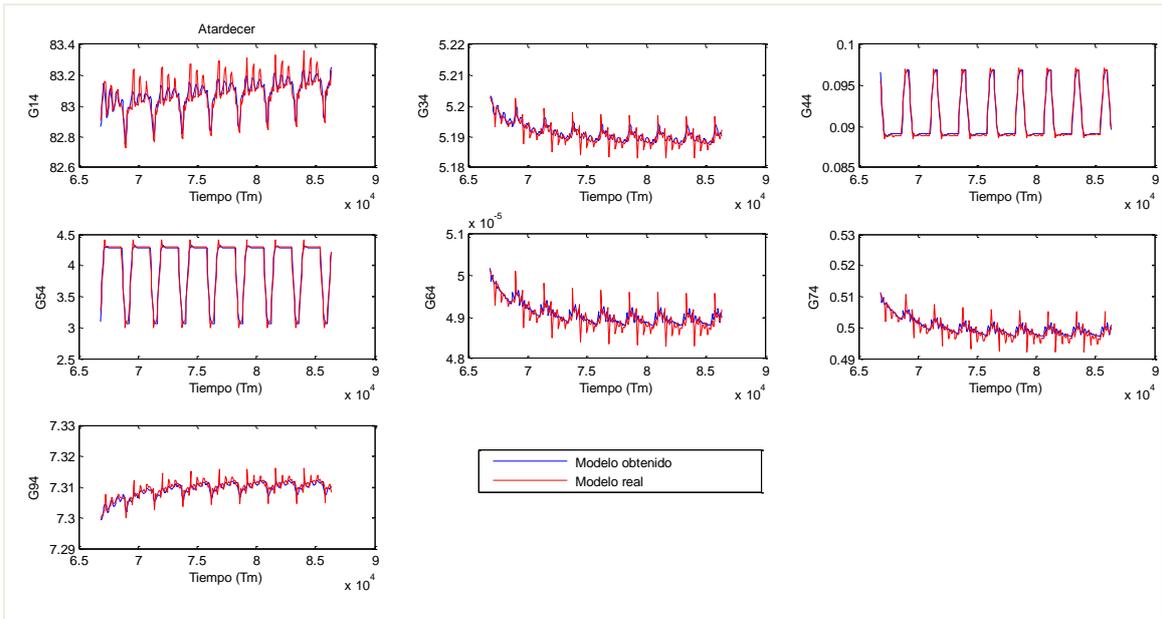


Figura 4.3.1.10. Validación de modelos para la entrada velocidad el día 4/02/2014.

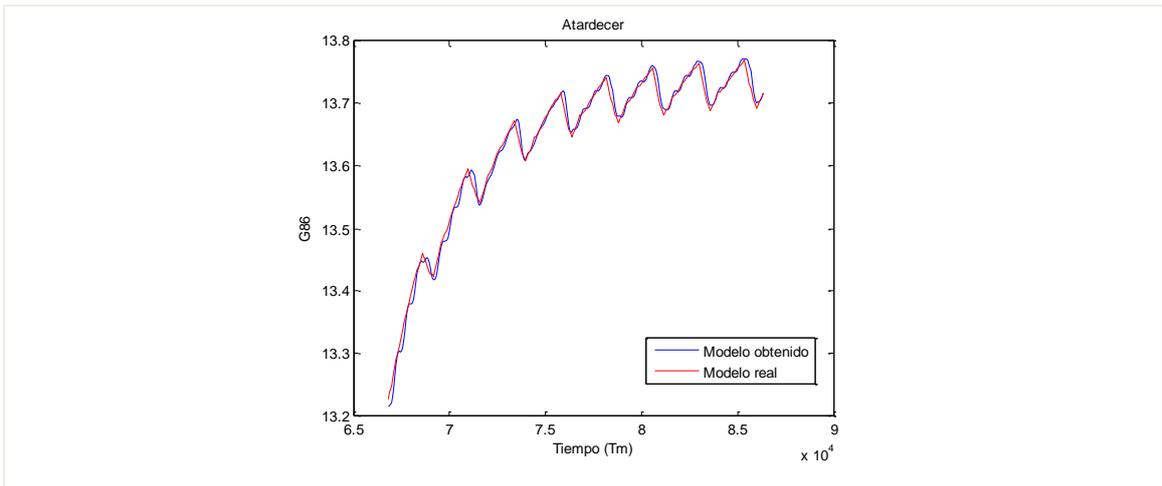


Figura 4.3.1.11. Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 4/02/2014.

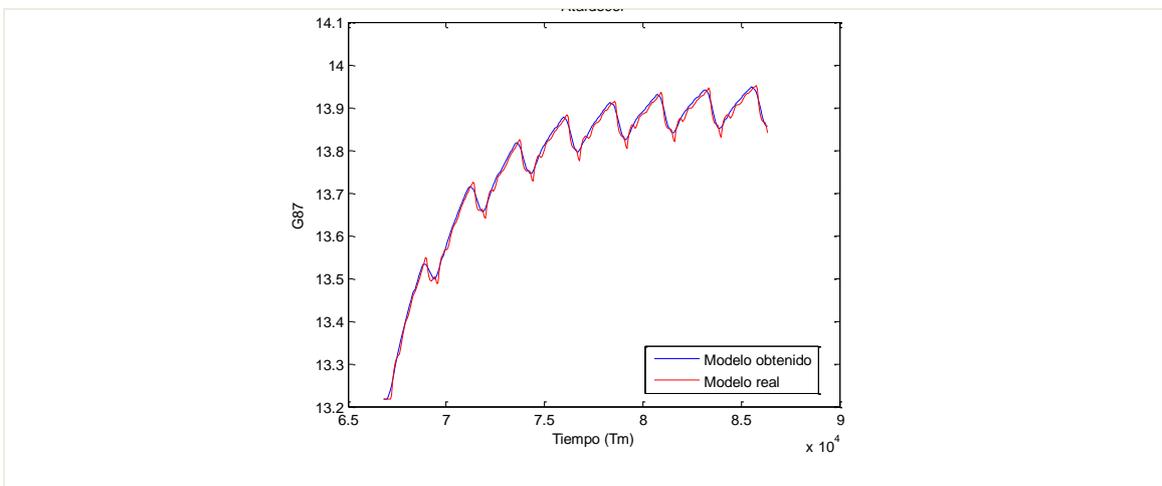


Figura 4.3.1.12. Validación de modelos para la entrada temperatura en el intercambiador el día 4/02/2014.

❖ Día 7/02/2014. Antes de la salida del sol:

Para el día 7 los resultados son prácticamente los mismos, se demuestra la validez del modelo a pesar de pequeñas diferencias que puede haber para algunas variables (ver figuras 4.3.1.13 a 4.3.1.24)

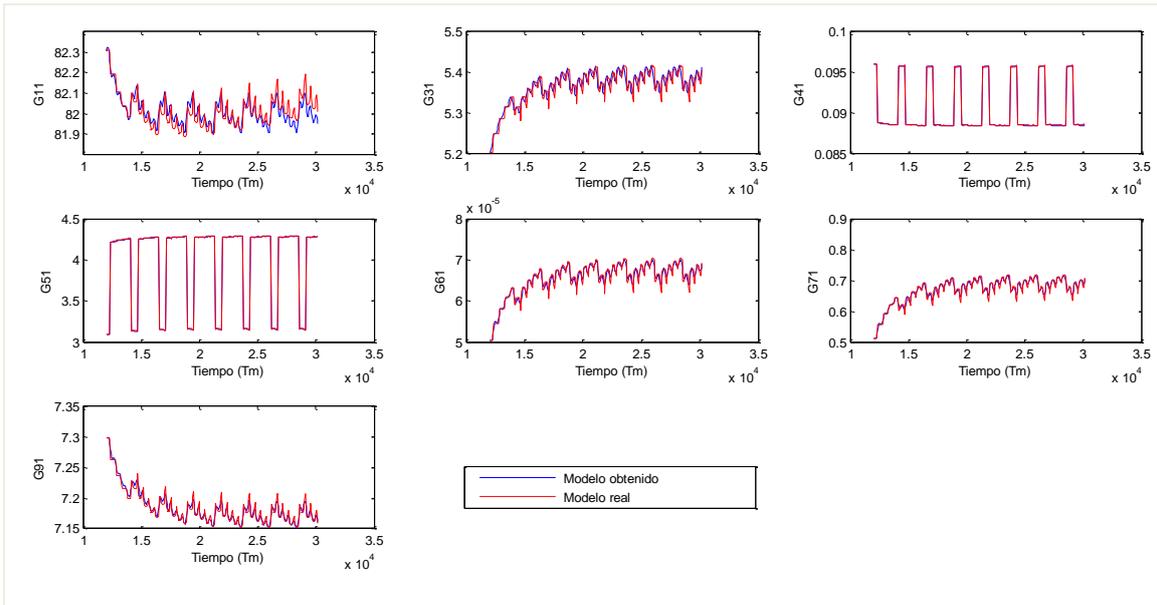


Figura 4.3.1.13. Validación de modelos para la entrada caudal de  $CO_2$  el día 7/02/2014.

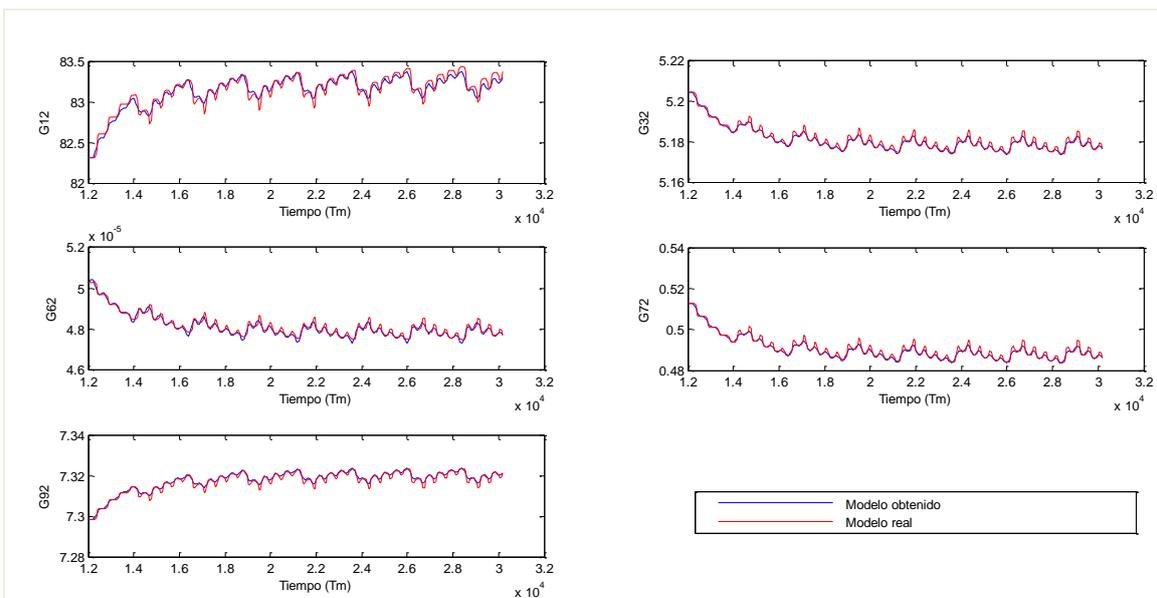


Figura 4.3.1.14. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 7/02/2014.

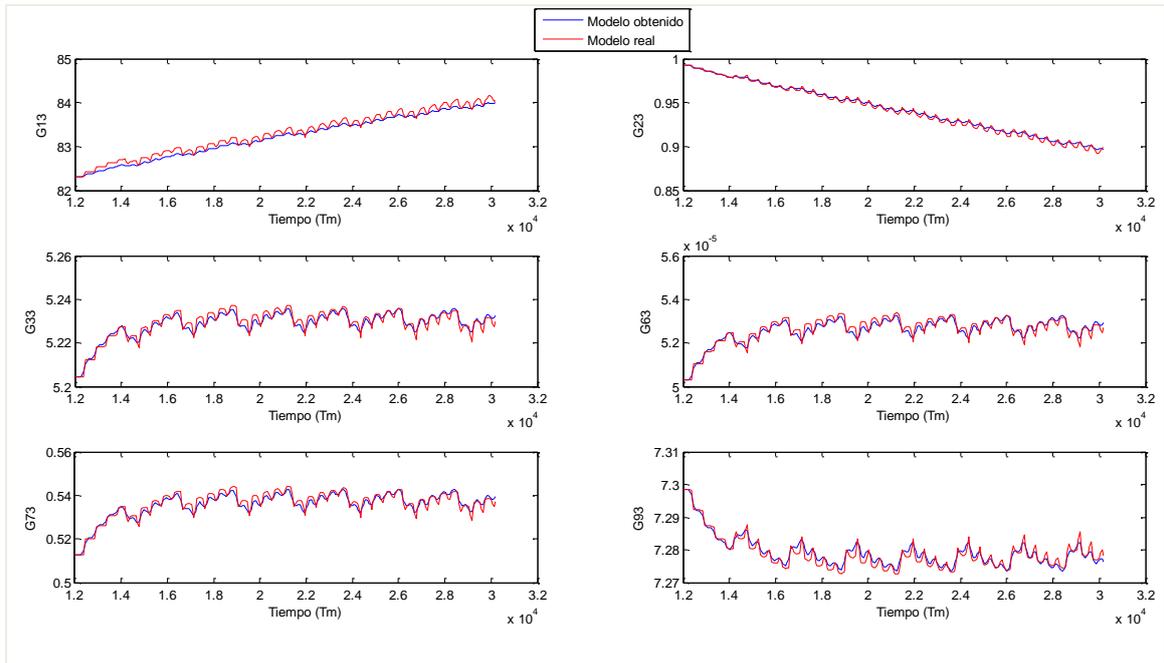


Figura 4.3.1.15. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 7/02/2014.

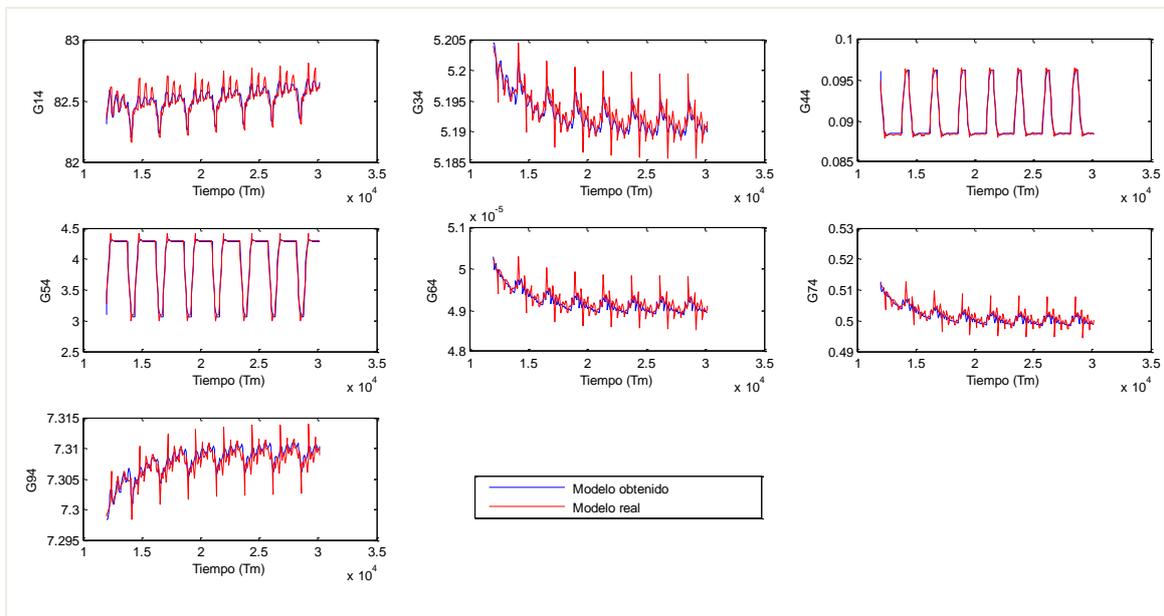


Figura 4.3.1.16. Validación de modelos para la entrada velocidad el día 7/02/2014.

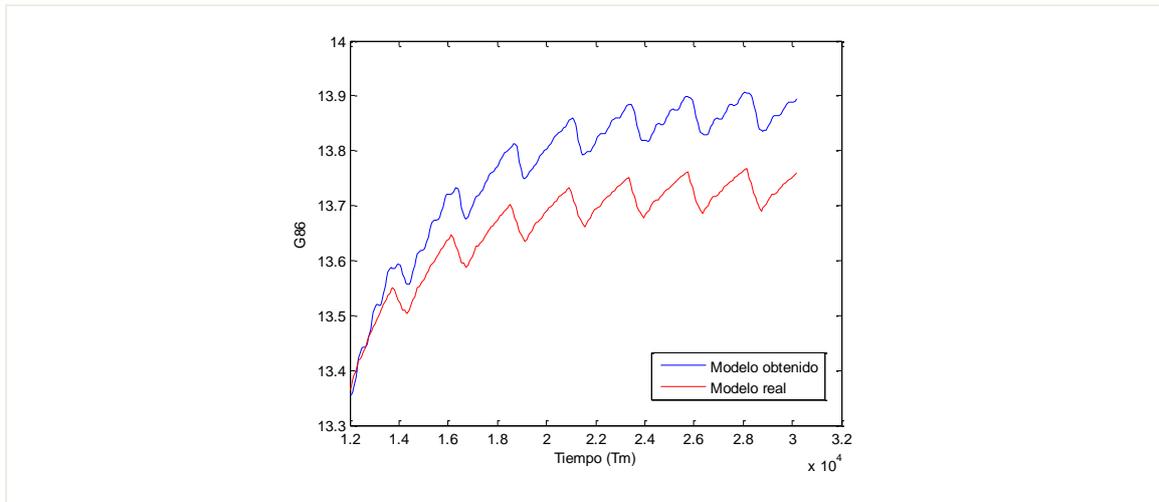


Figura 4.3.1.17. Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 7/02/2014.

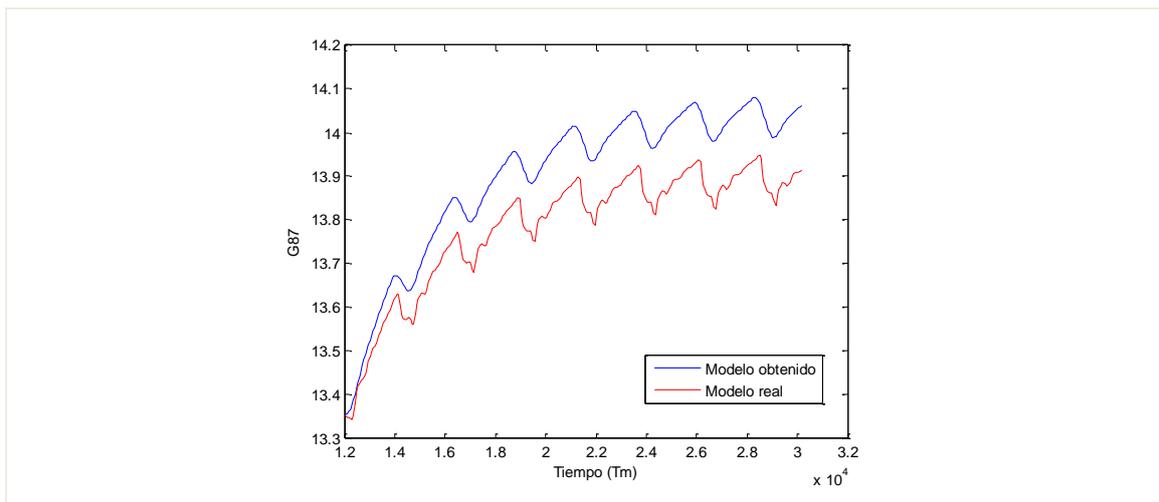


Figura 4.3.1.18. Validación de modelos para la entrada temperatura en el intercambiador el día 7/02/2014.

Las mayores diferencias aparecen para los modelos en los que interviene la temperatura, es la que más diferencias presenta de un día a otro (ver figuras 4.3.1.17 y 4.3.1.18) e incluso del amanecer al atardecer.

❖ Día 7/02/2014 después de la puesta de sol:

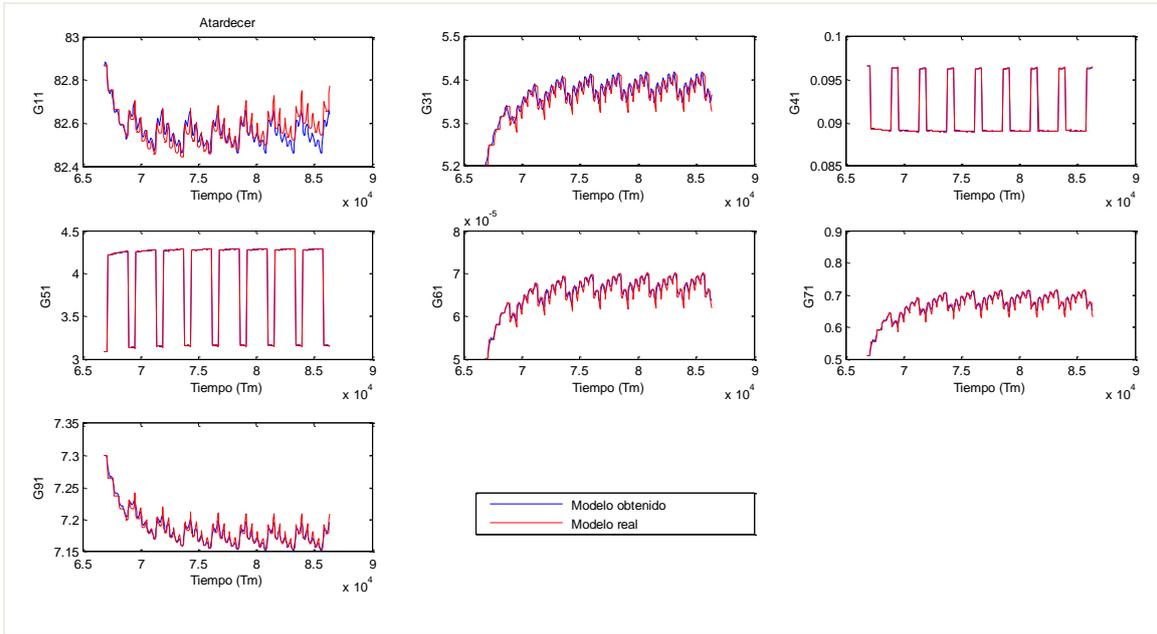


Figura 4.3.1.19. Validación de modelos para la entrada caudal de CO<sub>2</sub> el día 7/02/2014.

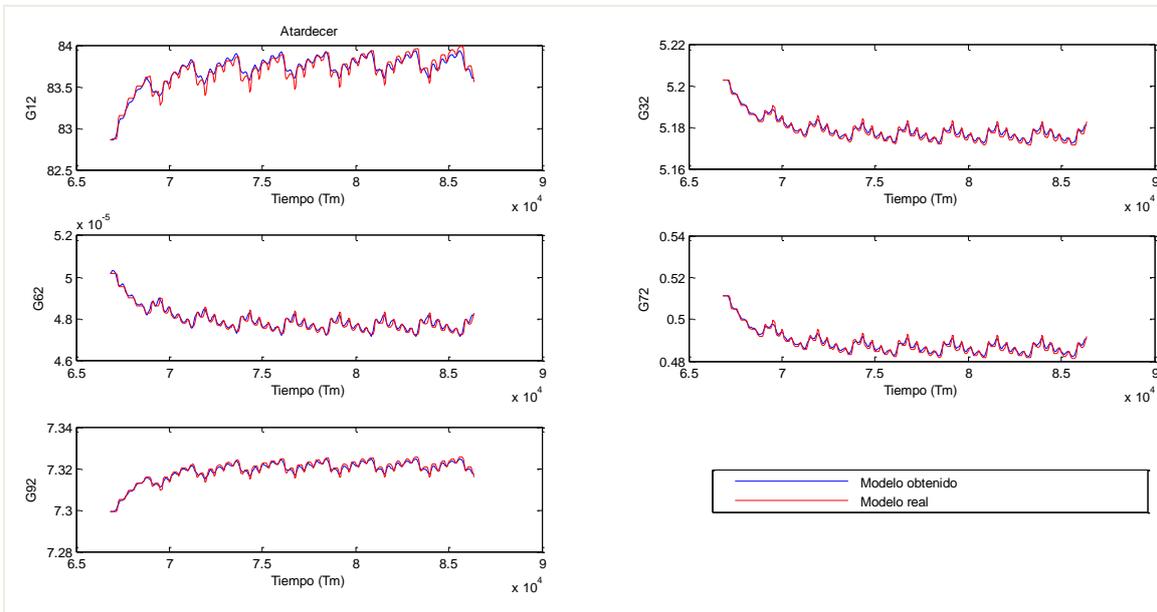


Figura 4.3.1.20. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 7/02/2014.

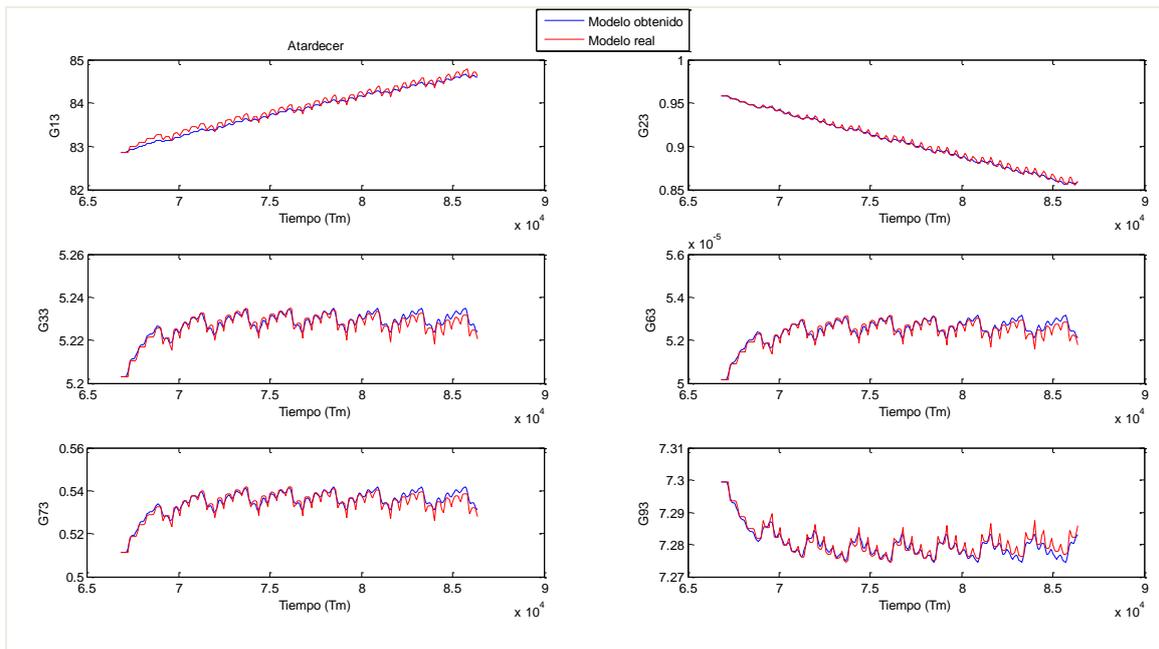


Figura 4.3.1.21. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 7/02/2014.

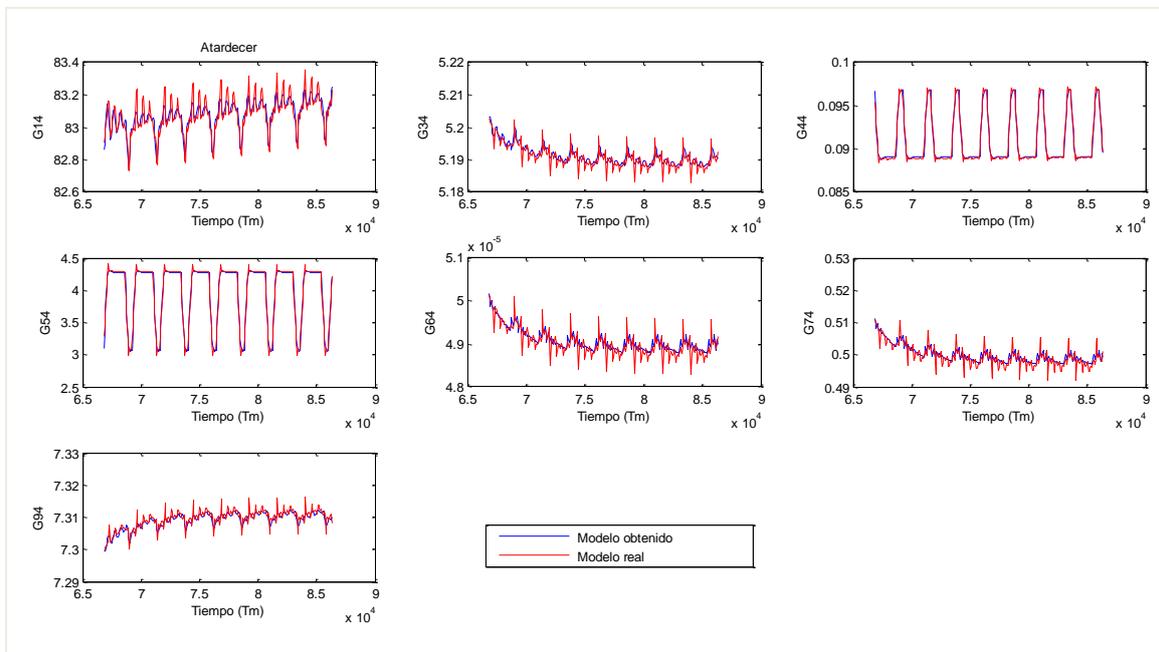


Figura 4.3.1.22. Validación de modelos para la entrada velocidad el día 7/02/2014.

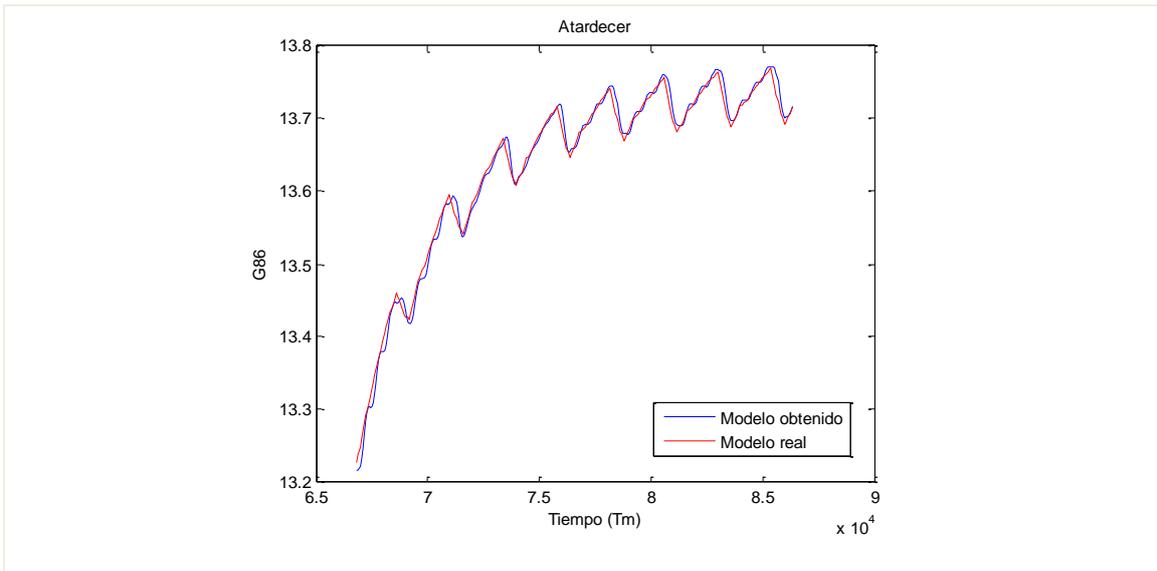


Figura 4.3.1.23. Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 7/02/2014.

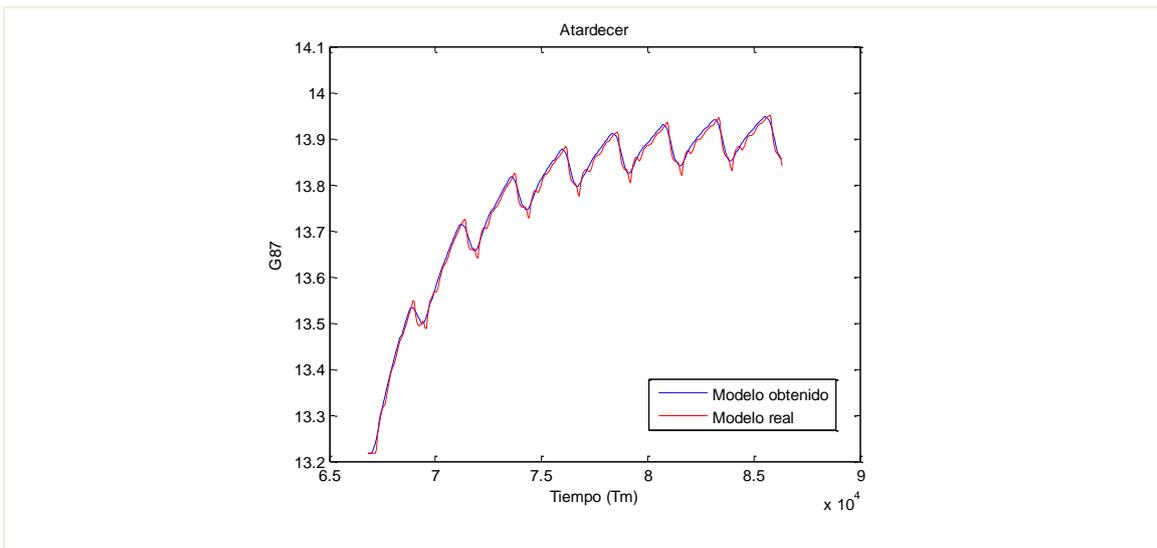


Figura 4.3.1.24. Validación de modelos para la entrada temperatura en el intercambiador el día 7/02/2014.

### 4.3.2. Modelado del comportamiento diurno del sistema

Del mismo modo que para la noche se han obtenido los modelos cuyos parámetros se presentan en la tabla 4.18:

$G_{ij}$	$k[*^{-1}]$	$\tau[s]$	$t_r[s]$	$\beta[s]$	$T_w = 1/\omega_n [s]$	$\delta$
$G_{10}$	0.090844	-	8.58025	2544.9	1108.25	2.7477
$G_{30}$	-0.00020933	4.6744	-	1293.6	944.45	2.5008
$G_{40}$	0.00010072	73.727	72.737	2522.7	1087.5	2.573
$G_{60}$	$-1.9366 \cdot 10^{-8}$	-	-	1250.5	949.28	2.4042
$G_{70}$	-0.00019988	4.5224	-	1287	944.63	2.5019
$G_{80}$	0.020956	4336.2	-	-	93.337	0.001
$G_{90}$	0.00018306	4.4412	-	1316.3	949.94	2.4897
$G_{31}$	0.35602	2240.9	93.303	-	76.897	0.018693
$G_{41}$	-0.018534	-	300	-	-	-
$G_{51}$	0.709805	-	300	-	-	-
$G_{61}$	$3.3522 \cdot 10^{-5}$	2243.1	93.194	-	76.897	0.018461
$G_{71}$	0.34338	2242.8	93.194	-	76.897	0.018456
$G_{91}$	-0.26507	2212.8	95.357	-	76.885	0.022184
$G_{32}$	-0.0051518	2536.8	171.11	-	76.036	0.018326
$G_{62}$	$-4.7791 \cdot 10^{-7}$	2534.6	171.39	-	76.027	0.018465
$G_{72}$	-0.0049016	2535.6	171.27	-	76.029	0.018491
$G_{82}$	-0.059698	4101.1	185.14	-	77.451	0.090508
$G_{92}$	0.004599	2568	168.98	-	76.079	0.017118
$G_{23}$	29.14	$5.3761 \cdot 10^{-6}$	-	265.9	77.436	0.004072
$G_{33}$	0.033987	2124.8	179.14	-	76.622	0.019563
$G_{63}$	$-3.1675 \cdot 10^{-6}$	2123.6	179.1	-	76.622	0.019482
$G_{73}$	0.032391	2121.8	179.11	-	76.622	0.019455
$G_{93}$	-0.028076	2116.3	179.51	-	76.616	0.02012
$G_{14}$	18.697	8113.3	-	-9939.3	98.173	0.18511
$G_{34}$	-0.68653	3066.9	-	-	42.168	0.001
$G_{44}$	-0.29521	45.947	-	-	75.698	0.49492
$G_{54}$	10.279	67.957	-	64.954	87.999	0.75976
$G_{64}$	$-6.3287 \cdot 10^{-5}$	3068.4	-	-	42.167	0.001
$G_{74}$	-0.64917	3069.3	-	-	42.167	0.001
$G_{84}$	6.0338	5011.4	48.636	-673.69	91.259	0.097542
$G_{94}$	0.60639	3130.4	-	-	42.177	0.001
$G_{86}$	0.29202	-	$1.0665 \cdot 10^{-6}$	141.29	460.83	4.6978
$G_{87}$	0.70772	4237.8	193.11	-	77.225	0.088359

Tabla 4.18. Parámetros modelos con recirculación durante el día.

Se analiza la bondad de los modelos obtenidos gráficamente. En rojo se pueden ver las salidas del simulador del fotobiorreactor, y en azul los modelos obtenidos. Éstos, al ser de órdenes superiores se acercan más al comportamiento no lineal que los anteriores calculados en las mismas condiciones.

❖ Para el día 4/02/2014:

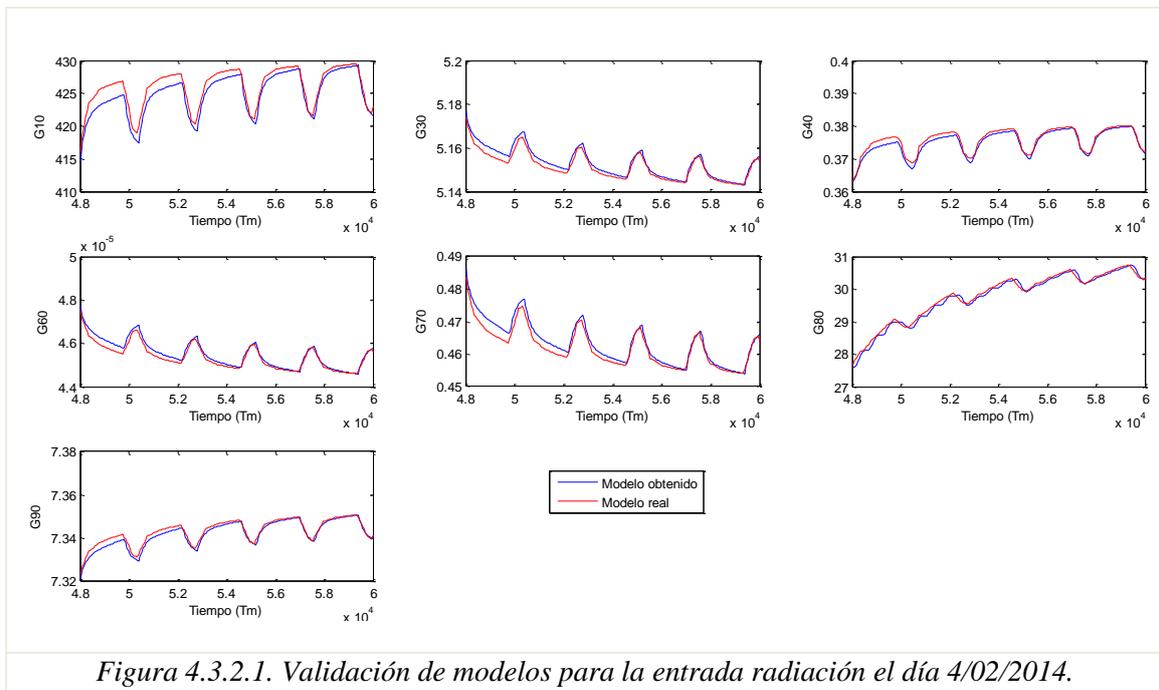


Figura 4.3.2.1. Validación de modelos para la entrada radiación el día 4/02/2014.

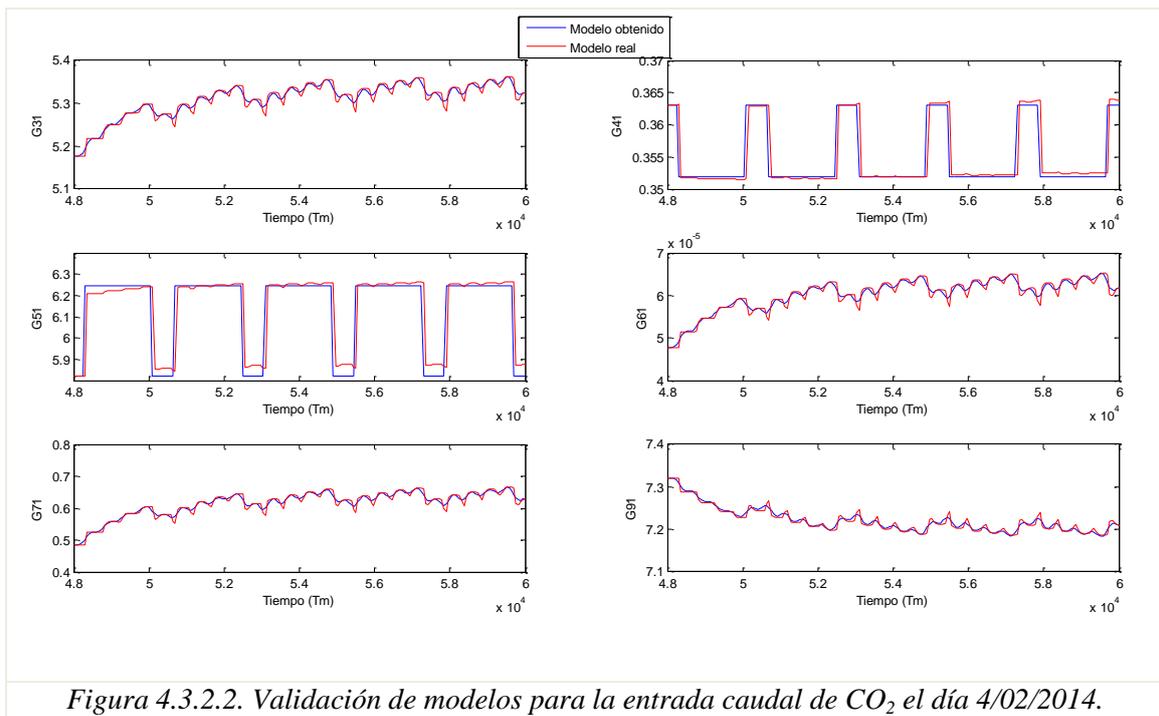


Figura 4.3.2.2. Validación de modelos para la entrada caudal de CO<sub>2</sub> el día 4/02/2014.

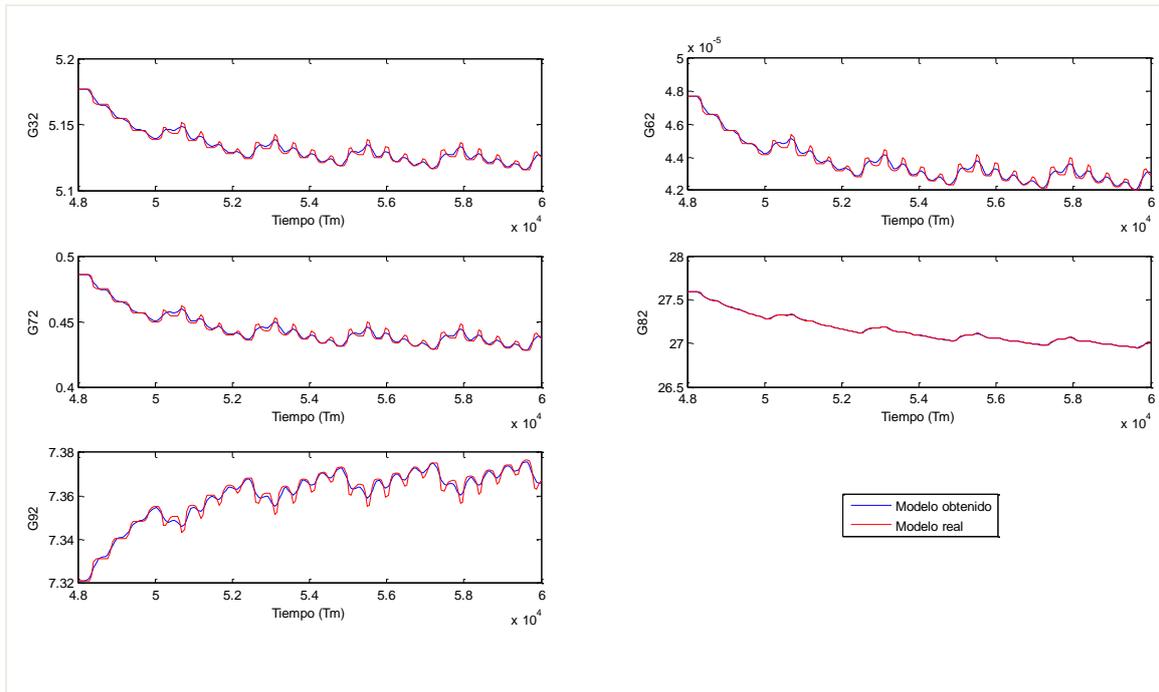


Figura 4.3.2.3. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 4/02/2014.

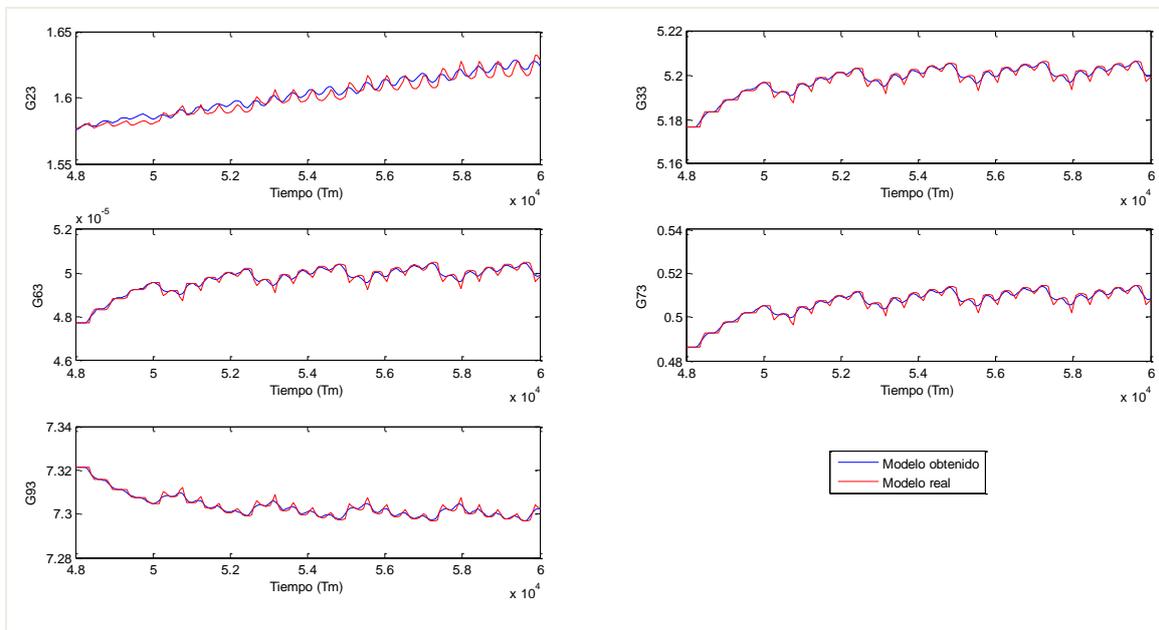


Figura 4.3.2.4. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 4/02/2014.

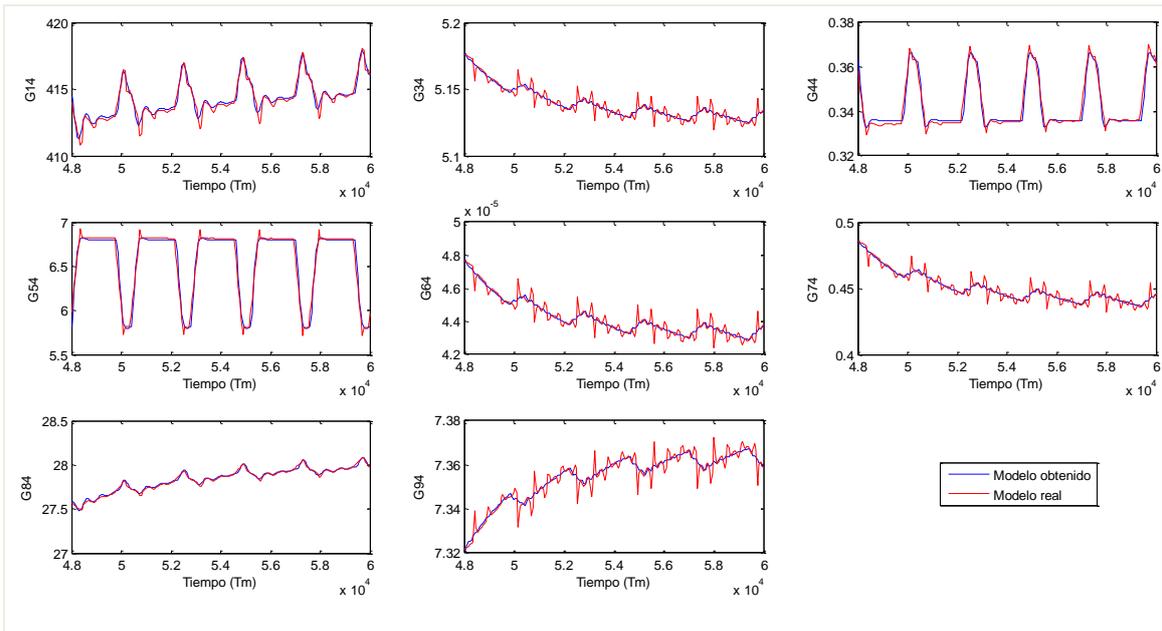


Figura 4.3.2.5 Validación de modelos para la entrada velocidad el día 4/02/2014.

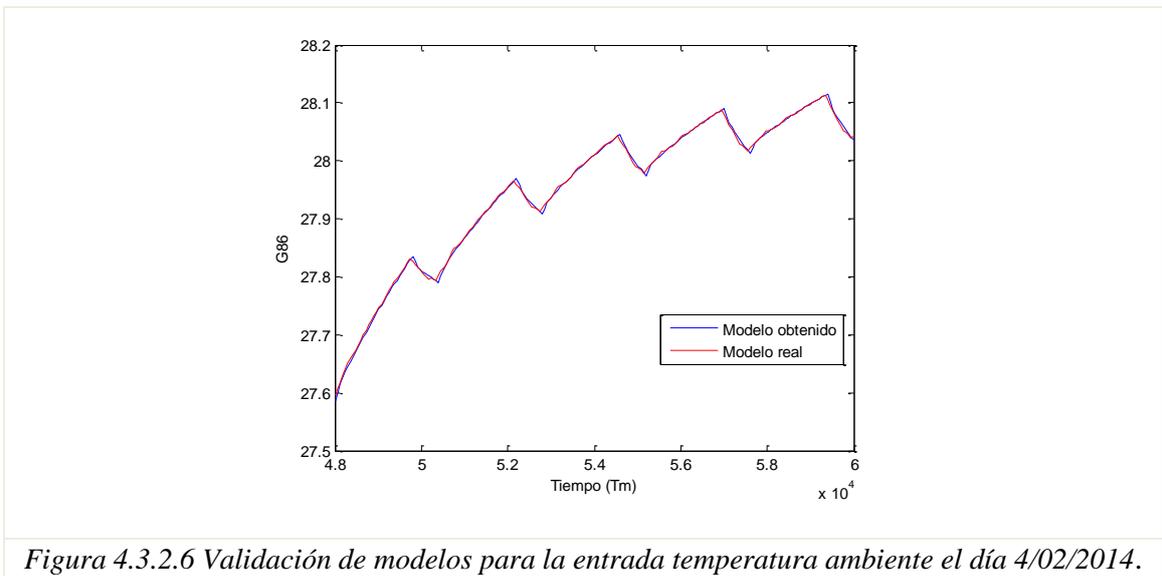


Figura 4.3.2.6 Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 4/02/2014.

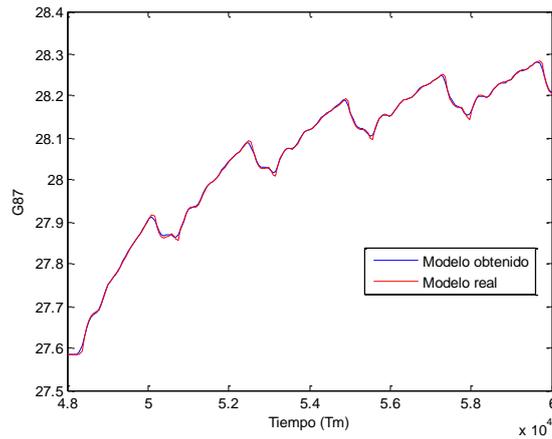


Figura 4.3.2.7. Validación de modelos para la entrada temperatura en el intercambiador el día 4/02/2014.

Durante el día, las dos validaciones hechas muestran que se ha conseguido modelar la dinámica deseada incluyendo tanto el comportamiento principal como el efecto oscilatorio de las variables que lo presentan (ver figuras 4.3.2.1 a 4.3.2.14). Los modelos que más diferencias presentan respecto al real son los correspondientes a la radiación solar como se observa en las figuras 4.3.2.1 y 4.3.2.8.

❖ Para el día 7/02/2014:

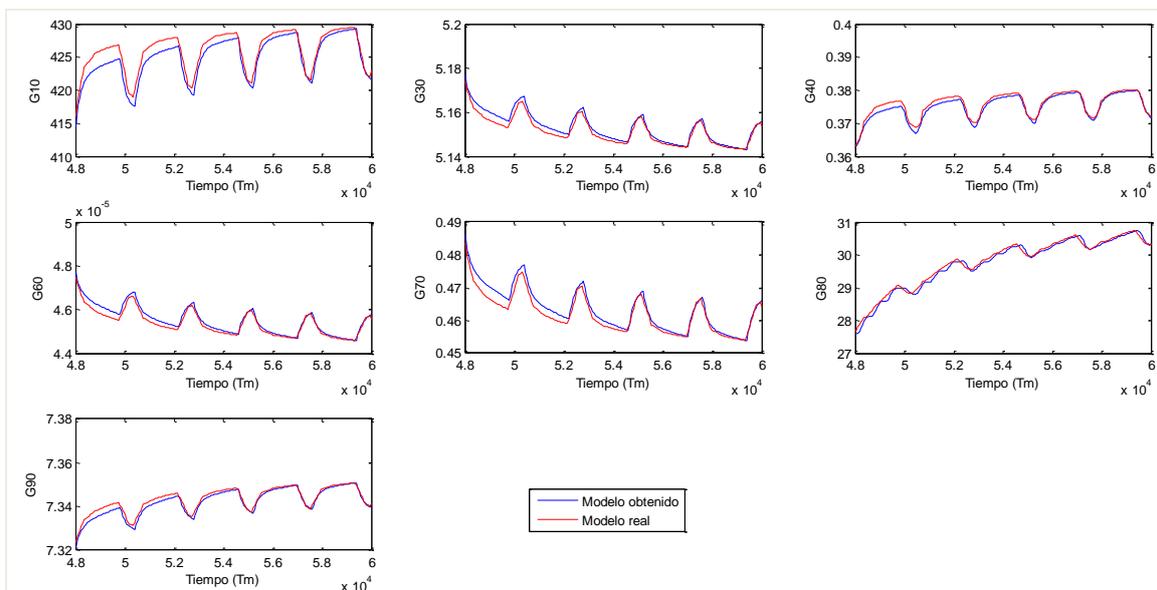


Figura 4.3.2.8. Validación de modelos para la entrada radiación el día 7/02/2014.

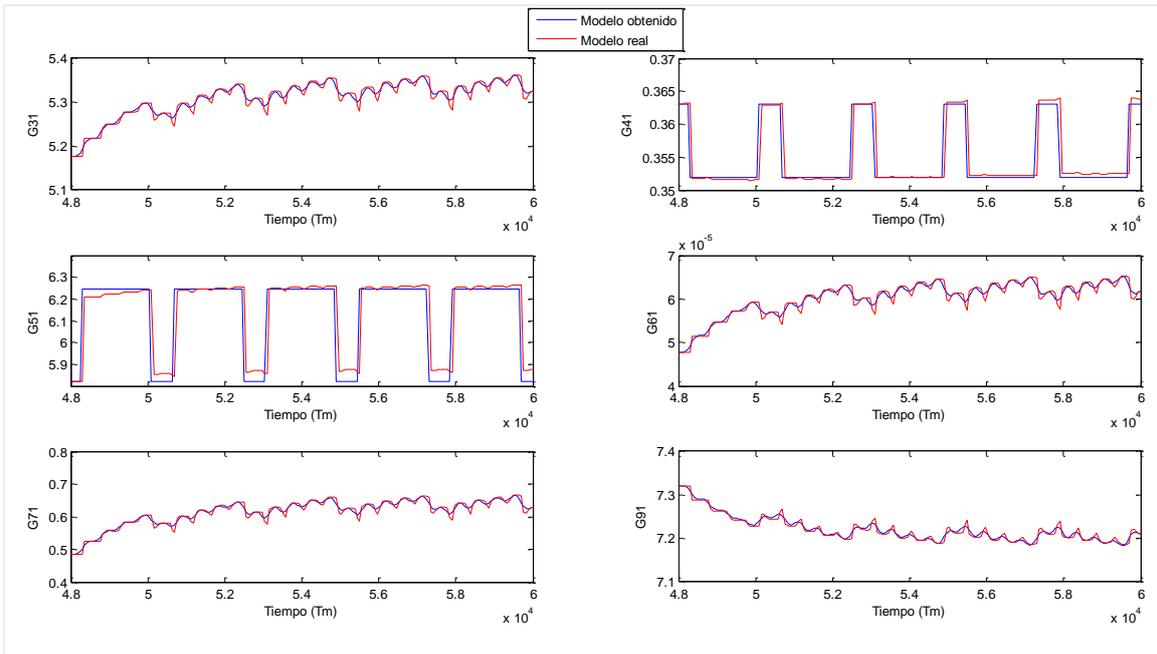


Figura 4.3.2.9. Validación de modelos para la entrada caudal de CO<sub>2</sub> el día 7/02/2014.

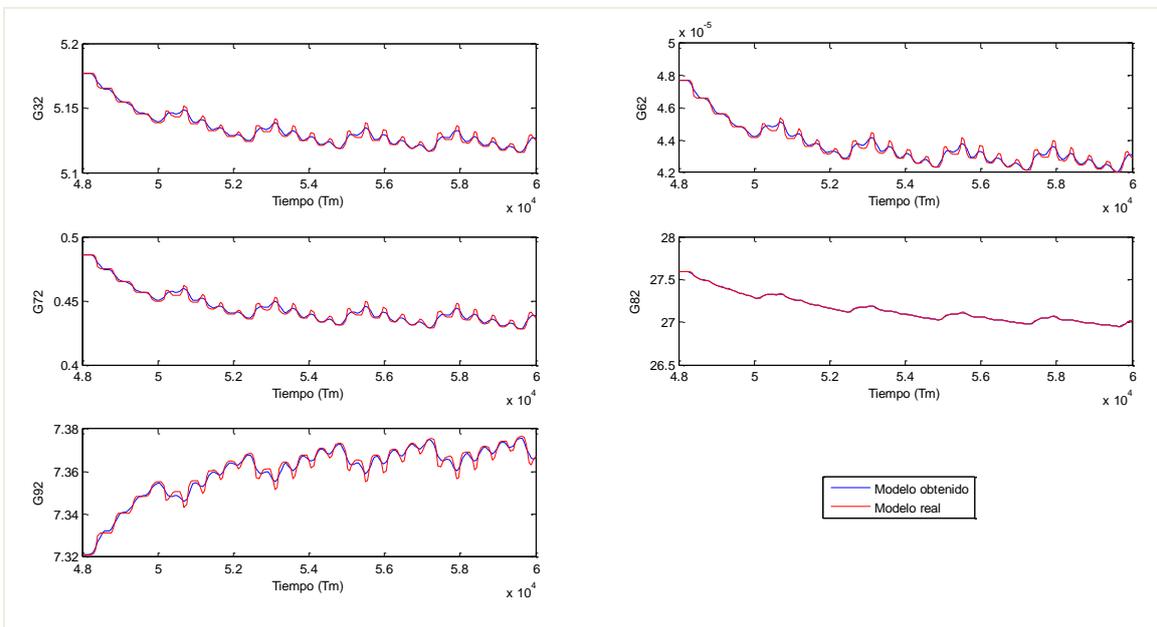


Figura 4.3.2.10. Validación de modelos para la entrada caudal de aire el día 7/02/2014.

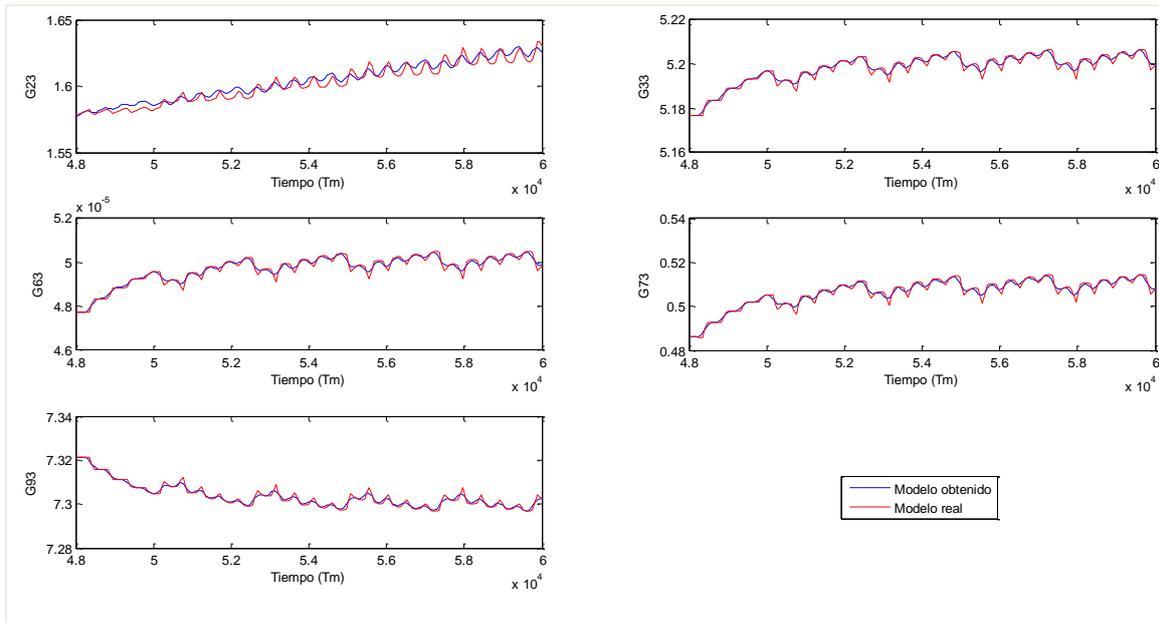


Figura 4.3.2.11. Validación de modelos para la entrada caudal de medio el día 7/02/2014.

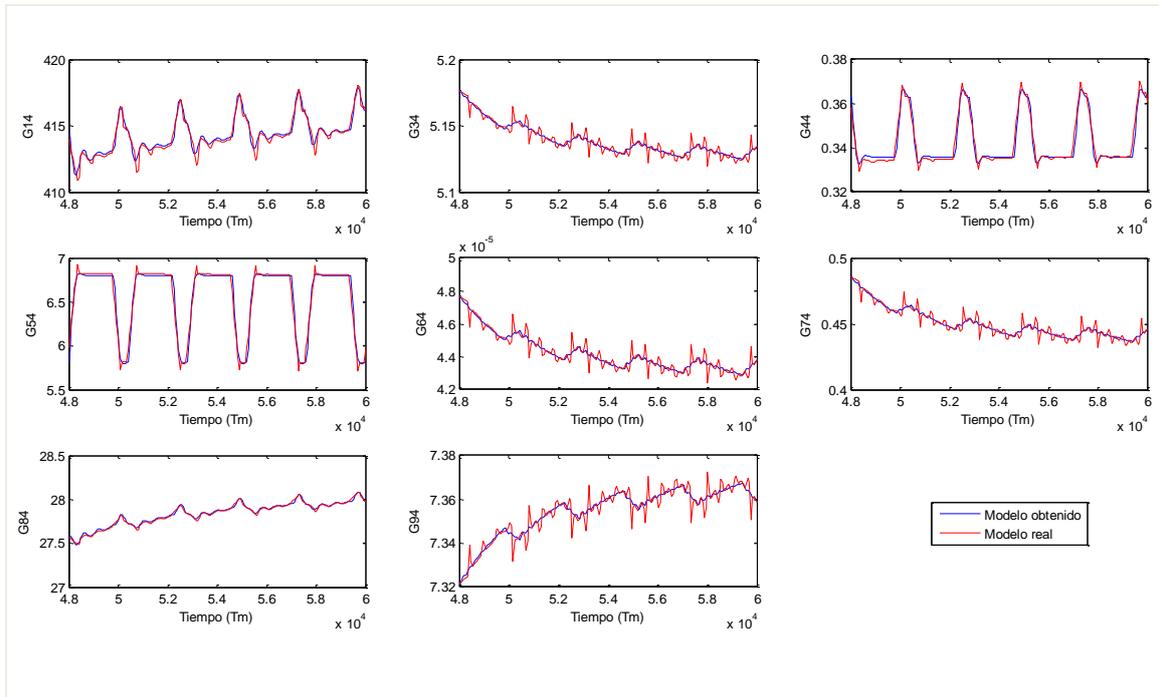


Figura 4.3.2.12. Validación de modelos para la entrada velocidad el día 7/02/2014.

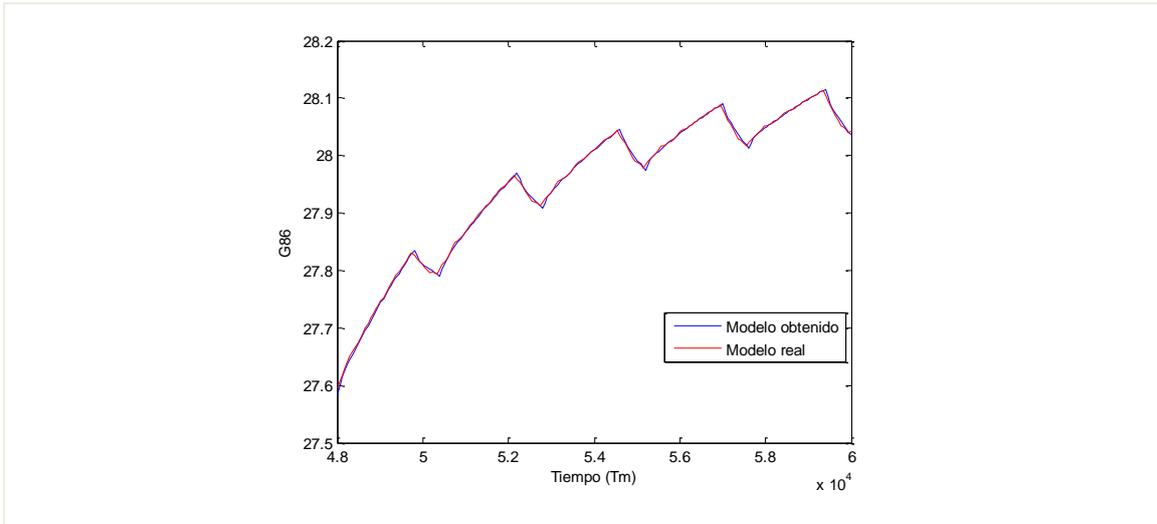


Figura 4.3.2.13 Validación de modelos para la entrada temperatura ambiente el día 7/02/2014.

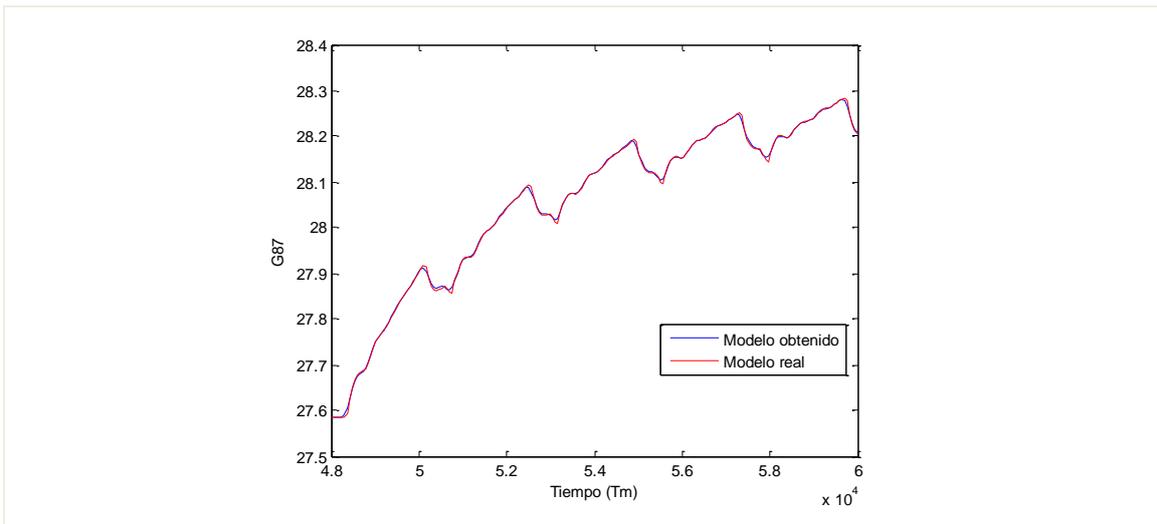


Figura 4.3.2.14 Validación de modelos para la entrada temperatura en el intercambiador el día 7/02/2014.

Finalmente se puede decir que las decisiones tomadas relacionadas con la estructura, orden y valor de los parámetros de las funciones de transferencia del modelo obtenido han sido correctas.



Esta matriz está compuesta por 4 columnas que representan las 4 entradas o variables manipulables: caudal de CO<sub>2</sub>, caudal de aire, velocidad del cultivo y temperatura del agua del intercambiador; y por 9 filas que designan las 9 salidas o variables a controlar. Como debemos quedarnos con una matriz de ganancias estáticas cuadrada, se hará el estudio RGA para las 21 combinaciones posibles de entradas, de 4 en 4, y manteniendo siempre las que por experiencia sabemos que deben estar incluidas, temperatura y pH.

De estas 21 matrices se han calculado los valores propios, los valores singulares y los números de condición tal y como se ha explicado en el apartado 3.4 de este documento. Siguiendo el método explicado, escogeremos las matrices de menor número de condición, los 21 resultados obtenidos han sido los siguientes (ver tabla 4.19).

CN	
CN <sub>1</sub>	Infinito
CN <sub>2</sub>	184288,453684640
CN <sub>3</sub>	34744,1143812979
CN <sub>4</sub>	4454,31713220255
CN <sub>5</sub>	234648883,165268
CN <sub>6</sub>	47813,5744592100
CN <sub>7</sub>	5,77564446440125e+17
CN <sub>8</sub>	1,14879057432983e+18
CN <sub>9</sub>	2,54765848272730e+16
CN <sub>10</sub>	4,58535990168580e+18
CN <sub>11</sub>	5,43620573126738e+17
CN <sub>12</sub>	129434,995583493
CN <sub>13</sub>	243048,484555574
CN <sub>14</sub>	264263228,092739
CN <sub>15</sub>	185488,596602470
CN <sub>16</sub>	161670,559802032
CN <sub>17</sub>	142564335,883387
CN <sub>18</sub>	30622,3748509666
CN <sub>19</sub>	279765304,768380
CN <sub>20</sub>	58717,8052963492
CN <sub>21</sub>	522779037,585790

Tabla 4.19. Números de condición de las primeras 21 combinaciones.

Para empezar podemos observar que todos ellos son de gran magnitud, lo que ya nos puede dar una idea de que cualquiera de esas 21 combinaciones no será eficiente. Se ha decidido tomar los cuatro valores menores y analizar otra de las condiciones a cumplir según el método seguido, la relación entre los valores singulares (ver tabla 4.20).

<b>CN<sub>4</sub> = 4454,317</b>	<b>CN<sub>18</sub> = 30622,375</b>	<b>CN<sub>3</sub> = 34744,114</b>	<b>CN<sub>6</sub> = 47813,574</b>
<b>S<sub>4</sub> =</b> 0.0033 0.4136 0.6578 14.6278	<b>S<sub>18</sub> =</b> 0.0002 0.0406 0.4356 5.6945	<b>S<sub>3</sub> =</b> 0.0003 0.2739 0.5863 10.6784	<b>S<sub>6</sub> =</b> 0.0002 0.4245 0.5874 10.6938

Tabla 4.20. Cuatro valores menores de números de condición y respectivos valores singulares.

Siendo  $S_n$  el conjunto de valores singulares,  $\sigma$ , de cada matriz, para todos los casos existe una relación entre valores singulares mayor de 10 por lo que podemos afirmar que al menos una entrada y una salida podrán ser omitidas. Se harán pruebas eliminando filas y columnas, creando nuevas matrices de ganancias.

Los siguientes pasos se han dado teniendo en cuenta la dinámica del proceso, atendiendo a las propiedades del cultivo y a lo que sabemos de anteriores experimentos se puede afirmar:

- El pH saldrá a emparejar con el caudal de  $CO_2$ .
- La temperatura del intercambiador de agua solamente afecta a la temperatura del cultivo.

Probaremos las diferentes combinaciones de 3 entradas y 3 salidas manteniendo el caudal de  $CO_2$  y la temperatura y alternando las variables caudal de aire y velocidad, probando con todas las salidas posibles:

-Eliminando la entrada de caudal de aire. Atendiendo a las salidas que se ven afectadas encontramos 6 combinaciones posibles, recogidas en la tabla 4.21.

<b>CN<sub>a</sub> = 39.0698</b>	<b>CN<sub>b</sub> = 3.0939e+003</b>	<b>CN<sub>c</sub> = 140.5674</b>	<b>CN<sub>d</sub> = 41.2838</b>	<b>CN<sub>e</sub> = 7.4715e+006</b>	<b>CN<sub>f</sub> = 1.1582e+003</b>
<b>S<sub>a</sub> =</b> 0.2732 0.5842 10.6741	<b>S<sub>b</sub> =</b> 0.0018 0.4361 5.6913	<b>S<sub>c</sub> =</b> 0.0402 0.2820 5.6575	<b>S<sub>d</sub> =</b> 0.2780 0.6485 11.4769	<b>S<sub>e</sub> =</b> 0.0000 0.2818 5.6496	<b>S<sub>f</sub> =</b> 0.0049 0.4351 5.6864

Tabla 4.21. Números de condición y valores singulares de las 6 combinaciones.

Eliminando esta entrada y cualquiera de las salidas no encontramos ninguna solución posible. Los números de condición han mejorado bastante pero sigue habiendo valores singulares para los cuales su relación es mayor de 10.

-Eliminando la entrada de velocidad: aparecen tres opciones (ver tabla 4.21).

<b>CN<sub>g</sub> = 1.1853e+004</b>	<b>CN<sub>h</sub> = 1.5123e+007</b>	<b>CN<sub>i</sub> = 3.0759e+003</b>
S <sub>g</sub> = 0.0001 0.4276 0.6880	S <sub>h</sub> = 0.0000 0.2739 0.6880	S <sub>i</sub> = 0.0002 0.4272 0.6880

Tabla 4.21. Números de condición y valores singulares de las 3 combinaciones.

Seguimos sin obtener resultados esperanzadores, en los dos casos debemos eliminar una fila y una columna más. Según la dinámica del fotobiorreactor y las pruebas realizadas en anteriores ocasiones, el control se hará sobre el pH y la temperatura del cultivo manipulando las entradas de caudal de CO<sub>2</sub> y temperatura del agua del intercambiador respectivamente. Comprobamos que se cumplan los requisitos:

La matriz 2 x 2 de ganancias estáticas es la expresada en la ecuación 4.11:

$$k_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0.6855 \\ -0.2738 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

El número de condición, bastante mejor que los anteriores, y los valores singulares (ver tabla 4.22):

<b>CN<sub>i</sub> = 2.5033</b>
S <sub>i</sub> = 0.2738 0.6855

Tabla 4.22. Número de condición y valores singulares de la última combinación

Comprobamos:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{0.6855}{0.2738} < 10 \quad (4.12)$$

La estrategia de control es válida. Calculamos la matriz de ganancias relativas (ver ecuación 4.13) para comprobar que los emparejamientos responden a lo esperado:

$$K_I = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

No solo se demuestra que los emparejamientos son los esperados, sino que además se puede ver que las interacciones entre los lazos de control serán nulas, pues el valor de las ganancias relativas en ambos casos es igual a 1.

Por último se comprueba si las decisiones tomadas en base a las conclusiones sacadas en estudios previos relacionados con el fotobiorreactor, han sido correctas y las óptimas. Tanto para la temperatura como para el pH calcularemos los números de condición al emparejarlas con el resto de entradas posibles, veremos que en todos los casos este número es superior, por lo que podemos dar por buena la estrategia propuesta.

-Variable de control: pH:

Con u2:caudal de aire	Con u4: velocidad del cultivo
CN= 154.3745	CN=78.1677

Tabla 4.23. Números de condición de las combinaciones restantes para el pH.

- Variable de control: temperatura:

Con u2: caudal de aire	Con u4: velocidad del cultivo
CN= 4.7230	CN=20.5970

Tabla 4.24. Números de condición de las combinaciones restantes para la temperatura.

#### 4.4.2. Diseño de controladores

Después del estudio realizado, el sistema a controlar se puede expresar del siguiente modo:

$$\begin{pmatrix} y_8 \\ y_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & G_{87} \\ G_{91} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_7 \\ u_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{80} \\ G_{90} \end{pmatrix} \cdot u_0 + \begin{pmatrix} 0 \\ G_{93} \end{pmatrix} \cdot u_3 + \begin{pmatrix} G_{86} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u_6 \quad (4.14)$$

Se han diseñado dos controladores PI para los lazos de control aplicando las fórmulas del Método Amigo anteriormente descritas. Tras realizar diversos ensayos y ver las oscilaciones producidas en el pH del sistema se ha decidido probar con otros métodos de sintonía para el segundo lazo. Finalmente aplicando las fórmulas propuestas en SIMC se ha conseguido eliminar estas oscilaciones y mejorar bastante la respuesta. Como parámetro de ajuste se ha escogido  $\tau_{BC} = 0.8\tau$ .

En cuanto a las perturbaciones, radiación solar,  $u_0$ , caudal de medio,  $u_3$  y temperatura ambiente,  $u_6$ , serán tratadas por separado. Se intentará neutralizar su efecto diseñando tres controladores por adelantado.

- Lazos principales de control: Ambos controladores responden a la fórmula 4.15, y el valor de los parámetros se detalla en la tabla 4.25.

$$C(s) = K_p \cdot \left[ 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] \quad (4.15)$$

$G_{ij}$	$k_p$	$T_i$ [s]
$G_{87}$	9.2927 [°C/°C]	1905.6
$G_{91}$	-4.34 [pH/%]	800

Tabla 4.25. Parámetros de los controladores.

Tras realizar los ensayos ha sido necesario reducir el tiempo integral  $T_i$  del segundo controlador. La respuesta era demasiado lenta y se ha ido reduciendo desde el valor inicialmente calculado,  $T_i=2382.1$  hasta  $T_i= 800$  para conseguir hacerla más rápida sin llegar a perjudicarlo.

- Controladores por adelantado *o feedforward* (ver ecuaciones 4.16):

$$F_{ff1} = \frac{G_{80}}{G_{87}} = \frac{0.0297(4176s+1)}{(4288s+1)}$$

$$F_{ff2} = \frac{G_{86}}{G_{87}} = \frac{0.4130(4176s+1)}{(4265s+1)}$$

$$F_{ff3} = \frac{G_{90}}{G_{91}} = \frac{6.94 \cdot 10^{-4}(1316.35s+1)(2137.9s+1)}{(4532s+1)(199.32s+1)}$$

$$F_{ff4} = \frac{G_{93}}{G_{91}} = \frac{0.1059(2337.9s+1)}{(2033.05s+1)} e^{-77.47s}$$

(4.16)

Para el primer lazo de control, con el que se controla la temperatura del cultivo mediante la del intercambiador,  $G_{87}$ , se han diseñado dos *feedforward*,  $F_{ff1}$ , que actúa frente a la radiación solar, y  $F_{ff2}$  que lo hace frente a la temperatura ambiente.

Para el segundo lazo de control, correspondiente al *pH* y caudal de  $CO_2$ ,  $G_{91}$ , también se han implementado dos *feedforward*,  $F_{ff3}$  y  $F_{ff4}$  que actuarán frente a la radiación solar y al caudal de medio respectivamente.

Se han eliminado los términos no invertibles, en este caso los tiempos de retardo que quedan positivos, no tiene ningún sentido físico ya que no es posible que el sistema responda adelantándose en el tiempo.

Se ha implementado en *Simulink* el esquema de control compuesto por los dos lazos principales y los *feedforward*, se compararán los resultados obtenidos en el modelo lineal con los del modelo no lineal, así como las diferencias entre utilizar solamente los controladores PI y hacerlo añadiendo los controladores por adelante.

Para ambos lazos de control se ha añadido un esquema *anti-windup*, ante la posibilidad de que las señales de control saturen. Tras ver los resultados, la temperatura en ningún caso satura pero el caudal de  $CO_2$  sí, la apertura de la válvula permite la entrada de un caudal de 0 a 5 *l/min*.

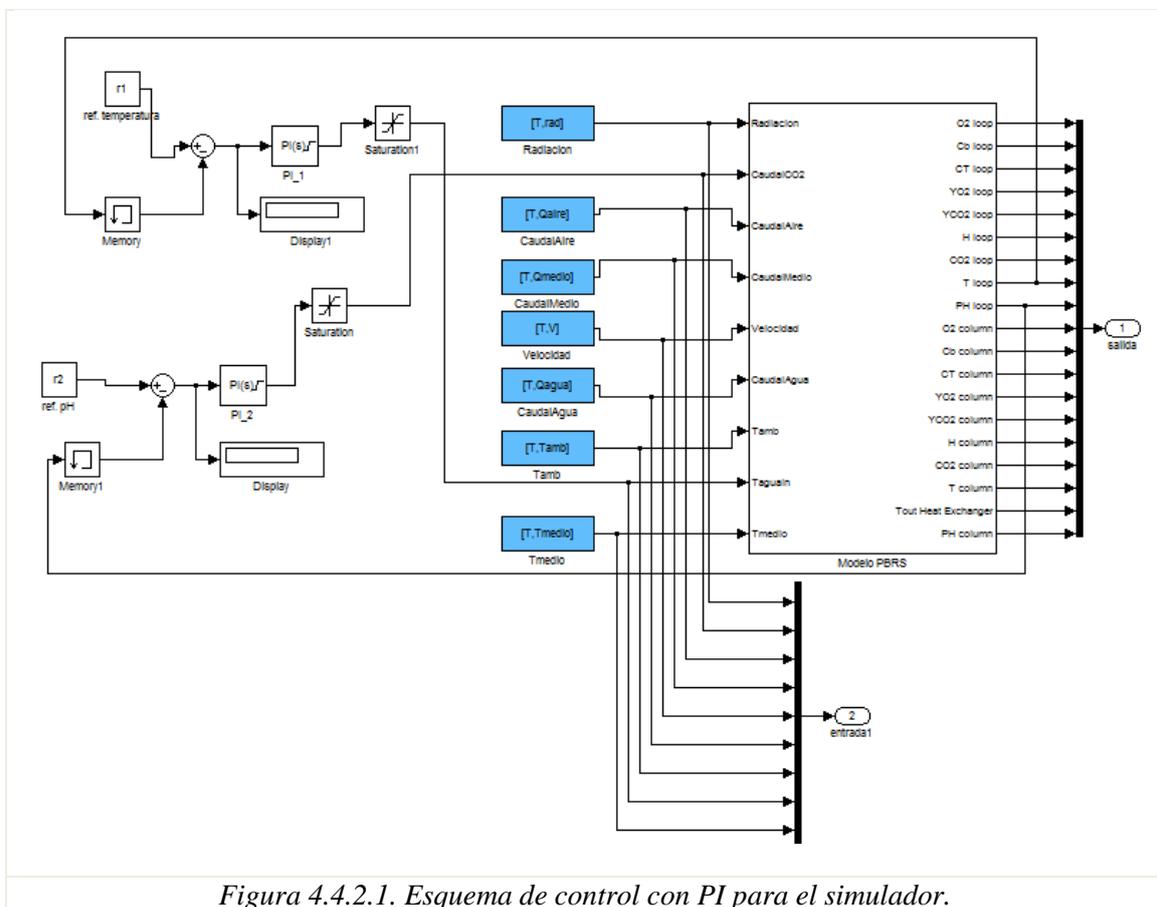


Figura 4.4.2.1. Esquema de control con PI para el simulador.

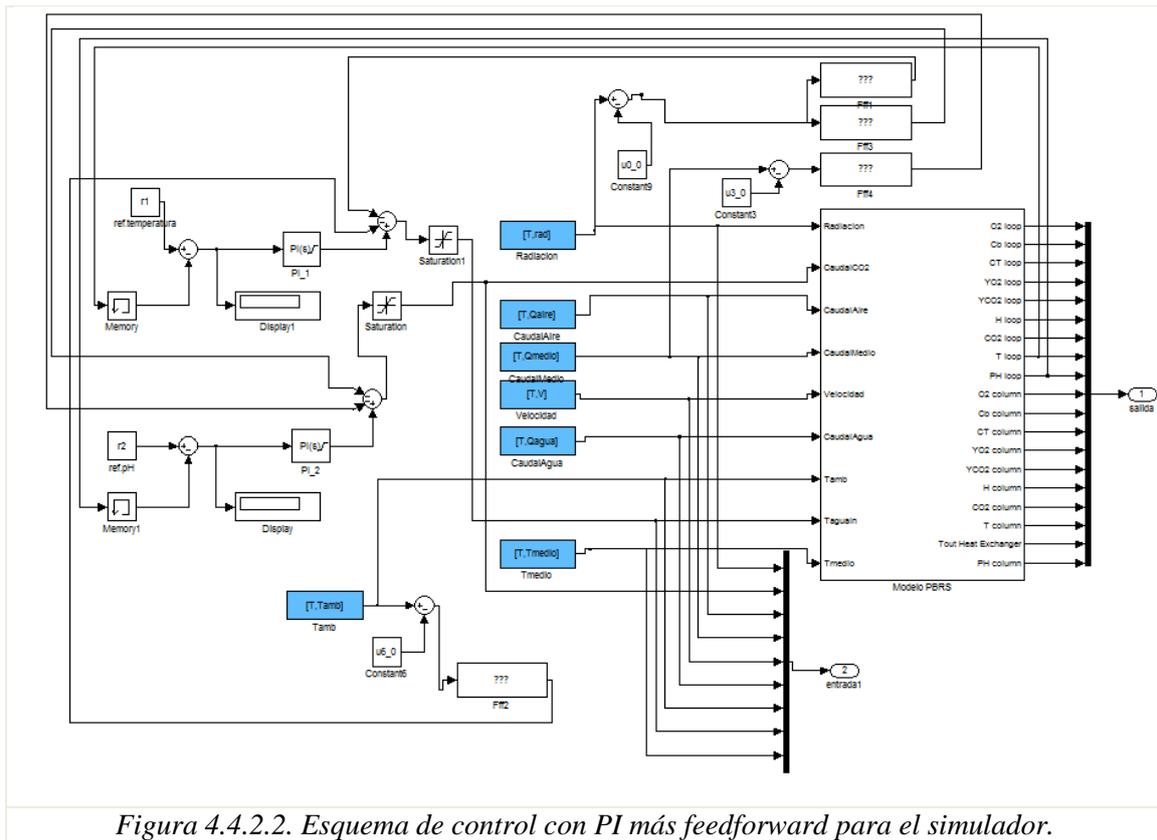


Figura 4.4.2.2. Esquema de control con PI más feedforward para el simulador.

En las figuras 4.4.2.1 y 4.4.2.2 se muestran los esquemas de control realizados en *Simulink* para el caso de uso de PI solamente y el de PI más *feedforward* respectivamente. Como diferencias, en el segundo caso las perturbaciones entran también a los bloques de los *feedforward* y estos se restan a las señales de control

### 4.4.3. Resultados gráficos

Se ha implementado en *Simulink* el modelo lineal multivariable del sistema con el esquema de control anterior. En las siguientes imágenes se puede ver cómo las salidas alcanzan el valor de referencia en cada caso sin error en estado estacionario.

Se aprecia el efecto de las perturbaciones, se han introducido escalones en la radiación, en el caudal de medio y en la temperatura ambiente en  $t=20000$  s,  $t=40000$  s y  $t=60000$  s respectivamente. Las mejoras introducidas por los controladores *feedforward* son claras, el efecto de las perturbaciones es de menor magnitud. En las gráficas de las señales de control se puede observar cómo ésta se adelanta a las perturbaciones gracias a los *feedforward*.

Los valores de referencia deseados para las variables a controlar se han escogido atendiendo a las necesidades de las microalgas, en este caso han sido:

- Temperatura = 25 °C
- pH = 7.8.

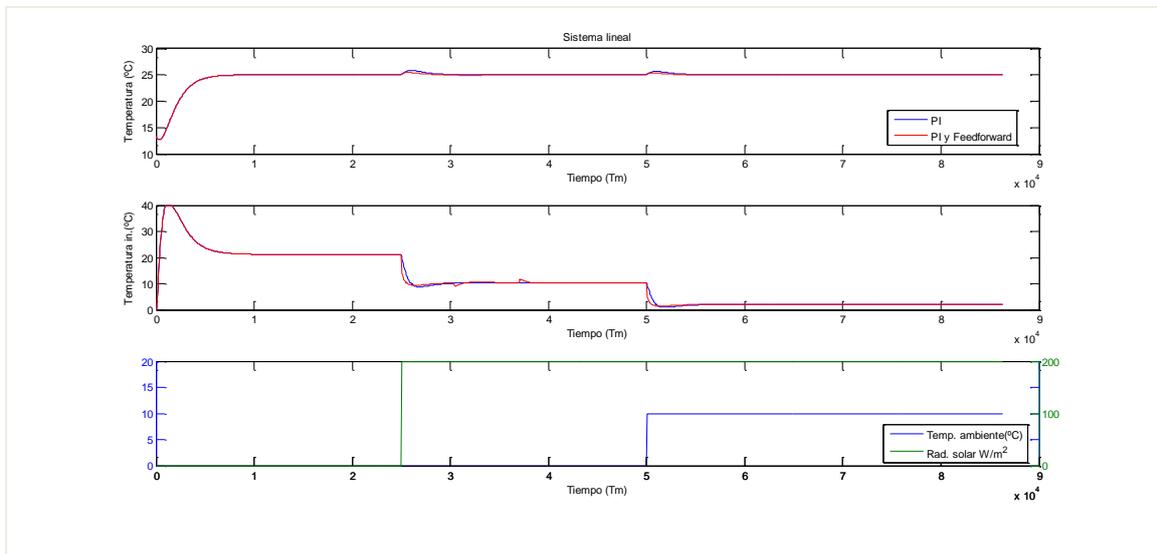


Figura 4.4.3.1. Salida de temperatura [°C], temperatura en el intercambiador [°C], y perturbaciones de temperatura ambiente [°C], y radiación solar [W/m<sup>2</sup>] para el modelo lineal.

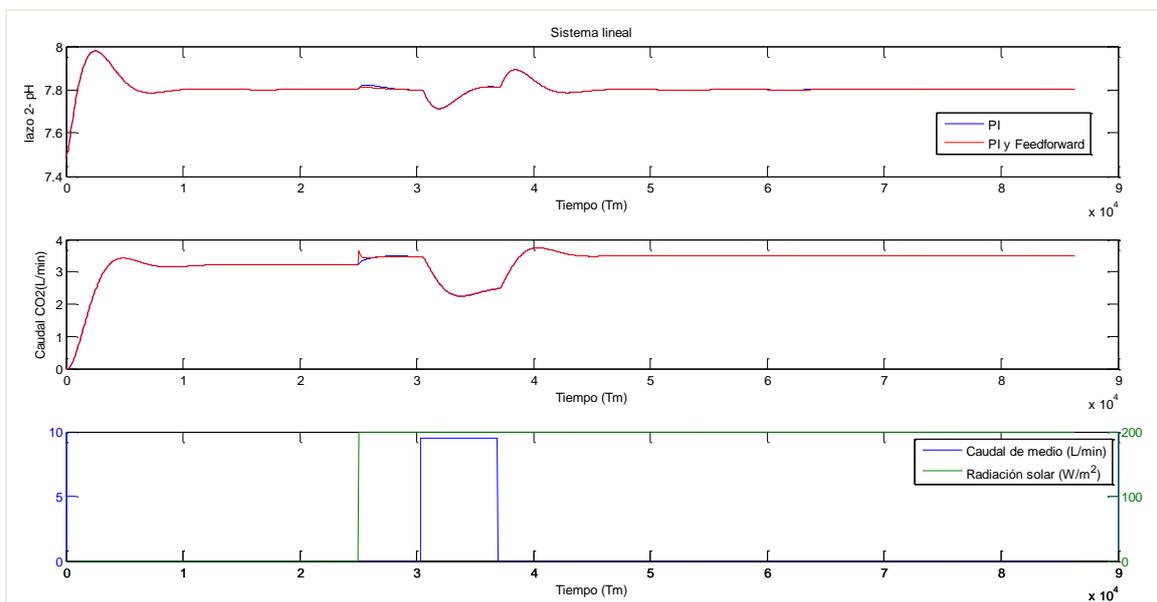


Figura 4.4.3.2. Salida de pH, caudal de CO<sub>2</sub> suministrado [L/min] y perturbaciones de radiación [W/m<sup>2</sup>] y caudal de medio suministrado [L/min] para el modelo lineal.

De las figuras anteriores (4.4.3.1 y 4.4.3.2) se puede decir que los controladores cumplen con los requisitos buscados, se alcanzan las consignas adecuadamente y las perturbaciones son controladas eficazmente, sobre todo para el caso en que se añaden

los *feedforward*, la señal de control se anticipa a dichas perturbaciones reduciendo los efectos negativos en las salidas.

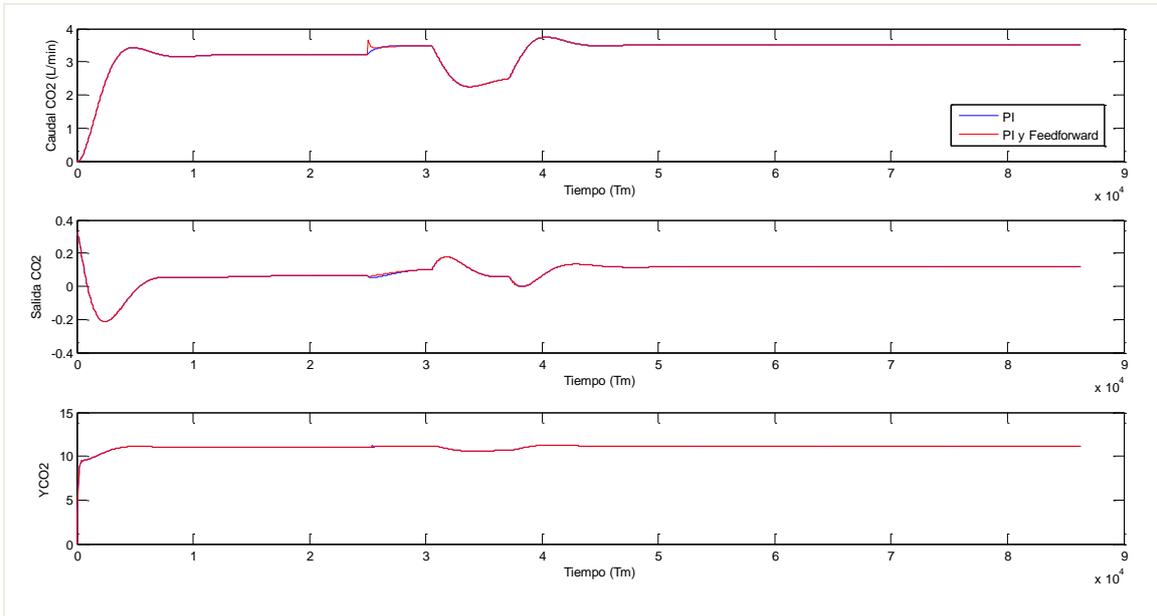


Figura 4.4.3.3. Caudal de CO<sub>2</sub> suministrado [L/min], salida de CO<sub>2</sub> [mol/m<sup>3</sup>] y fracción molar de CO<sub>2</sub> a la salida [mol CO<sub>2</sub>/mol N<sub>2</sub>] para el modelo lineal.

Para las perturbaciones utilizadas en este ensayo no se pueden apreciar las diferencias en cuanto a consumo de CO<sub>2</sub> (ver figura 4.4.3.3), se hará con más detalle para el modelo no lineal que es donde verdaderamente tiene sentido.

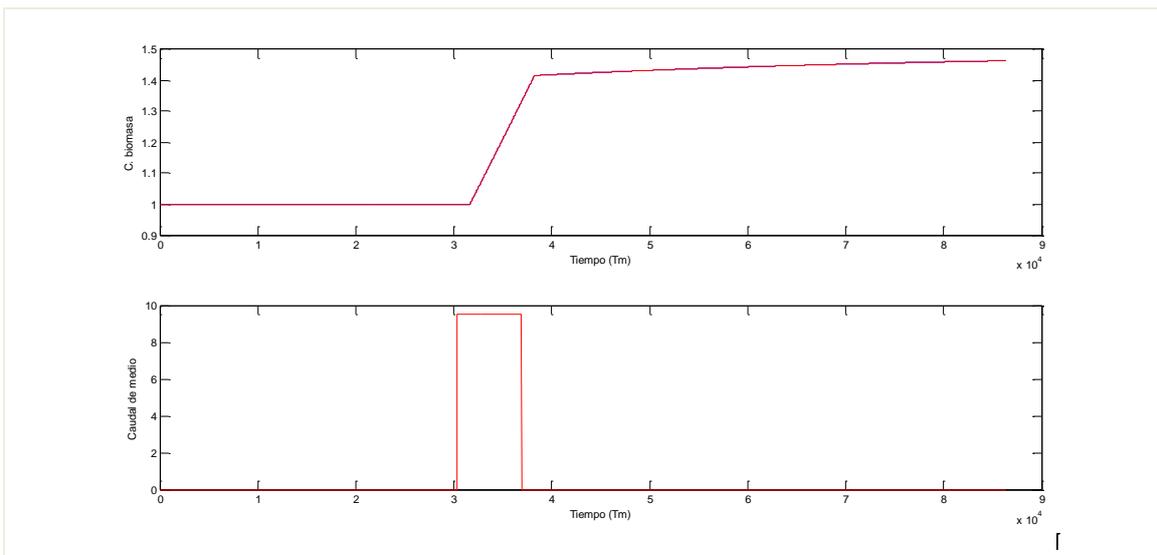


Figura 4.4.3.4. Concentración de biomasa [kg/m<sup>3</sup>] y caudal de medio [L/min] el modelo lineal.

La figura 4.4.3.4 muestra la evolución de la concentración de biomasa, ésta aumenta tras la inyección de medio pero no incluye el efecto contrario producido por la retirada de cultivo. Por lo tanto tampoco se aprecian las diferencias en la señal de control referente al caudal de dióxido de carbono (Figura 4.4.3.2). Este aspecto se verá con más detalle para el modelo no lineal.

Tras comprobar la efectividad del esquema de control en el modelo lineal se ha implementado también en el modelo no lineal. Como perturbaciones se han usado los datos reales de los diferentes días:

❖ Día 3/02/2014:

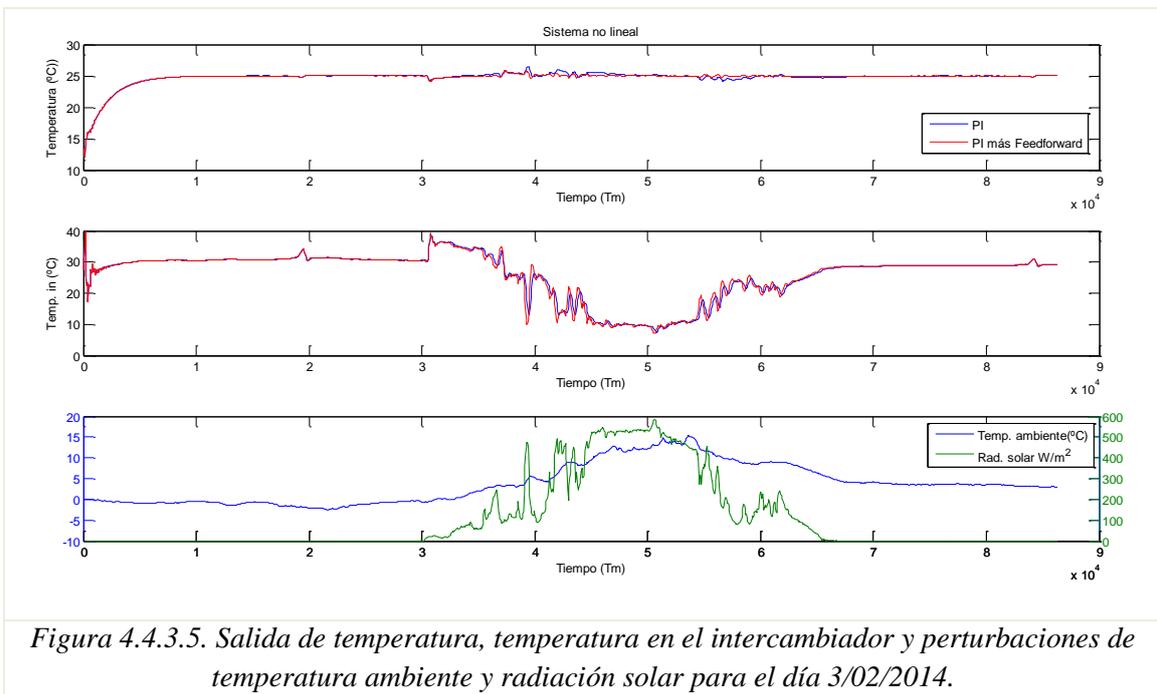
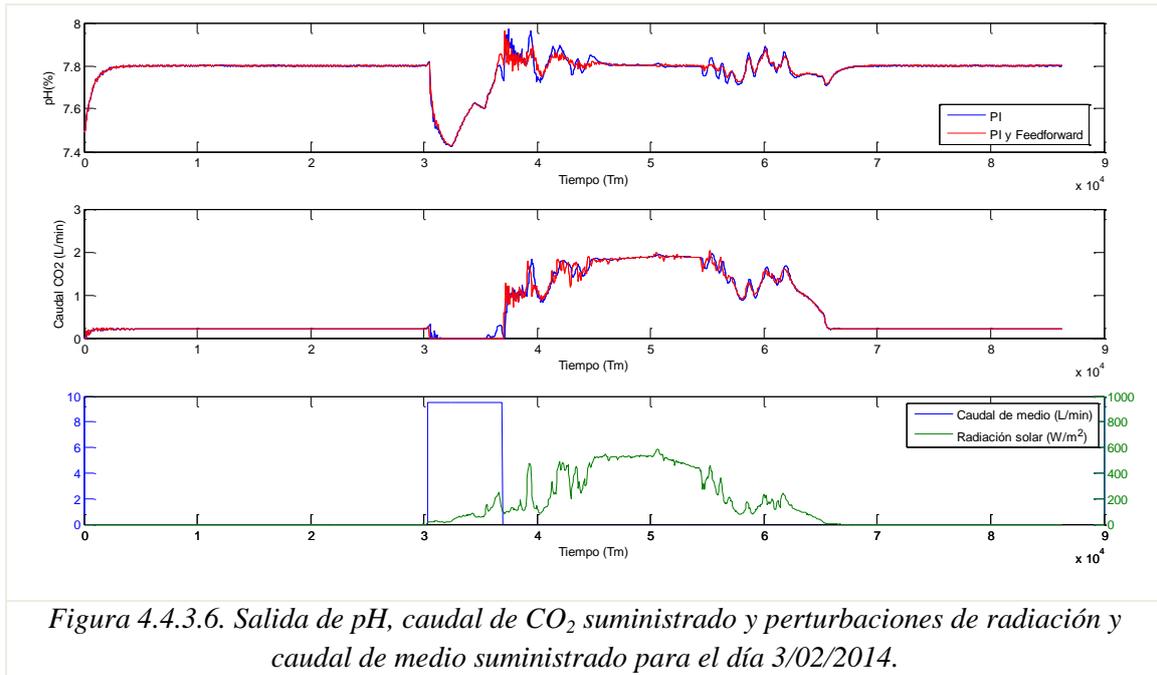


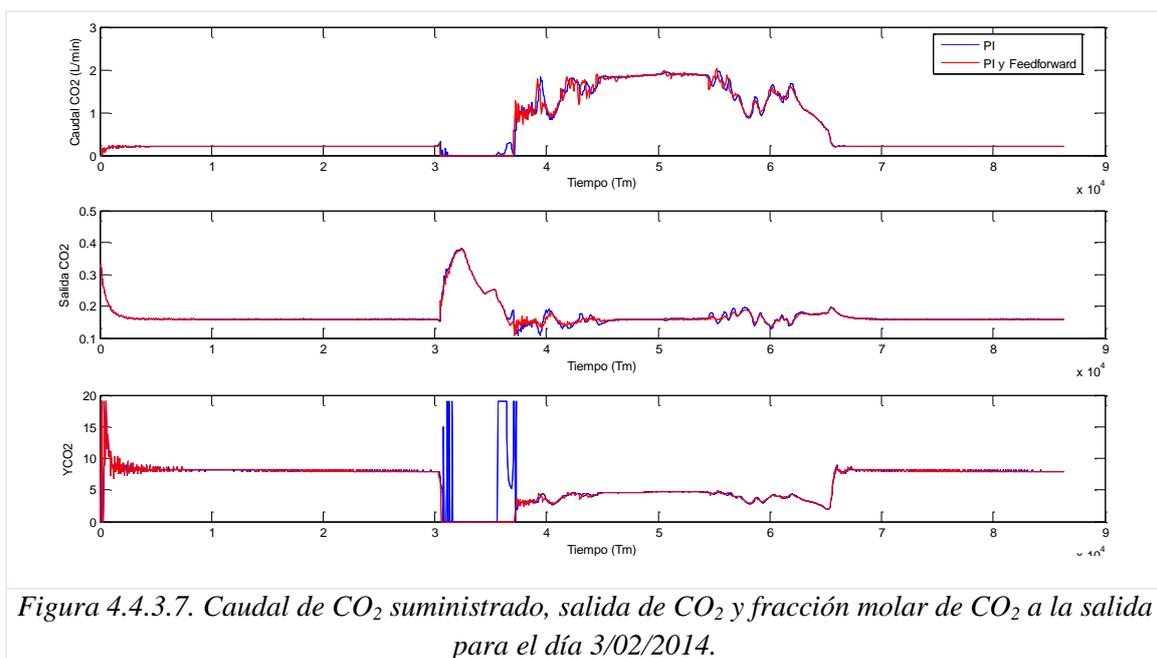
Figura 4.4.3.5. Salida de temperatura, temperatura en el intercambiador y perturbaciones de temperatura ambiente y radiación solar para el día 3/02/2014.

En la figura 4.4.3.5 se puede ver cómo el controlador es capaz de mantener la temperatura en torno al valor deseado sin demasiadas oscilaciones. En la segunda gráfica, correspondiente a la señal de control se ve claramente cómo es durante las horas de mayor radiación solar cuando más tiene que actuar esta señal de control, disminuyendo la temperatura en el intercambiador para contrarrestar el aumento provocado por la radiación solar. Las mejoras introducidas por los *feedforward* se aprecian en la primera gráfica, la temperatura de salida es mucho más lineal que para el caso con PI solamente y apenas presenta picos. Coincidiendo con la inyección de medio, la temperatura desciende ligeramente, pero rápidamente se compensa, como se ve en la gráfica de la señal de control, ésta aumenta inmediatamente después.

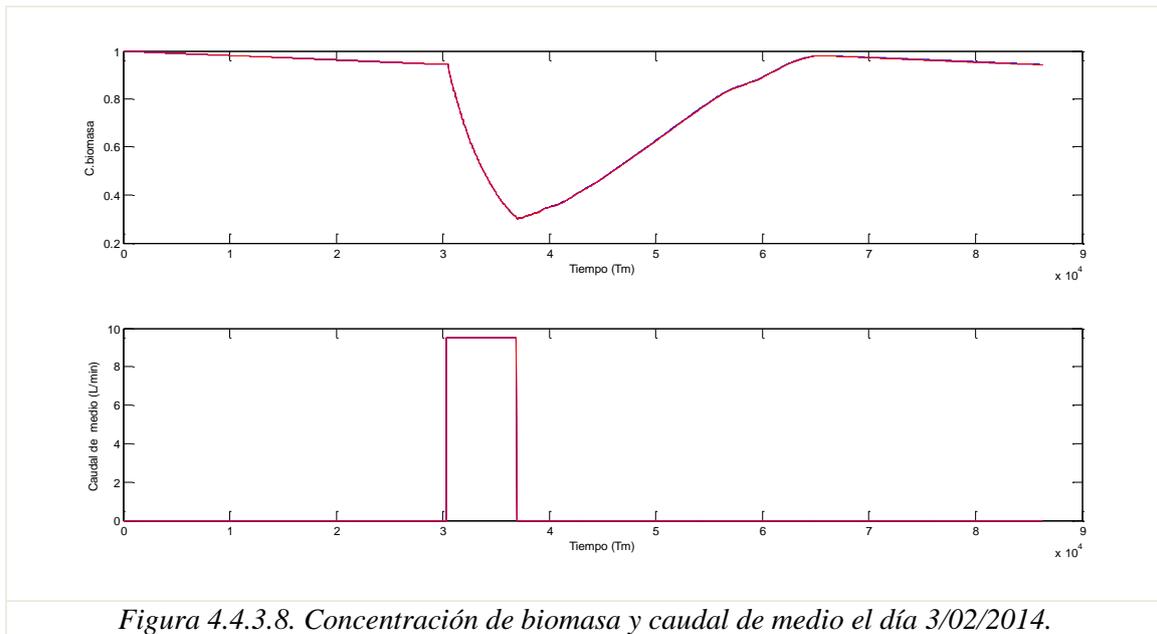


En el caso del pH (Figura 4.4.3.6) también se alcanza el valor deseado pero con más picos que para la temperatura, la mejora introducida por los *feedforward* se aprecia sobre todo para las variaciones en la radiación solar. En cuanto a la perturbación de medio la acción del *feedforward* no consigue mejorar la respuesta pues la señal de control está saturada, el caudal de CO<sub>2</sub> está a cero. Más adelante se probará hacer la inyección de medio un tiempo después, cuando la radiación solar sea mayor y se precise más caudal de CO<sub>2</sub>, estando más lejos de su límite inferior y por tanto de la saturación.

En la gráfica de la señal de control se observa que la acción de los *feedforward* es muy enérgica y produce mucha varianza. Los controladores consiguen los resultados buscados pero son un poco agresivos.



En la figura 4.4.3.7 se presentan las gráficas más representativas relacionadas con el  $\text{CO}_2$ . Entre ellas destaca la última, correspondiente a la fracción molar. Para ambos casos coinciden excepto en el tramo en el que se realiza el aporte de medio. Los valores de fracción molar de  $\text{CO}_2$  para el PI son bastante mayores, los controladores por adelantado consiguen llevar el caudal de  $\text{CO}_2$  a cero más rápidamente, minimizando las pérdidas.



Con la inyección de medio se retira también una cantidad de microalgas, es por eso que la concentración de biomasa disminuye rápidamente para aumentar más tarde progresivamente a causa de la inyección realizada (Figura 4.4.3.8).

❖ Día 4/02/2014:

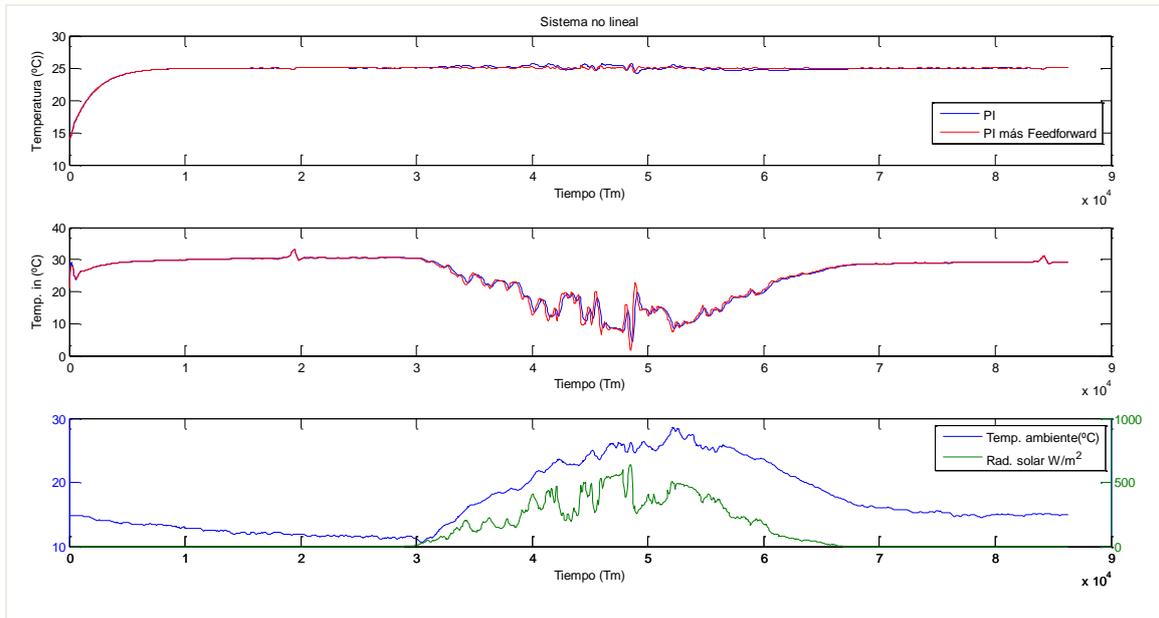


Figura 4.4.3.9. Salida de temperatura, temperatura en el intercambiador y perturbaciones de temperatura ambiente y radiación solar para el día 4/02/2014.

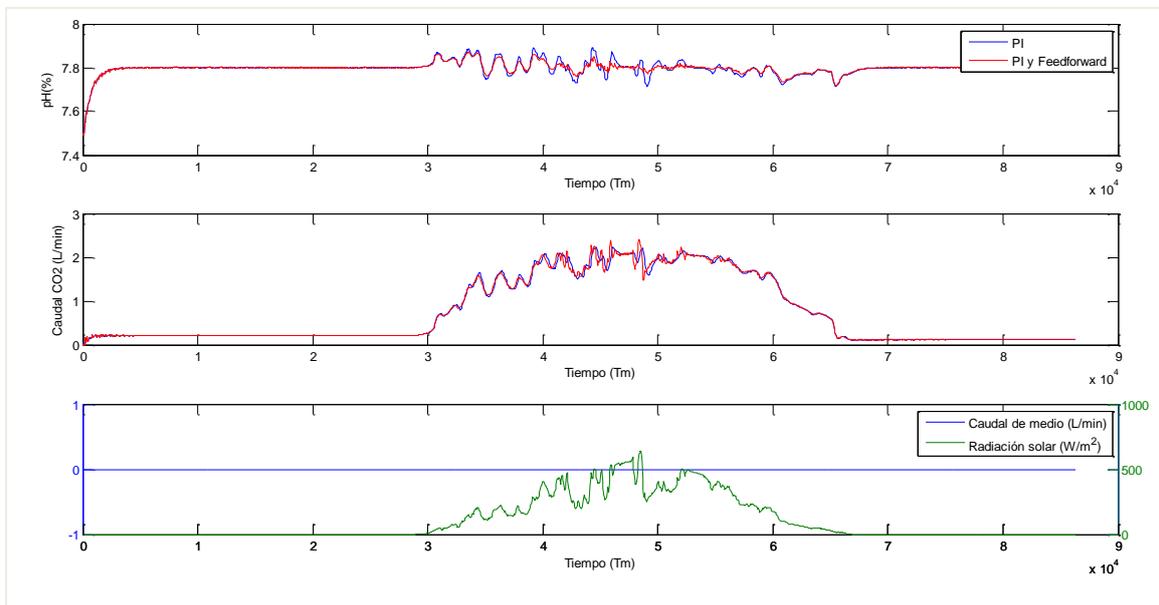


Figura 4.4.3.10. Salida de pH, caudal de CO<sub>2</sub> suministrado y perturbaciones de radiación y caudal de medio suministrado para el día 4/02/2014.

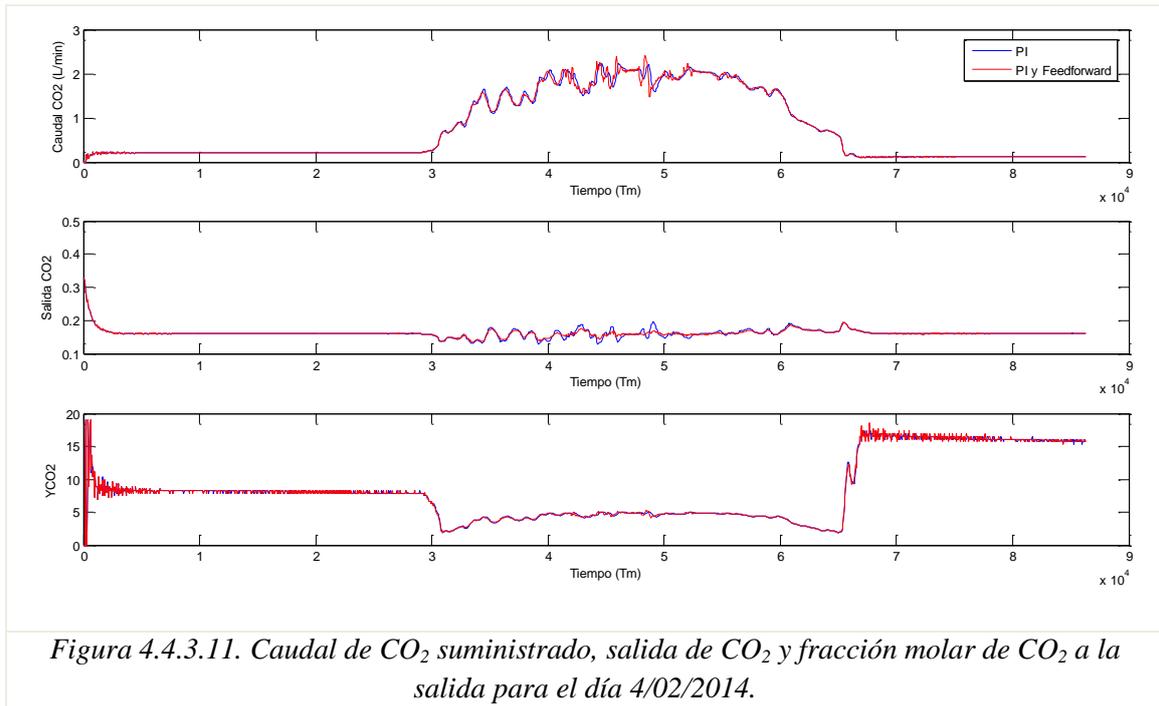


Figura 4.4.3.11. Caudal de CO<sub>2</sub> suministrado, salida de CO<sub>2</sub> y fracción molar de CO<sub>2</sub> a la salida para el día 4/02/2014.

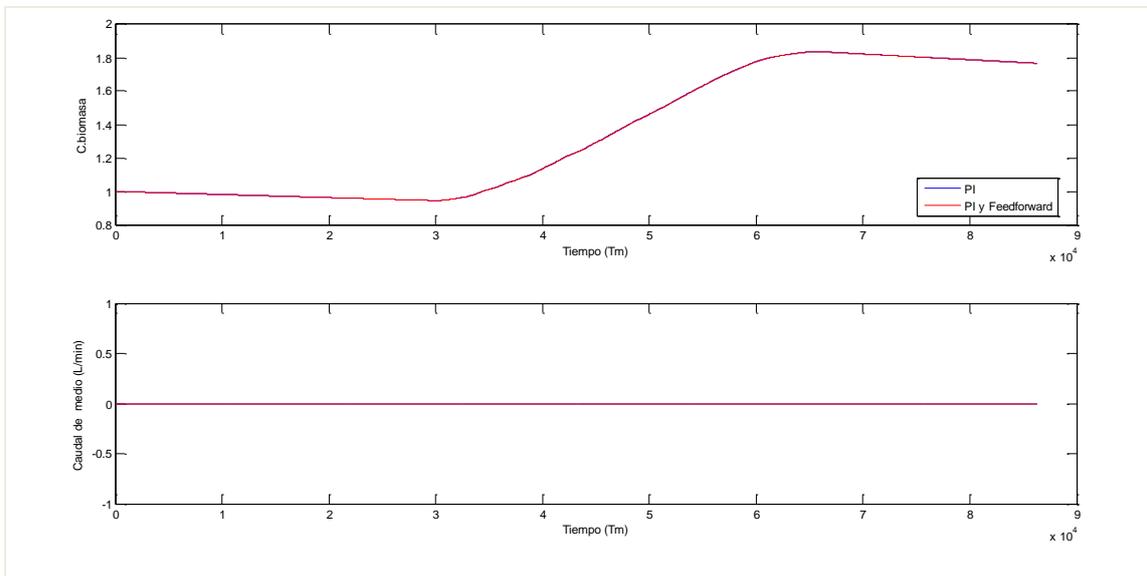


Figura 4.4.3.12. Concentración de biomasa y caudal de medio el día 4/02/2014.

Para el día 4 no se realiza aporte de medio, las diferencias son claras respecto al resto de días. El pH es mucho más estable, no presenta la perturbación causada por esta inyección y por tanto tampoco precisa de la acción del *feedforward* correspondiente. El resto de *feedforward* actúa frente a los picos de la radiación solar y de la temperatura ambiente, consiguiendo mejorar las salidas respecto al caso de control únicamente con PI.

En la figura 4.4.3.11 se observa cómo la razón molar  $Y_{CO_2}$  no presenta los cambios tan bruscos observados en el día anterior, estos cambios eran provocados por las variaciones en el medio de cultivo, los procesos de inyección y retirada ya comentados.

En cuanto a la concentración de biomasa, no disminuye, (Figura 4.4.3.12) solo aumenta pues no se ha retirado la parte de microalgas que normalmente se retira tras la inyección de medio.

❖ Día 6/02/2014:

❖

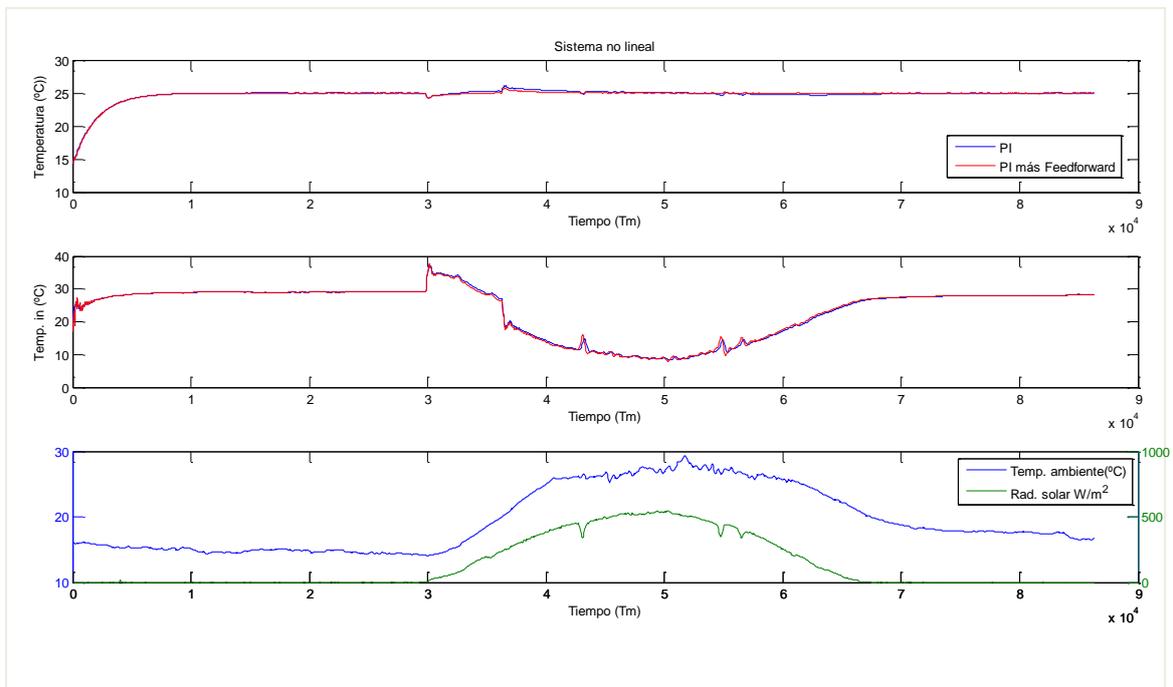


Figura 4.4.3.13. Salida de temperatura, temperatura en el intercambiador y perturbaciones de temperatura ambiente y radiación solar para el día 6/02/2014.

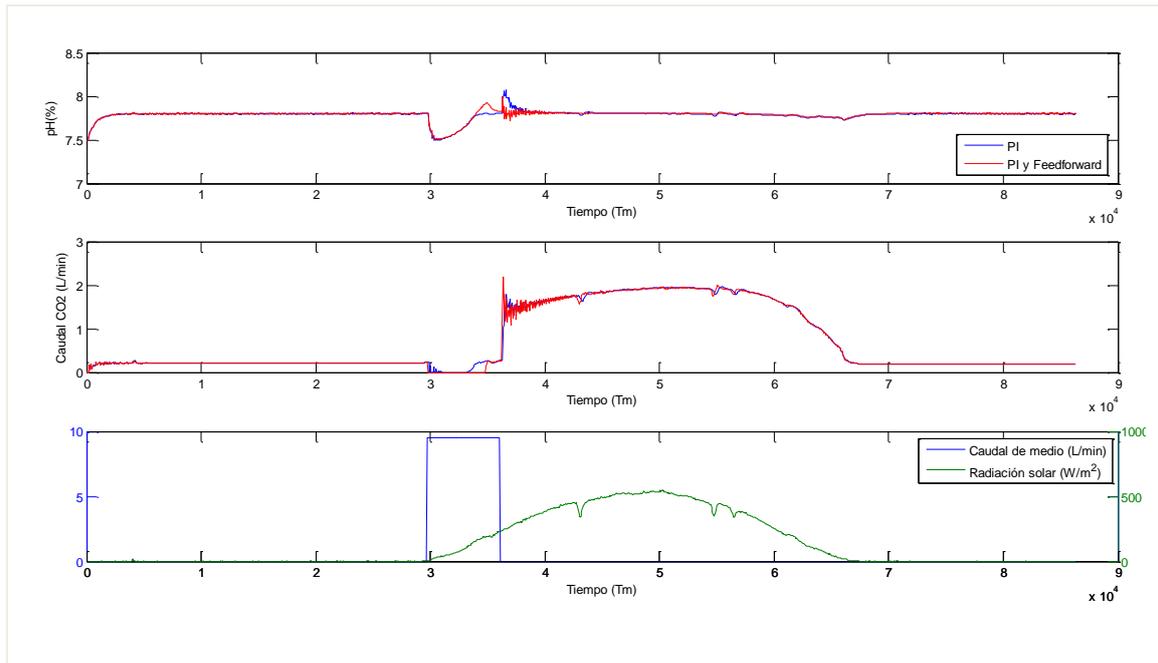


Figura 4.4.3.14. Salida de pH, caudal de  $\text{CO}_2$  suministrado y perturbaciones de radiación y caudal de medio suministrado para el día 6/02/2014.

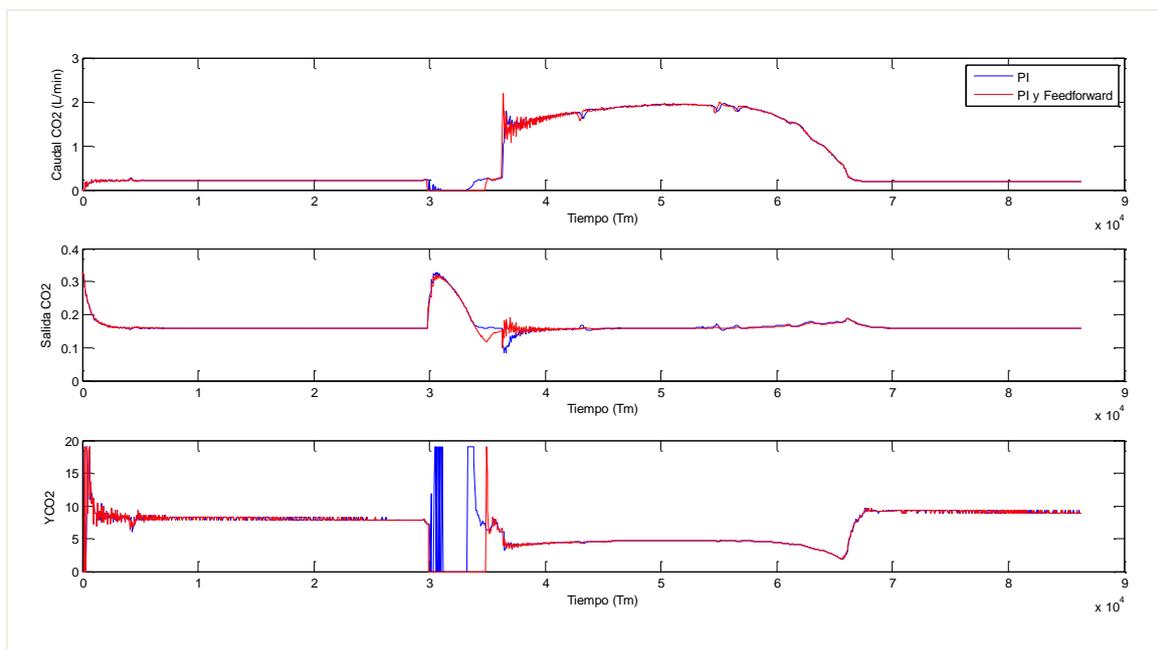


Figura 4.4.3.15. Caudal de  $\text{CO}_2$  suministrado, salida de  $\text{CO}_2$  y fracción molar de  $\text{CO}_2$  a la salida para el día 6/02/2014.

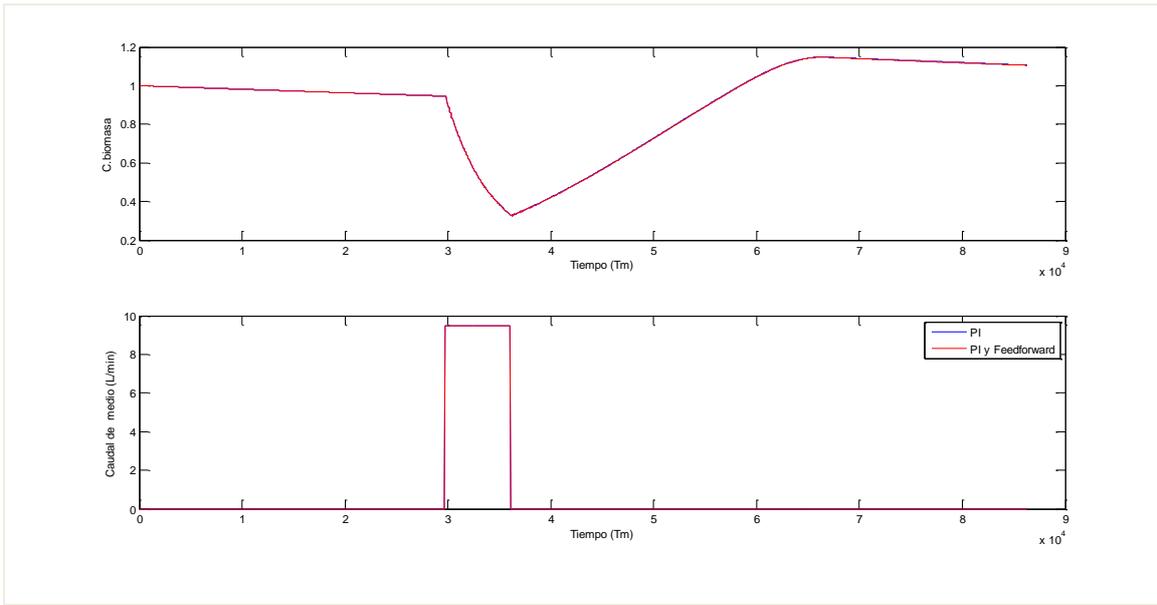


Figura 4.4.3.16. Concentración de biomasa y caudal de medio el día 6702/2014.

Para el día 6 (Figura 4.4.3.13-Figura 4.4.3.16), los resultados son similares a los del día 3. El comportamiento es el mismo pero en este caso se aprecia mejor el problema relacionado con la inyección de medio. La saturación del caudal de CO<sub>2</sub> en su límite inferior provoca un efecto integral en la salida de pH que se vemos en el pequeño pico que pronto desaparece haciendo que el pH vuelva a su valor de consigna.

❖ Día 7/02/2014:

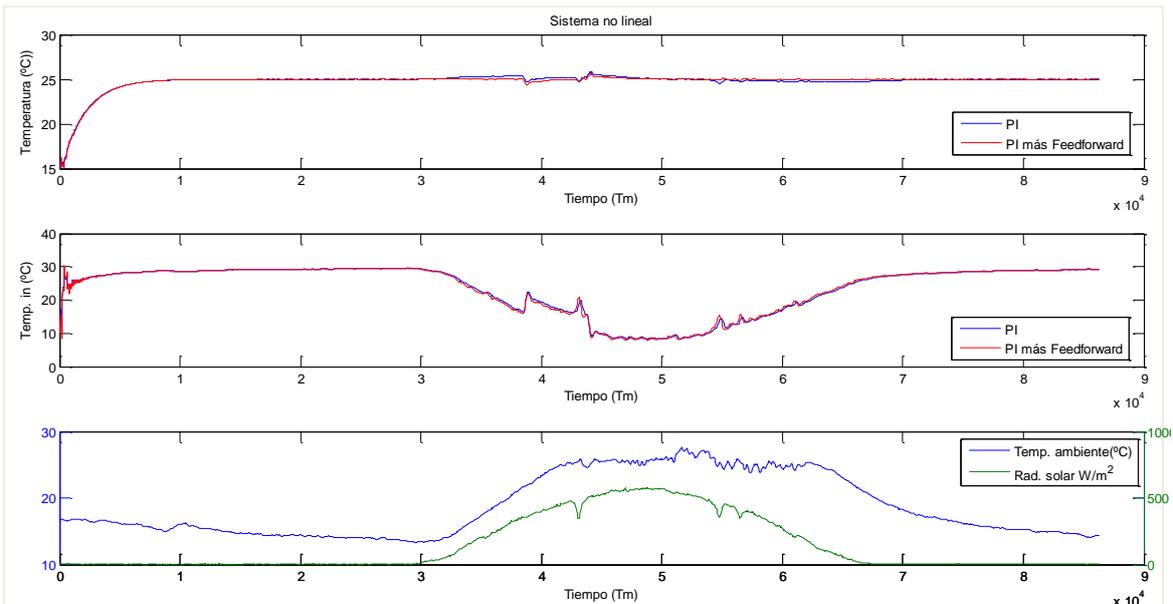


Figura 4.4.3.17. Salida de temperatura, temperatura en el intercambiador y perturbaciones de temperatura ambiente y radiación solar para el día 7/02/2014.

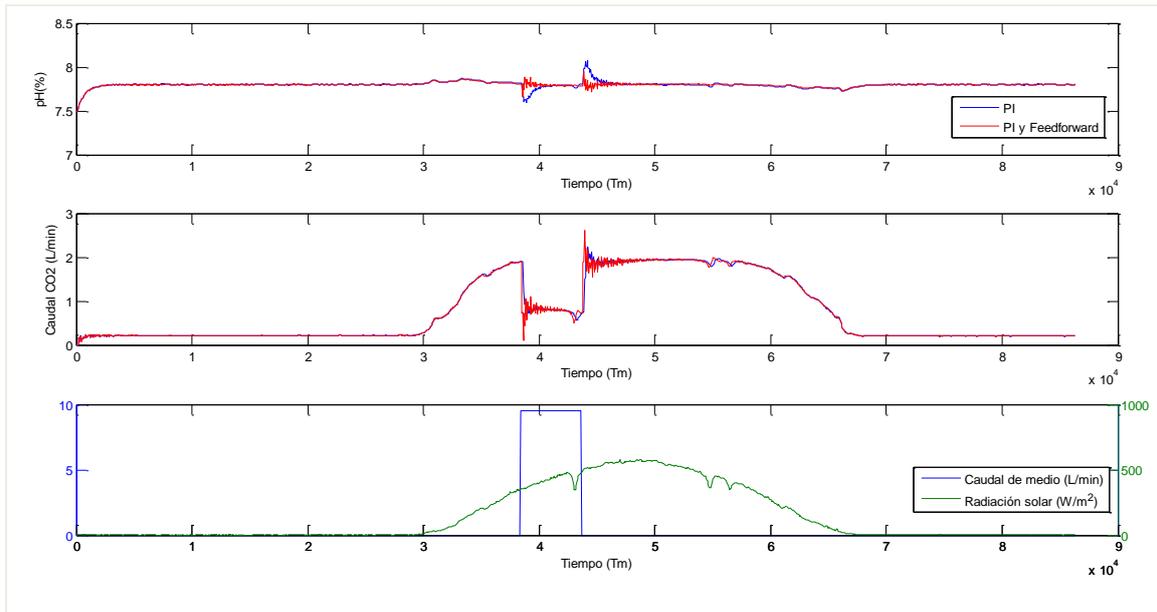


Figura 4.4.3.18.a. Salida de pH, caudal de  $\text{CO}_2$  suministrado y perturbaciones de radiación y caudal de medio suministrado para el día 7/02/2014.

A continuación se presenta la imagen anterior ampliada en el momento en el que se realiza la inyección de medio:

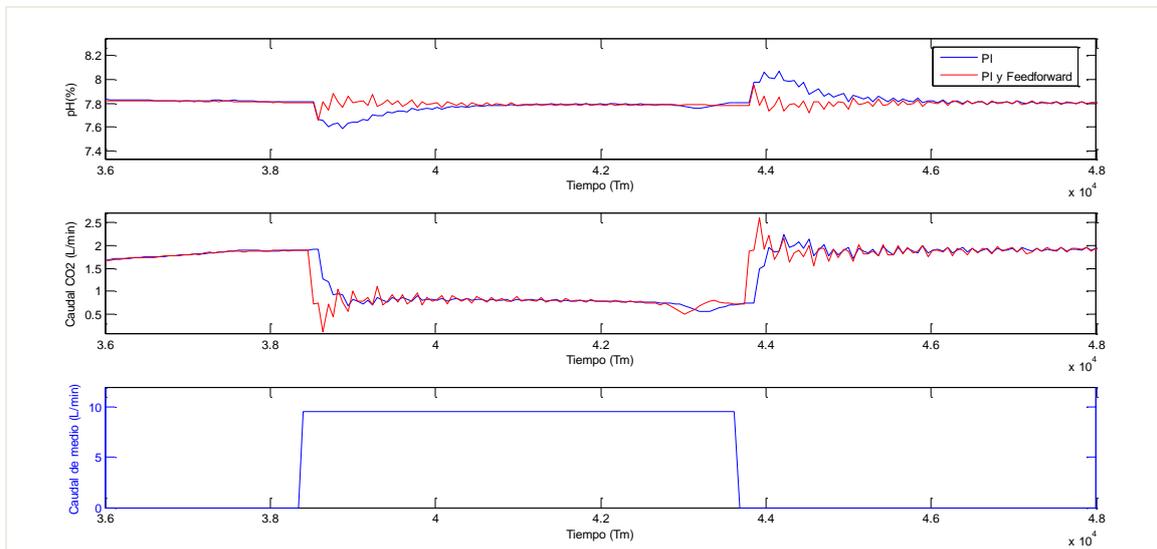


Figura 4.4.3.18.b. Gráficas ampliadas para salida de pH, caudal de  $\text{CO}_2$  suministrado y perturbaciones de radiación y caudal de medio suministrado para el día 7/02/2014.

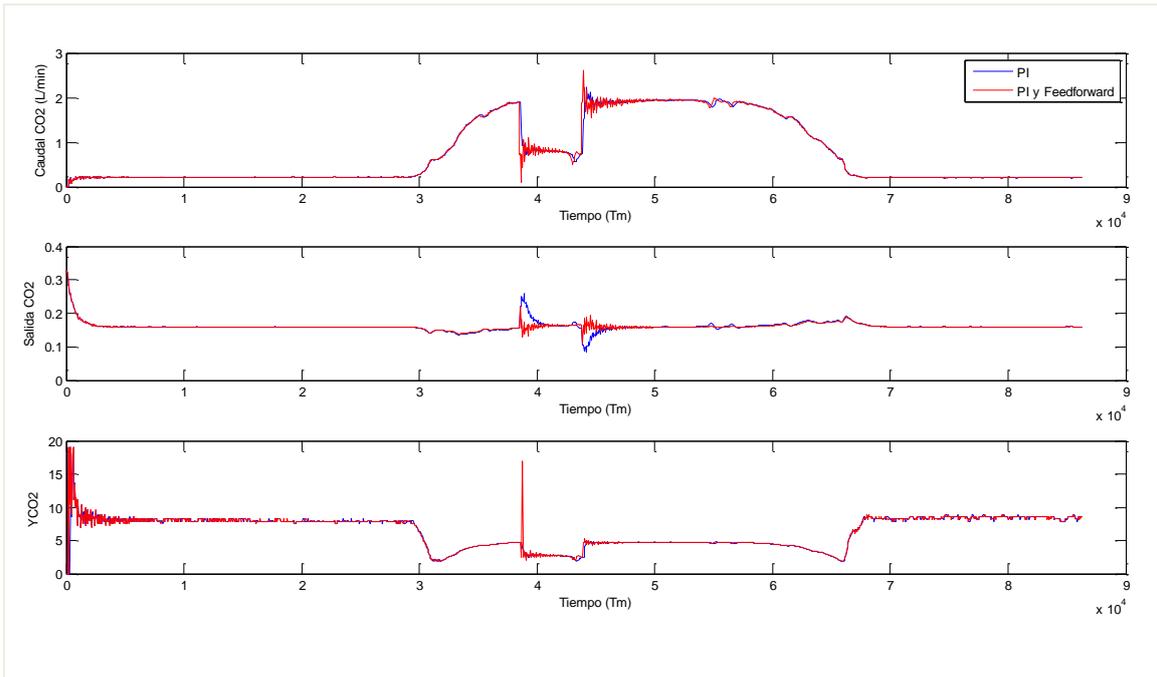


Figura 4.4.3.19. Caudal de CO<sub>2</sub> suministrado, salida de CO<sub>2</sub> y fracción molar de CO<sub>2</sub> a la salida para el día 7/02/2014.

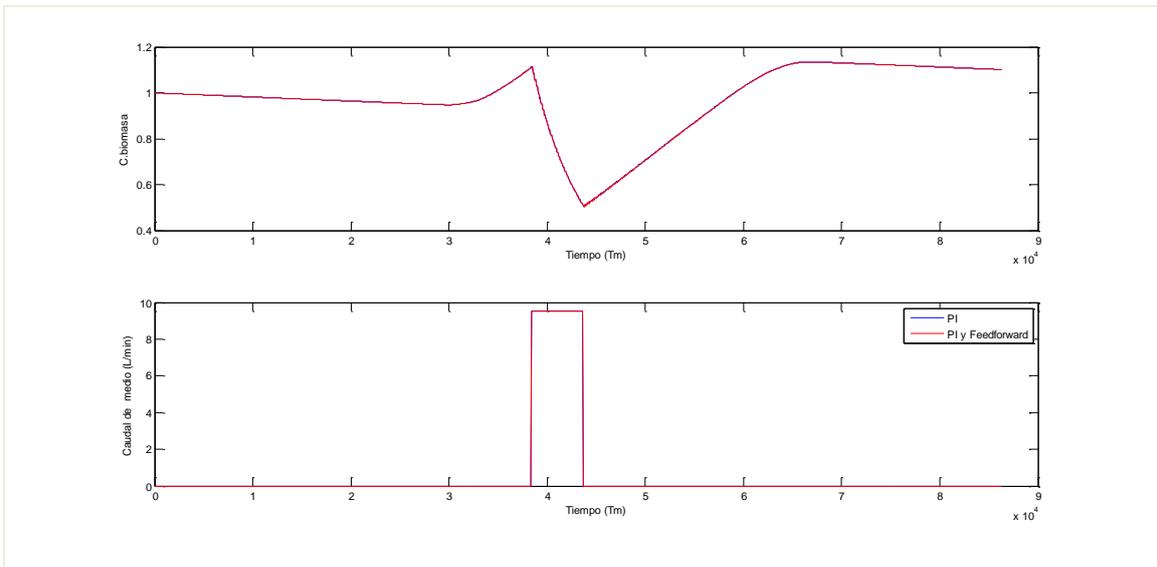


Figura 4.4.3.20. Concentración de biomasa y caudal de medio el día 7.

Para el día 7 la principal diferencia está en el momento en el que se hace la inyección de medio. Es posterior al del resto de días, se realiza cuando el caudal de CO<sub>2</sub> que se está suministrando es mayor por la presencia de la radiación solar que hace que se consuma más. Ante la perturbación del medio, la señal de control actuará disminuyendo rápidamente y tendrá más margen para hacerlo, incluso sin llegar a la saturación. Esto se traduce en una salida de pH mucho más estable, apenas se aprecian los efectos de las perturbaciones, en especial para el caso con *feedforward*, pues estos se adelantan a los del PI nada más. En la Figura 4.4.3.18.b se puede observar con detalle lo

comentado anteriormente, se ha ampliado la Figura 4.4.3.18.a en el intervalo de tiempo en el que se inyecta el medio, claramente la señal de control de la gráfica en rojo, correspondiente al esquema de control con *feedforward*, se anticipa, ante la perturbación, respecto a la azul, consiguiendo que la salida apenas perciba este efecto.

#### 4.4.4. Resultados analíticos

Se han calculado los valores de CO<sub>2</sub> inyectado y perdido en cada caso con la intención de comparar las mejoras introducidas al añadir los *feedforward*. El control todo/nada no se ha analizado porque ya existen estudios en los que se demuestran claramente las ventajas que representa el añadir controladores PI. Los cálculos que se han realizado son [6]:

- CO<sub>2</sub> inyectado: partiendo de que el CO<sub>2</sub> inyectado es puro se aplicará la ecuación de los gases ideales para obtener su densidad,  $d$  (ver ecuación 4.17):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$n = \frac{m}{P_m}$$

$$d = \frac{m}{V}$$

$$d = \frac{P \cdot P_m}{R \cdot T} \quad [\text{g/l}] \quad (4.17)$$

-P: presión de entrada del CO<sub>2</sub> al fotobiorreactor, será la suma de la presión atmosférica más la correspondiente a la columna de agua de 3 metros que hay por encima de dicha entrada. (P=1.29 atm)

-P<sub>m</sub>: peso molecular del CO<sub>2</sub> (44 g/mol)

-R: constante universal de los gases ideales (0.082 atm·l/(K·mol))

-T: Temperatura en cada instante medida en Kelvin.

La masa inyectada en cada instante será el producto de la densidad de entrada de CO<sub>2</sub> por el caudal de entrada en cada instante, QCO<sub>2</sub> [l/min]. En este caso las muestras se toman cada minuto por lo que el resultado final serán gramos. Sumando los valores obtenidos para cada minuto se obtendrá el valor total inyectado en un día (ver ecuación 4.19):

$$M_i = d \cdot QCO_2 \text{ [g]} \quad (4.18)$$

$$CO_2 \text{ inyectado}_{(día)} = \sum_{0h}^{24h} M_i \quad (4.19)$$

Para las pérdidas se ha aplicado la ecuación 4.20:

$$per = (QCO_2 \cdot YN_2) / V_{mol} \cdot YCO_2 \cdot P_m \text{ [g]} \quad (4.20)$$

- $YN_2$ : fracción molar de nitrógeno en el gas de inyección (0.05 mol $N_2$ /mol totales).

- $V_{mol}$ : volumen molar (20 l/mol).

- $YCO_2$ : razón molar de  $CO_2$  (mol $CO_2$ /mol $N_2$ ).

Para calcular el total perdido en un día bastará con sumar las pérdidas en cada minuto (ver ecuación 4.21).

$$CO_2 \text{ perdido}_{(día)} = \sum_{t=0h}^{t=24h} per \quad (4.21)$$

El  $CO_2$  consumido por tanto se calculará según la ecuación 4.22.

$$CO_2 \text{ consumido} = CO_2 \text{ inyectado} - CO_2 \text{ perdido} \quad (4.22)$$

Se han expresado las pérdidas en porcentajes para poder hacer una comparación más exacta (ver expresiones 4.23 a y b).

$$\text{Pérdidas respecto entrada de } CO_2: \frac{CO_2 \text{ perdido}}{CO_2 \text{ inyectado}} \cdot 100 \quad (4.23 \text{ a})$$

$$\text{Pérdidas respecto consumo de } CO_2: \frac{CO_2 \text{ perdido}}{CO_2 \text{ consumido}} \cdot 100 \quad (4.23 \text{ b})$$

Los resultados para los diferentes días se presentan en las siguientes tablas:

	<b>PI</b>	<b>PI+Feedforwards</b>
<b>CO<sub>2</sub> inyectado [g]</b>	2064.1	2054.8
<b>CO<sub>2</sub> perdido [g]</b>	490.28	483.62
<b>CO<sub>2</sub> consumido [g]</b>	1573.9	1571.2
<b>Pérdidas respecto entrada de CO<sub>2</sub> [%]</b>	23.75	23.53
<b>Pérdidas respecto consumo de CO<sub>2</sub> [%]</b>	31.15	30.78

Tabla 4.26. Valores de CO<sub>2</sub> inyectado, perdido y consumido el día 3/02/2014 para diferentes controladores.

	<b>PI</b>	<b>PI+Feedforwards</b>
<b>CO<sub>2</sub> inyectado [g]</b>	2465.2	2463.7
<b>CO<sub>2</sub> perdido [g]</b>	603.6723	602.75
<b>CO<sub>2</sub> consumido [g]</b>	1816.15	1860.9
<b>Pérdidas respecto entrada de CO<sub>2</sub> [%]</b>	24.49	24.46
<b>Pérdidas respecto consumo de CO<sub>2</sub> [%]</b>	32.43	32.89

Tabla 4.27. Valores de CO<sub>2</sub> inyectado, perdido y consumido el día 4/02/2014 para diferentes controladores.

	<b>PI</b>	<b>PI+Feedforwards</b>
<b>CO<sub>2</sub> inyectado [g]</b>	2343.7	2333.4
<b>CO<sub>2</sub> perdido [g]</b>	572.58	567.44
<b>CO<sub>2</sub> consumido [g]</b>	1771.2	1765.9
<b>Pérdidas respecto entrada de CO<sub>2</sub> [%]</b>	24.43	24.31
<b>Pérdidas respecto consumo de CO<sub>2</sub> [%]</b>	32.33	32.13

Tabla 4.28. Valores de CO<sub>2</sub> inyectado, perdido y consumido el día 6/02/2014 para diferentes controladores.

	<b>PI</b>	<b>PI+Feedforwards</b>
<b>CO<sub>2</sub> inyectado [g]</b>	2462.5	2456.6
<b>CO<sub>2</sub> perdido [g]</b>	570.94	570.00
<b>CO<sub>2</sub> consumido [g]</b>	1891.5	1886.6
<b>Pérdidas respecto entrada de CO<sub>2</sub> [%]</b>	23.19	23.20
<b>Pérdidas respecto consumo de CO<sub>2</sub> [%]</b>	30.18	30.20

Tabla 4.29. Valores de CO<sub>2</sub> inyectado, perdido y consumido el día 7/02/2014 para diferentes controladores.

Para los cuatro días se puede apreciar no solo cómo es necesario inyectar menor cantidad de CO<sub>2</sub> para obtener la misma cantidad de biomasa, sino que también las pérdidas son menores respecto al uso del PI sin *feedforward*. El balance es positivo, se inyecta menos y se consume más, se consigue consumir más dióxido de carbono abaratando los costes.

Los días en los que mejores resultados se obtienen son el 3 y el 6 de febrero, ambos tiene en común el momento de inyección de medio. Por otro lado, para los días 4 y 7 de febrero, el añadir controladores anticipativos hace que se precise una menor cantidad de CO<sub>2</sub>, aunque los porcentajes de pérdidas no se mejoran. Tras ver estos resultados se reafirma la importancia del estudio de las características del cultivo para cada día para determinar en qué momento es más conveniente realizar la inyección de medio.

## 5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Para toda investigación es importante la unión de diferentes disciplinas. En este caso se han unido conocimientos sobre química y biología con la automática y el control para mejorar la producción de microalgas y solucionar problemas como es el del exceso de CO<sub>2</sub> en la atmósfera.

La idea surge de la necesidad de gestionar este CO<sub>2</sub> y de buscar alternativas a los combustibles que lo producen principalmente. Partiendo de conocimientos acerca de microalgas y organismos fotosintéticos pueden plantearse ideas y proyectos para su aprovechamiento, pero será necesario realizar los estudios necesarios relacionados con otras materias que permitan llegar a una propuesta eficiente.

En este caso, para el cultivo de microalgas en fotobiorreactores industriales se han estudiado todas las condiciones que influyen en el proceso, se han tomado decisiones acerca de la localización y orientación, por la situación geográfica de Almería se dan las condiciones climatológicas ideales para esta práctica, la instalación está orientada al sur pensando en recibir el mayor número posible de horas de sol y además está en el interior de un invernadero protegida de altas intensidades de radiación perjudiciales para el cultivo.

Se han estudiado además diferentes estructuras de fotobiorreactores, cerrados, abiertos, tipo bolsa, tubulares de diferentes características, etc., para poder decidir con fundamento cuál de ellos ofrece mejores resultados. Se han considerado también los diferentes tipos de microalgas concluyendo con emplear la más apropiada. Se han ido introduciendo nuevas técnicas para mejorar el proceso como por ejemplo el uso de pequeñas partículas que con el roce mantienen limpia la superficie de los tubos. En definitiva, pequeñas aportaciones y de diferentes ramas del conocimiento han sido indispensables para lograr el actual funcionamiento de la planta.

Concretando un poco más, en este trabajo lo que se ha pretendido ha sido, a partir de anteriores experiencias y teniendo en cuenta el comportamiento y dinámica del proceso, mejorar las estrategias de control existentes, dándole un sentido real a los cálculos matemáticos realizados para su diseño.

Se ha conseguido representar el sistema mediante fórmulas matemáticas, es decir se han obtenido modelos que recogen el comportamiento real del mismo, se ha hecho además teniendo en cuenta las principales condiciones que hacen que se comporte de una manera u otra, se ha diferenciado entre el día y la noche entre otras consideraciones.

Se ha estudiado la importancia de cada una de las variables para poder elegir el esquema de control más adecuado, y una vez hecho se ha probado en el modelo lineal y en el simulador, analizando los resultados y haciendo los cambios necesarios para mejorarlos. Para el diseño de estas estrategias ha sido imprescindible conocer las características y propiedades químicas y biológicas de las microalgas y por tanto del fotobiorreactor, igualmente que para conseguir biomasa de manera productiva ha sido imprescindible la introducción del control en el sistema.

Las mejoras conseguidas se reflejan en las gráficas obtenidas y se han traducido también a cifras. Dado que uno de los principales problemas es el coste de inyección de CO<sub>2</sub> se ha intentado optimizar el funcionamiento del fotobiorreactor para conseguir reducir estos costes. Se demuestra cómo tras las medidas tomadas para ello se logra reducir la cantidad de dióxido de carbono perdido, las diferencias no son demasiado grandes pero sí suponen un ahorro importante día tras día. Todavía queda mucho por avanzar en esta tecnología, el sistema con el que se ha trabajado es un sistema complejo que permite más posibilidades de mejora. Como trabajos futuros se propone lo siguiente:

- Probar la estrategia de control propuesta en el fotobiorreactor real ya que solamente se ha trabajado con el simulador. Tras las pruebas se harían las modificaciones pertinentes.
- Estudiar más a fondo el efecto de la inyección de medio sobre la instalación real, viendo las repercusiones para el cultivo y para los valores de pérdidas de CO<sub>2</sub>.
- Trasladar este estudio a diferentes fotobiorreactores, es decir obtener modelos lineales en torno a un punto de operación para fotobiorreactores abiertos tipo *raceway* o para fotobiorreactores tipo bolsa.
- Estudiar nuevos métodos de sintonización de *feedforward* para hacerlos más eficientes.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, P., Torres, E., Herrero, C. *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidade da Coruña, ISBN 84-88301-84-7, 1995.
- [2] Aström, K.J., Hägglund, T. *Control PID avanzado*. Pearson Educación, Madrid, 2009.
- [3] Berenguel, M., F. Rodríguez, F.G. Ación, J.L. García. Model predictive control of pH in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control*, 14(4), 377-387, 2004.
- [4] Berenguel, M., Moreno, J.C. Apuntes de la asignatura *Modelado y control de sistemas continuos*. 3<sup>er</sup> curso del grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Universidad de Almería, 2013.
- [5] Berenguel, M., Guzmán, J.L. Apuntes de la asignatura *Técnicas de Control Industrial*. 4<sup>o</sup> curso del grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Universidad de Almería, 2014.
- [6] Fernández, I. *Estrategias de control para la regulación del pH en fotobiorreactores tubulares y tipo bolsa*. Trabajo Fin de Máster del Máster en Informática Industrial, 2009.
- [7] Fernández, I., Peña, J., Guzmán, J.L., Berenguel, M., Ación, F.G. *Modelling and control issues of pH in tubular photobioreactors*. 11<sup>th</sup> International Symposium on Computer Applications in Biotechnology, 186-191, Leuven, Belgium, 2010.
- [8] Fernández, I., Ación, F.G., Fernández, J.M., Guzmán, J.L., Berenguel, M. *Modelado de la producción de microalgas en fotobiorreactores tubulares*. XXXII Jornadas de Automática, Sevilla, España, 2011.
- [9] Fernández, I., Ación, F.G., Fernández, J.M., Guzmán, J.L., Magán, J.J., Berenguel, M. Dynamic model of microalgal production in tubular photobioreactors. *Bioresource Technology*, 126, 172-181, 2012.
- [10] Fundación Cajamar. Información sobre la planta experimental: <http://www.fundacioncajamar.es/es/comun/estacion-experimental-palmerillas/#> (última consulta: 01/09/2014).
- [11] Fundación Cajamar. Imágenes de la planta experimental: [http://www2.ual.es/ACUICULTURA\\_UAL\\_2010/cvgrupos.html](http://www2.ual.es/ACUICULTURA_UAL_2010/cvgrupos.html) (última consulta: 01/09/2014).
- [12] Fundación Cajamar. Dossier tecnológico P200500374. Universidad de Almería. Estación Experimental Las Palmerillas. *Nueva especie de microalga: Scenedesmus Almeriensis*. Septiembre 2012. <http://cms.ual.es/idc/groups/public/@serv/@otri/documents/documento/documento182dossiertecnolgico.pdf> (última consulta: 01/09/2014).

- [13] García, J.L., M. Berenguel, F. Rodríguez, J.M. Fernández, C. Brindley, F.G. Acién. Minimization of carbon losses in pilot scale outdoor photobioreactors by model-based predictive control. *Biotechnology & Bioengineering*, 84(5), 533-543, 2003.
- [14] Guzmán, J.L., Rodríguez, F. Apuntes de la asignatura *Automatización Industrial*. 2º curso del grado en Ingeniería Electrónica Industrial, Universidad de Almería, 2012.
- [15] MATLAB. El lenguaje de cálculo técnico. Información obtenida en: <http://www.mathworks.es/products/matlab/> (última consulta: 01/09/2014).
- [16] Sánchez, J.F., Fernández-Sevilla, J.M., Acién, F.G., Cerón, M.C., Pérez-Parra, J., Molina-Grima, E. Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: influence of irradiance, dilution rate and temperature. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), 719-729, 2008.
- [17] Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., Doyle III, F.J. *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, New York, 3<sup>rd</sup> Edition, 2010.
- [18] Skogestad, S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291-309, 2003.





El cultivo de microalgas está adquiriendo un papel muy importante en el mundo de la investigación debido a las ventajas que presenta para combatir el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y a las múltiples posibilidades de utilización en diferentes industrias. En este trabajo se estudian las características principales del cultivo de microalgas, en particular en fotobiorreactores tubulares, haciendo un análisis de las posibles mejoras que permiten obtener un funcionamiento más eficiente. Se realiza un estudio completo del control de la instalación, y atendiendo al comportamiento dinámico de la misma se diseña una nueva estrategia de control. Se comparan las pérdidas de CO<sub>2</sub> en varias situaciones concluyendo con que la estrategia implementada mejora los resultados cuando se compara con métodos tradicionales de control.

Microalgae culture is nowadays a very important research topic because of the multiple advantages it presents related to combat the increase of atmospheric carbon dioxide and for its many potential uses in different industries. The key features of the microalgae culture are studied in this project, particularly in tubular photobioreactors, analyzing possible improvements providing a more efficient operation. A complete study of the installation and the associated control system is performed. Considering the dynamic behaviour of the system, new control strategies are designed and implemented, showing a reduction of carbon dioxide losses and improvements in the dynamical performance when compared to traditional control methods.

