

UNIVERSIDAD DE ALMERIA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA

“Control robusto de procesos industriales no lineales”



Curso 2017/2018

Alumno/a:

Ángeles Hoyo Sánchez

Director/es:

José Luis Guzmán Sánchez
José Carlos Moreno Úbeda

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Control robusto de procesos industriales no lineales

Alumna: Ángeles Hoyo Sánchez
Director: José Luis Guzmán Sánchez
Codirector: José Carlos Moreno Úbeda
Fecha: Septiembre de 2018

Ángeles Hoyo Sánchez

José Luis Guzmán Sánchez

José Carlos Moreno Úbeda

Índice general

	Página
Agradecimientos	V
Dedicatoria	VII
Acrónimos	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XV
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1 Introducción	1
Introducción	1
1.1 Motivación del trabajo fin de grado	1
1.2 Interés y objetivos	2
1.3 Contexto	5
1.4 Resumen de resultados	5
1.5 Fases de desarrollo del trabajo fin de grado	7
1.6 Planificación temporal	8
2 Materiales y métodos	11
Introducción	11
2.1 Fotobiorreactores	11
2.2 Invernadero	14
2.3 Linearización por realimentación	17
2.4 Control robusto	20
2.4.1 El problema del control robusto	20

2.4.2	Teoría de la realimentación cuantitativa (QFT)	22
2.5	Control por adelanto	30
3	Implementación de las estrategias de control	33
3.1	Introducción	33
3.2	Control robusto de un fotobiorreactor industrial	33
3.2.1	Modelado	33
3.2.2	Diseño del controlador	36
3.2.3	Resultados	38
3.3	Control robusto QFT con linealización por realimentación para el control de temperatura de un invernadero	42
3.3.1	Modelado	43
3.3.2	Diseño del controlador	49
3.3.3	Resultados	52
3.4	Controlador PI robusto en un esquema de control con feedforward	54
3.4.1	Ejemplo numérico	58
4	Conclusiones y futuros trabajos	65
	Referencias	70

Agradecimientos

*Al Director **Dr. José Luis Guzmán Sánchez** y Codirector **Dr. José Carlos Moreno Úbeda** por todo lo que me han enseñado y motivado.*

*A la **Escuela Superior de Ingeniería** de la **Universidad de Almería**, al grupo de **Automática Robótica y Mecatrónica (ARM)** y a todo el profesorado que ha intervenido en mi formación.*

*A la los proyectos de investigación que han permitido el desarrollo de este trabajo. **Modelado y Control del proceso combinado de producción de microalgas y tratamiento de aguas residuales con reactores industriales (CALAREIS). DPI2017-84259-C2-1-R** y **Proyecto PROBIOREN: Control and optimization for the biomass production from microalgae as renewable energy source del Plan Nacional DPI2014-55932-C2-1-R del Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos FEDER.***

A todos ellos, gracias.

Dedicatoria

*El presente trabajo de investigación está dedicado a mi familia la cual me ha acompañado siempre. A mi madre **Ángeles** por ser el mejor ejemplo de trabajo, independencia y fortaleza que he podido seguir; a mi hermana **Irene** por apoyarme a 1000 km de distancia; a mi hermano **Gregorio** que, juntos estos dos años, hemos conseguido todo lo que nos hemos propuesto y a mi padre **Félix** por motivarme con tu frase “la recompensa, con esfuerzo, siempre llega.”*

*A **Laura, Marta, Melina, María del Mar y Juanca**. Gracias por compartir mucho más que horas de estudio en estos dos años. Habéis sido lo mejor del máster tanto dentro como fuera.*

*Y a **Guille**, que me has animado y apoyado celebrando los éxitos junto a mí en cada paso del máster.*

Acrónimos

ESI	Escuela Superior de Ingeniería
FL	Linealización por realimentación Feedback Linearization
FF	Control por adelanto Feedforward
PID	Proporcional Integral Derivativo Proportional Integral Derivative
QFT	Teoría de la Realimentación Negativa Quantitative Feedback Theory
UAL	Universidad de Almería

Índice de figuras

1.1	Fotobiorreactor raceway. Las Palmerillas.	3
1.2	Invernadero. Las Palmerillas.	3
1.3	Esquema clásico de control FF.	4
1.4	Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=7.9	6
1.5	Ensayo de control en el invernadero.	6
1.6	Simulación en el dominio del tiempo para el controlador robusto diseñado. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos	7
1.7	Simulación en el dominio del tiempo para el controlador propuesto por [11]. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos.	7
2.1	Esquema de un fotobiorreactor Raceway	12
2.2	Fotobiorreactor industrial raceway	13
2.3	Esquema de control del invernadero	15
2.4	Invernadero de las Palmerillas	17
2.5	Sistema de realimentación con dos grados de libertad	23
2.6	Ejemplo de fronteras y ajuste de la función de transferencia de lazo abierto en QFT.	25
2.7	Ejemplo de las plantillas en QFT.	25
2.8	Ejemplo de ajuste del filtro en QFT.	26
2.9	Especificaciones en el dominio del tiempo.	27
2.10	Ejemplo sistema de primer orden	29
2.11	Esquema de control clásico con feedforward.	30
3.1	Relación pH y productividad	34
3.2	Validación del modelo. En rojo el modelo resultante.	35
3.3	Plantillas (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).	37

3.4	Ajuste de L_0 , fronteras de estabilidad y seguimiento (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).	38
3.5	Validación de las especificaciones de seguimiento de referencia.	39
3.6	Validación de las especificaciones de estabilidad.	39
3.7	Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=8.3	40
3.8	Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=7.9	41
3.9	Ensayo día nublado para para un valor inicial de pH=8.3	41
3.10	Ensayo día nublado para para un valor inicial de pH=7.9	42
3.11	Ensayo en lazo abierto en el invernadero.	48
3.12	Validación del modelo del invernadero.	49
3.13	Plantillas para las frecuencias en W	50
3.14	Fronteras de estabilidad y rechazo a perturbaciones, y ajuste de la función nominal en bucle abierto.	51
3.15	Validación de la especificación de estabilidad (Margen de fase de 45°). . .	51
3.16	Validación para el rechazo de perturbaciones en la entrada.	52
3.17	Ensayo de control el primer día.	53
3.18	Ensayo de control el segundo día.	53
3.19	Ensayo control el tercer día.	54
3.20	Secciones de corte para el problema de regulación para $FF = 0$ (rojo) y para $FF \neq 0$ (azul) para $\omega = 1$ rad/s y $phase(L_0(j\omega)) = -100$ grados. Se muestran dos especificaciones, para $\delta_{dB} = -20$ (-) y $\delta_{dB} = -10$ (-).	57
3.21	Comparación de la frontera para el problema de regulación para $FF = 0$ (rojo) and for $FF \neq 0$ (azul) for $\omega = 1$ rad/s and $phase(L_0(j\omega)) = -100$ grados y para la especificación $\delta_{dB} = -10$	58
3.22	Término a la derecha de la ecuación (3.35) con $FF = 0$ (*) y con $FF \neq 0$ (-) para los modelos nominales P_u^0 con $k_u = 1$ y $\tau_u = 10$ y P_d^0 con $k_d = 3$ y $\tau_d = 11$	60
3.23	Término a la derecha de la ecuación (3.35) con $FF = 0$ (*) and with $FF \neq 0$ (-) para los modelos nominales P_u^0 con $k_u = 10$ y $\tau_u = 1$ y P_d^0 con $k_d = 3$ y $\tau_d = 11$	60
3.24	Plantillas para $\omega \in \{0,1,1,10,100\}$ rad/s	61
3.25	Ajuste del lazo abierto nominal y fronteras de estabilidad y de rechazo a perturbaciones teniendo en cuenta el FF.	62
3.26	$T_{dy}(j\omega)$ especificación y función de transferencia con incertidumbre	62
3.27	$T(j\omega)$ especificación y función de transferencia con incertidumbre	63
3.28	Simulación en el dominio del tiempo para el controlador robusto diseñado. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos	63

3.29 Simulación en el dominio del tiempo para el controlador propuesto por [11]. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos. 64

Índice de tablas

1.1	Actividades previstas durante el proceso de ejecución del TFM	8
1.2	Planificación temporal	9

Resumen

Desde un punto de vista de control procesos, los problemas de control más comunes en la industria son relativos al problema de regulación o rechazo a perturbaciones y al diseño de estrategias de control robustas que permitan tener en cuenta las posibles fuentes de error del sistema.

Como es bien conocido, la inmensa mayoría de los procesos industriales presentan dinámicas no lineales que vienen dadas por un comportamiento no lineal intrínseco del sistema o por el empleo de actuadores con no linealidades tales como histéresis o zona muerta, lo que resulta en modelos no lineales del sistema de alta complejidad. Generalmente, a la hora de diseñar estrategias de control, dichos modelos son linealizados alrededor del punto de operación obteniendo modelos lineales simplificados de bajo orden que faciliten la etapa de sintonía de los controladores. Dichas aproximaciones lineales (bien sea a través de un proceso de linealización matemático o mediante ensayos en lazo abierto en torno al punto de trabajo) suelen generar errores de modelado especialmente cuando el sistema se aleja del punto de operación. Es por ello que se requiere el uso de estrategias de control robustas para tener en cuenta dichas incertidumbres en la etapa de diseño del esquema de control. Otra solución típica en la industria para acometer las no linealidades de los procesos es el uso de las técnicas de linealización por realimentación, que mediante un cambio de variable permiten de forma relativamente sencilla aproximar el comportamiento del sistema a una dinámica lineal. Sin embargo, esta estrategia requiere de modelos no lineales del proceso muy precisos que hacen que esta idea matemática no pueda llevarse a la práctica de forma exacta y las cancelaciones que se suponen en la teoría no sean efectivas debido a las discrepancias del modelo con el proceso real y al origen exógeno de las perturbaciones. Debido a este motivo, es habitual capturar estos errores como incertidumbre en los parámetros sobre el modelo lineal que se obtiene de la combinación de la linealización por realimentación con el proceso, haciendo uso posteriormente de estrategias de control robusto para considerar las mismas.

Por otro lado, las perturbaciones de carga son señales de baja frecuencia que afectan al proceso y alejan al sistema del punto de operación deseado. La reducción eficiente del efecto de las perturbaciones de carga es un tema clave en el control de procesos. Las perturbaciones pueden ser compensadas por el controlador de realimentación, pero la principal consecuencia de esta estrategia es que dicho controlador tiene que ser sintonizado para rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia al mismo tiempo. El control por adelanto proporciona una solución para tratar con el rechazo a perturbaciones de forma independiente aportando acciones de control en el mismo momento que el que la perturbación afecta a la salida del proceso. El compensador por adelanto ideal se forma como las dinámicas negativas entre la salida del proceso y la perturbación divididas por las dinámicas entre la salida del proceso y la señal de control. Este compensador ideal puede no ser realizable debido a un retardo negativo, polos en el semiplano derecho, o comportamientos de fase no-mínima. Sin embargo, incluso en el caso ideal de inversión, es posible que el rechazo de perturbaciones no sea efectivo debido a la presencia de incertidumbre en el proceso. Este hecho ha sido muy poco estudiado en la literatura donde el diseño de los controladores por adelanto son fundamentalmente nominales. Es por ello que resulta interesante abordar el análisis de robustez del problema y el diseño de soluciones de control robustas para el mismo.

De esta forma, en este TFM se pretende hacer uso de las ideas de modelado y control no lineal y robusto comentadas anteriormente para resolver los problemas de control asociados a un fotobiorreactor industrial y a un invernadero. Además, se propone una nueva idea diseño robusto para el esquema clásico de control por adelanto.

Palabras clave: *Control no lineal, control robusto, modelado de sistemas dinámicos y control por adelanto.*

Abstract

From a process control point of view, the most common problems in industry are the ones related to the regulation or disturbance rejection problem and the design of control strategies that allow taking into account possible system error sources.

As it is known, the vast majority of the industrial processes present no lineal dynamics which can be because there is a no lineal behaviour intrinsic within the system or because of the use of actuators with no linealities such as hysteresis or dead zone. That results in non lineal models with a high complexity.

Normally, when designing control strategies, those models are linealized around the operation point obtaining simplified lineal models of low order that eases the tuning stage of the controllers. These lineal approximations (either by a mathematic linealizing process or by tests on open loop system to the set point) usually generate modelling errors specially when the system is far from the operating point. This is why it is required the use of strong control strategies that take into account these mistakes in the design stage of the control scheme. Another typical solution in the industry is to study the no linearities of the processes and use feedback linearization. By a change of variable it allows in a relatively easy way approximate the no lineal system behaviour to a lineal dynamic. However, this strategy requires very precise non-linear process models and makes this mathematical idea not possible to be implemented in an exact way.

On the other hand, load disturbances are low frequency signals that affect the process and move the system away from the desired operating point. The efficient reduction of their effect is a key issue in process control. The disturbances can be compensated by the feedback controller. The feedforward control provides a solution to deal with the disturbances rejection independently by providing control actions at the same time as the disturbance affects the output of the process. The ideal advance compensator is formed as the negative dynamics between the process output and the disturbance divided by the dynamics between the process output and the control signal. This ideal

compensator may not be realizable due to a negative delay, poles in the right half-plane, or non-minimum phase behavior. However, even in the ideal case of investment, it is possible that the rejection of disturbances is not effective due to the presence of uncertainty in the process. This fact has been very little studied in the literature where the controllers design by advance are fundamentally nominal. That is why it is interesting to address the robust analysis of the problem and the design of robust control solutions for it.

In this way, this TFM aims to make use of the non-linear and robust modeling and control ideas discussed above to solve the control problems associated with an industrial photobioreactor and a greenhouse. In addition, a new robust design idea is proposed for the classic advance control scheme.

1

Introducción

Introducción

En las enseñanzas superiores el Trabajo Fin de Máster (TFM) supone un objetivo clave a través del cual se pretende mostrar el conocimiento adquirido durante los dos cursos que componen el Máster en Ingeniería Industrial. En el ámbito de la ingeniería se ofrecen tres modalidades (Proyecto Técnico, Trabajo Técnico o de Investigación), a través de las cuales es posible desarrollar diferentes tipos de trabajos que engloban las enseñanzas que comprende la ingeniería.

Afrontar un proyecto de tal magnitud exige un nivel de competencia alto, suponiendo un reto para el alumnado. A la hora de enfrentarse a este trabajo se debe tener en cuenta, en primer lugar, la temática sobre la cual se va a desarrollar. En este tipo de estudio debe primar el interés teórico-práctico que aporta a los diferentes campos de la ingeniería Industrial. Además, debe cuidar el formato ya que supone uno de los aspectos más importantes de cara a futuros proyectos laborales para los que se forma al alumnado durante sus estudios. Para el correcto desarrollo de este trabajo y sus consiguientes resultados con garantía de éxito, es esencial planificar los objetivos y la metodología a usar, teniendo en cuenta el contexto en el cual se va a trabajar, cumpliendo con el propósito de nuestro estudio.

1.1. Motivación del trabajo fin de grado

La mayoría de procesos industriales presentan dinámicas no lineales provenientes de diferentes partes del sistema. Generalmente, a la hora de diseñar estrategias de control, dichos modelos son linealizados alrededor del punto de operación obteniendo modelos lineales simplificados de bajo orden que faciliten el proceso de sintonía de los controlado-

res [2]. Dichas aproximaciones lineales generan errores de modelado sobre todo cuando el sistema se aleja del punto de operación. Es por ello que el uso de estrategias de control robusto en estos sistemas es importante para conseguir alcanzar las especificaciones. Del mismo modo, la presencia de perturbaciones hace que el sistema a controlar se aleje del punto de operación deseado. Por tanto, se requiere el estudio de esquemas de control que permitan reducir sus efectos, sin dejar de pensar en las posibles incertidumbres que estas también puedan tener a la hora de obtener sus modelos. Con el fin de validar las estrategias de control planteadas se utilizarán un fotobiorreactor industrial y un invernadero para el control del pH y la temperatura interior respectivamente. Otro elemento muy utilizado en las estrategias de control a nivel industrial para el rechazo a perturbaciones es el control feedforward. Se diseñará un controlador robusto en el esquema clásico del feedforward para el caso en el que tanto el modelo de la perturbación como el de la planta posean incertidumbre.

1.2. Interés y objetivos

Plantear soluciones de control robusto relacionadas con los problemas de sistemas con incertidumbre en sus parámetros y control de las perturbaciones. Para ello se resolverán tres problemas principales utilizando QFT como metodología de diseño del control robusto.

En primer lugar, se presenta el control del pH de un fotobiorreactor industrial, donde un controlador PID robusto es diseñado para tener en cuenta la incertidumbre del proceso alrededor del punto de trabajo deseado. Este controlador utilizado (Figura 1.1) se encuentra en la Estación Experimental Las Palmerillas (Fundación Cajamar). En base a los modelos obtenidos se diseña un controlador robusto con la Teoría de la Realimentación Cuantitativa, en inglés, Quantitative Feedback Theory (QFT) y se validan los resultados sobre el simulador no lineal del proceso [9].

En segundo lugar, se presenta la combinación de las técnicas de linealización por realimentación, en inglés, Feedback Linearization (FL) con QFT para el control de la temperatura interior de un invernadero. El esquema de FL se utiliza en primera instancia para linealizar el proceso en línea y atenuar el efecto de las perturbaciones, pero debido a la alta complejidad del sistema el modelo lineal resultante presenta incertidumbre y por tanto se utiliza QFT para compensar este efecto. El invernadero utilizado (Figura 1.2) se encuentra en La Estación Experimental Las Palmerillas (Fundación Cajamar).

Finalmente, se realiza un estudio de la presencia de incertidumbre en el diseño de un



Figura 1.1: Fotobiorreactor raceway. Las Palmerillas.



Figura 1.2: Invernadero. Las Palmerillas.

esquema de control por adelanto clásico (Figura 1.3) , donde un controlador PI basado en QFT es diseñado para compensar el efecto de los errores de modelado en el diseño del controlador feedforward.

A continuación se muestran las fases de desarrollo del trabajo.

1. Estudio bibliográfico.

Se realiza una búsqueda bibliográfica sobre control de sistemas no lineales y las diferentes técnicas para abordar el problema.

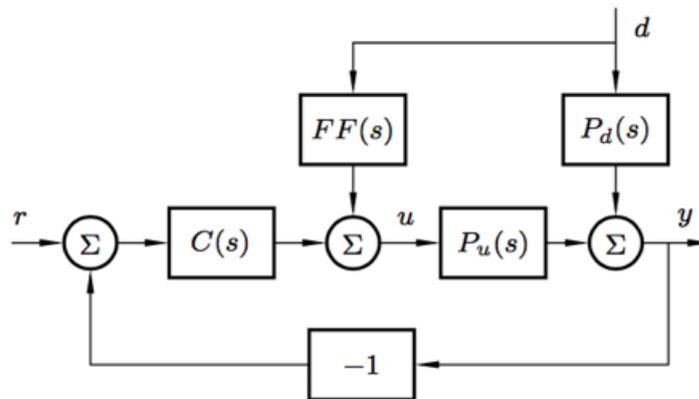


Figura 1.3: Esquema clásico de control FF.

2. Estudio de los sistemas industriales reales a controlar.

Basándose en estudios realizados por otros investigadores y visitas a las plantas reales se hace un estudio de las plantas. Se observa su funcionamiento en detalle, tomando datos del mismo.

3. Obtención de modelos de los sistemas reales.

Los modelos de los sistemas se pueden obtener mediante ecuaciones no lineales estudiando su dinámica, o con ensayos en lazo abierto al sistema. Los modelos se pueden utilizar para obtener el controlador y probarlo y ajustarlo directamente en el simulador antes de llevarlo al sistema real.

4. Diseño de estrategias de control para cada sistema.

Una vez obtenidos los modelos de las plantas, se procede al diseño del controlador más adecuado para cada caso.

5. Implementación del controlador.

Se implementa el controlador en simulación o en la planta real.

6. Resultados y conclusiones.

Con los resultados obtenidos se desarrollan las conclusiones de si la implementación de estas estrategias de control en dichas plantas es la idónea.

7. Elaboración de la memoria.

Para finalizar el proyecto se realizará la memoria del TFM, explicando detalladamente los pasos realizados anteriormente.

1.3. Contexto

Este TFM se enmarca en el campo de la Automática, modelado de sistemas no lineales, control de procesos industriales y diseño de estrategias de control robusto. Se ha desarrollado en el marco de los proyectos de investigación:

- Proyecto PROBIOREN: Control and optimization for the biomass production from microalgae as renewable energy source DPI2014-55932-C2-1-R.
- Modelado y Control del proceso combinado de producción de microalgas y tratamiento de aguas residuales con reactores industriales. DPI2017-84259-C2-1-R.

1.4. Resumen de resultados

El controlador robusto se ha implementado en los tres casos estudiados, obteniendo resultados satisfactorios.

Primero se ha realizado el control del pH de un fotobiorreactor industrial. El controlador se diseña mediante QFT teniendo en cuenta la incertidumbre recogida en el modelo. Finalmente se implementa en simulación obteniendo resultados como los que muestra la Figura 1.4. Aquí se muestra un ensayo del controlador en un día soleado.

En segundo lugar, combinando FL con QFT para el control de la temperatura interior de un invernadero, se obtienen resultados como los que muestra la Figura 1.5 (ensayo en la planta real).

Finalmente, en el estudio de la presencia de incertidumbre en el diseño de un esquema de control por adelanto clásico se ha diseñado un controlador PI basado en QFT que como muestran las Figuras 1.6 y 1.7 puede incluso mejorar el rechazo a las perturbaciones frente al caso nominal.

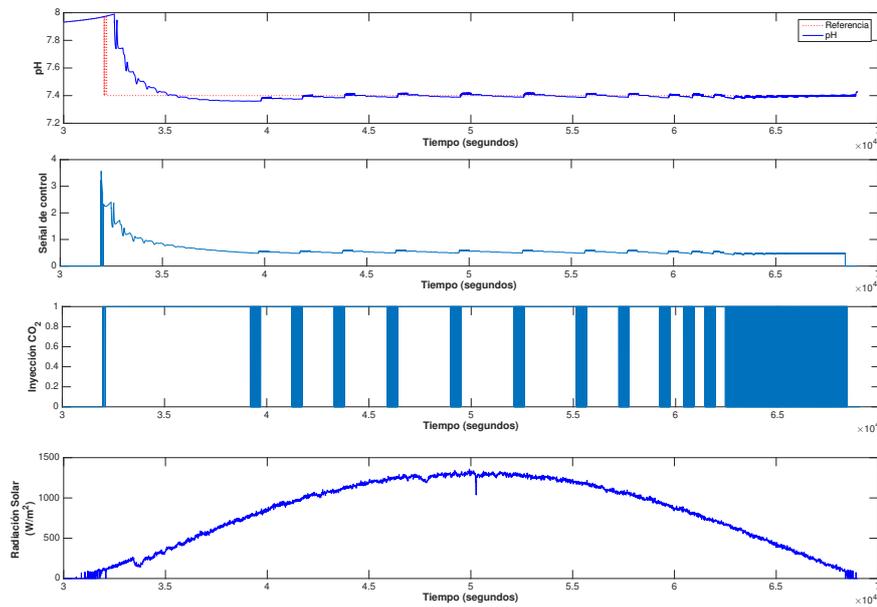


Figura 1.4: Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=7.9

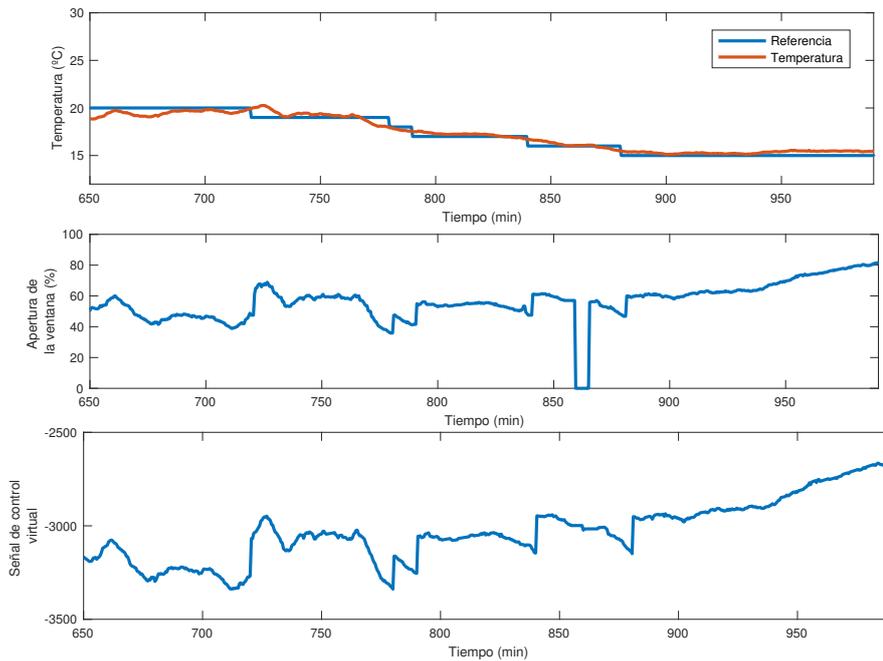


Figura 1.5: Ensayo de control en el invernadero.

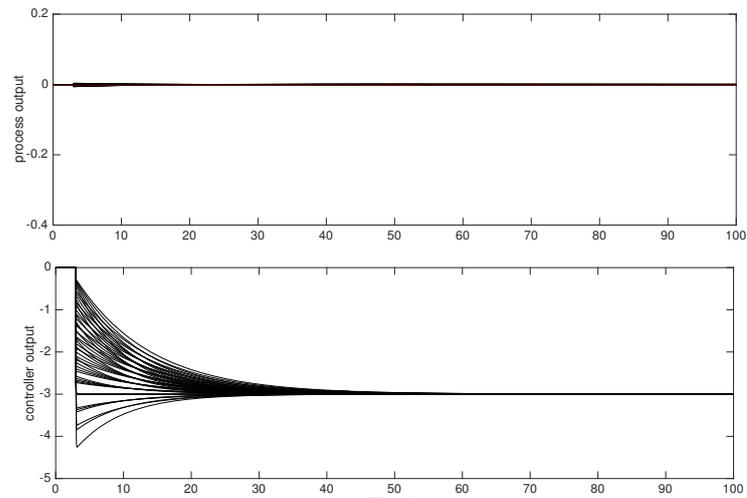


Figura 1.6: Simulación en el dominio del tiempo para el controlador robusto diseñado. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos

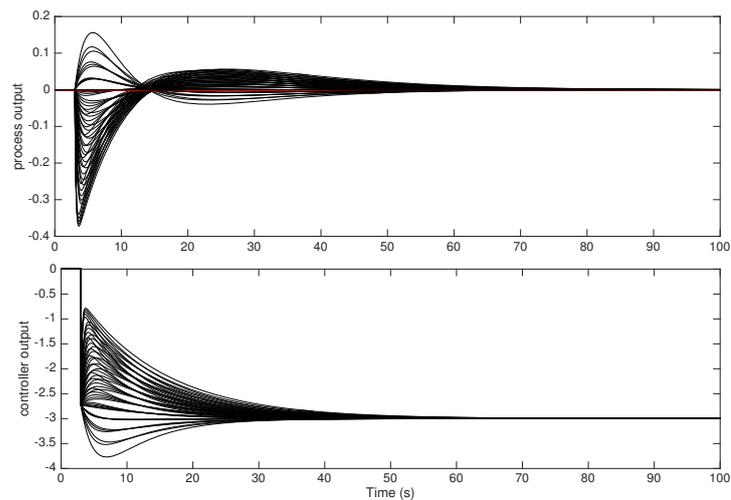


Figura 1.7: Simulación en el dominio del tiempo para el controlador propuesto por [11]. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos.

1.5. Fases de desarrollo del trabajo fin de grado

Los resultados presentes en la Sección 1.4 son consecuencia de la ejecución sistemática de una serie de tareas, en diferentes fases y con una determinada planificación, durante aproximadamente seis meses de trabajo. A continuación, se muestra la Tabla (1.1) con el desglose de las actividades realizadas para la conclusión del TFM:

<i>Actividades</i>	<i>Descripción</i>
A	Estudio bibliográfico.
B	Estudio de los sistemas industriales reales a controlar.
C	Obtención de modelos de los sistemas reales.
D	Diseño de estrategias de control para cada sistema.
E	Implementación del controlador.
F	Resultados y conclusiones.
G	Análisis e interpretación de los resultados obtenidos.
H	Creación de plantilla para el TFG en $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$
I	Redacción del documento final

Tabla 1.1: Actividades previstas durante el proceso de ejecución del TFM

1.6. Planificación temporal

La planificación detalla por semanas, meses y actividad se detalla en la tabla 1.2. Destacar que el cómputo de horas totales excede levemente el establecido de 300 horas según la normativa de la Universidad de Almería.

Tabla 1.2: Planificación temporal

Año	Mes	Semana Actividad	2018												Total Semana	Total Mes
			A	B	C	D	E	F	G	H	I					
Marzo		1	10	5											15	58
		2	10	2											12	
		3	10	3	2										13	
		4	10	1	4										15	
Abril		5			10										10	50
		6			10	4									14	
		7				15									15	
		8				10	3								13	
Mayo		9					15								15	55
		10					15								15	
		11					15								15	
		12					15								15	
Junio		13						12	2						14	54
		14						4	6						10	
		15							15						15	
		16							15							
Julio		17							10						10	54
		18							10	6					16	
		19									12				12	
		20									16				16	
Agosto		21									20				20	97
		22									22				22	
		23									25				25	
		24									30				30	
Total Horas		Por Actividad	40	11	26	29	58	16	58	6	125	6	58	16	368	

2

Materiales y métodos

Introducción

2.1. Fotobiorreactores

Los fotobiorreactores raceway han sido estudiados desde 1950 con el fin de aportar una solución para el cultivo de microalgas a escala industrial. Hoy en día, debido a su escalabilidad y su factibilidad, son considerados como la tecnología más adecuada para el cultivo industrial de micoralgas. La popularidad de los reactores raceway viene dada de su bajo coste de inversión inicial cuando son comparados con otras tecnologías, como los fotobiorreactores tubulares, los cuales requieren estructuras y equipos más complejos. Otras ventajas relevantes del reactor raceway son la simplicidad de operación y sus bajos costes de mantenimiento [41].

Las tres partes más importantes de un fotobiorreactor raceway, como muestra la Figura 2.1 son:

1. Palas.
2. Sumidero.
3. Lazo.

Numerosos estudios se han centrado en la selección óptima del diseño y configuración de los fotobiorreactores raceway para conseguir que las microalgas crezcan en las mejores condiciones. Actualmente, existen diversos diseños de fotobiorreactores raceway que varían ligeramente del diseño original propuesto por Oswald y Golueke

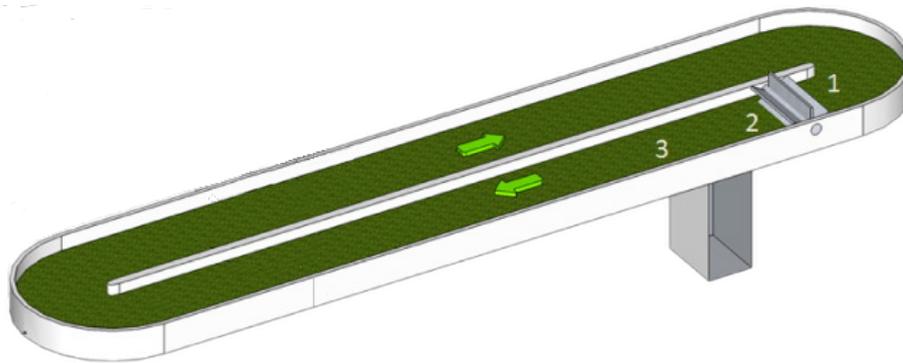


Figura 2.1: Esquema de un fotobiorreactor Raceway

[26], el cual aseguraba las condiciones óptimas de crecimiento. A pesar de la gran cantidad de diseños de la estructura del fotobiorreactor, el trabajo principal es el mismo y una gran cantidad de factores similares deben de ser alcanzados para obtener la producción deseada de biomasa, todos ellos relacionados con las variables que influyen en el proceso de crecimiento [30].

Tal y como se indica en [7], las variables más importantes que afectan al crecimiento de las microalgas son temperatura del medio, radiación solar, pH y oxígeno disuelto. Además, la respuesta fotosintética de las microalgas a la radiación solar depende de otras muchas variables que hacen que el sistema sea extremadamente complejo [9]. Para los reactores raceway, los requisitos de incidencia de la radiación solar y las condiciones de operación de temperatura viene determinados generalmente por la propia arquitectura del sistema. Por tanto, las variables a controlar en este tipo de reactores son el pH y el oxígeno disuelto. Ambas variables tienen una dinámica altamente dependiente del proceso de fotosíntesis y es necesario mantenerlas cercanas a unos puntos de operación deseados [29]. De estas dos variables, el pH es la variable más importante a controlar ya que posee una influencia directa en la correcta realización de la fotosíntesis. Dicha variable presenta una dinámica fuertemente no lineal viéndose afectada por la inyección de CO_2 en el medio y por el consumo de CO_2 durante el proceso de fotosíntesis. El CO_2 tiene una influencia clave en la producción final de biomasa de las microalgas, ya que aproximadamente la mitad de la biomasa es carbono. La demanda de CO_2 en los reactores raceway puede ser cubierta de muchas formas, y es principalmente caracterizada por la fuente de CO_2 usada. El dióxido de carbono puede ser obtenido de la atmósfera, suministrada como un gas puro o provista de un flujo de gases, respectivamente. En el primer caso, el crecimiento está limitado por el carbono, ya que solo el 5% del carbono requerido por el cultivo es transferido directamente de la atmósfera. Por otro lado, el

rendimiento en la transferencia más efectivo es obtenido del dióxido de carbono puro. El control de esta variable se ha llevado a cabo en la literatura desde distintos puntos de vista. En [10] se realizó un control lineal con PI más controlador por adelantado en torno al punto de operación deseado. Por otro lado, en [29] se realizó un control basado en eventos utilizando control predictivo basado en modelo, que posteriormente fue mejorado y combinado con un control selectivo y simultáneo del oxígeno disuelto [28].

El fotobiorreactor raceway utilizado en este TFM se encuentra en la Estación Experimental Las Palmerillas, Figura 2.2. perteneciente a la fundación CAJAMAR (Almería). Este fotobiorreactor tiene una área superficial de un total de 100 m^2 , formado por dos canales de 50 m, cada uno de 1 m de ancho, unidos mediante una curva en forma de U. El fotobiorreactor trabaja a una profundidad constante de 0.2 m, tal y como recomienda Mendoza [23] para dar las mejores condiciones hidráulicas en términos de consumo de potencia, aportando un volumen total al reactor de 20 m^3 .



Figura 2.2: Fotobiorreactor industrial raceway

La mezcla se realiza por una rueda de paletas de 1.2 m de diámetro con 8 palas de contrachapado marino y accionada por un motor eléctrico (W12 35 kW, 1500 rpm, Ebarba, Barcelona, España) con reducción de engranajes (WEB Ibérica S.A., Barcelona, España). La velocidad de las palas se controla con un convertidor de frecuencia (CFW 08 WEB Ibérica, S.A., Barcelona, España). Además, la carbonatación se realiza a través de un sumidero de 0,65 m de ancho y de 1 m de profundidad, que cubre toda la anchura del canal (1 m) y se encuentra a 1.8 m aguas abajo de la rueda de paletas. El gas de combustión se inyecta a través de tres difusores de membrana de placa en el fondo del sumidero (AFD 270, EcoTec, España). La canalización y el sumidero están hechos de fibra de vidrio blanca de 3 mm de espesor.

2.2. Invernadero

Un invernadero es un recinto cerrado dentro del cual pueden manipularse las variables que afectan al crecimiento y desarrollo del cultivo. El crecimiento de un cultivo se encuentra fundamentalmente determinado por las variables climáticas del entorno en el que se encuentra y por la cantidad de agua y fertilizantes que se le aplican mediante el riego; por tanto, el adecuado manejo de estas variables permitirá controlar el crecimiento del cultivo. Por esta razón un invernadero es ideal para cultivar, ya que al ser un recinto cerrado, se pueden manipular estas variables (ventilación, calefacción, malla de sombreo, sistema de aporte de agua y fertilizantes, etc.) para alcanzar un crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas. Sin embargo, el hecho de conseguir las condiciones óptimas de las variables climáticas y de fertirrigación supone un coste económico en cuanto a energía, agua y fertilizantes. Por tanto, lo ideal desde el punto de vista económico no será obtener el máximo de producción, sino maximizar el beneficio entendido como la diferencia entre los ingresos procedentes de la venta de la producción final y sus costes asociados, pudiendo además considerar otros objetivos, relacionados por ejemplo con la calidad o la eficiencia en el uso del agua [37].

La diversidad de elementos que componen un invernadero y su relación entre ellos hacen del mismo un sistema muy complejo donde la energía, la masa y la información se presentan de forma dinámica y con diferentes magnitudes. El cultivo es el elemento principal estando sujeto a la influencia de todas las variables, como la variación del clima (temperatura, humedad, radiación activa fotosintética (PAR) y dióxido de carbono (CO_2)), la nutrición (agua y nutrientes), elementos biológicos (pesticidas, enfermedades, virus, bacterias y plagas), y la gestión del cultivo (podas, pesticidas). Estas variables interactúan entre ellas con un grado alto de complejidad, por lo tanto es necesario identificarlas y modelarlas en subsistemas. Por ello, es necesario tener un buen modelo del invernadero (normalmente dinámico) donde se representen todas las interacciones y que permita su funcionamiento.

La estructura del invernadero, el tipo y estado del cultivo, el efecto de los actuadores y las condiciones externas climáticas afectan al comportamiento del invernadero. Cuando este es analizado desde el punto de vista de la automática, las variables que se muestran a continuación son las más importantes para abordar el problema de control (ver Figura 2.3):

- Variables de control. Están directamente relacionadas con el crecimiento del cultivo. Por un lado están las variables climáticas como la radiación PAR, temperatura interna, y concentración de CO_2 . La humedad relativa puede ser controlada con el

CO₂ ya que está directamente relacionada con la absorción que hace el cultivo del CO₂. Por otro lado también las variables de fertilización como el abastecimiento de agua, el pH y la conductividad eléctrica.

- **Perturbaciones.** Son las variables que afectan al sistema pero no pueden ser controladas. En este caso, son el clima exterior (temperatura, humedad relativa, radiación solar, lluvia y la dirección y velocidad del viento), la transpiración del medio (basadas en el estado del cultivo) y las que definen la estructura del invernadero (estructura, suelo,...).
- **Variables manipulables.** Estas variables son utilizadas para compensar el efecto de las perturbaciones y los cambios de consigna en el sistema, y están directamente relacionadas con los actuadores dentro del proceso. Los actuadores más utilizados son: La ventilación natural, la calefacción, sistema de humidificación e inyección de CO₂.
- **Sistema de medida.** Para medir los valores de cada variable, medir las perturbaciones y ver el estado de los actuadores.
- **Controlador.** El sistema que compara el valor de referencia deseado con el valor actual de la variable a controlar y en consecuencia actúa de forma automática en función de esta comparación.
- **Actuadores.** Dispositivos gobernados por el controlador para mantener la variable a controlar dentro de los límites deseados.

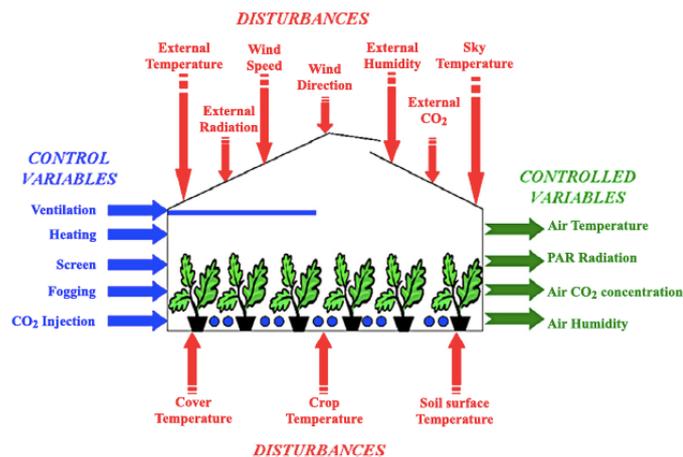


Figura 2.3: Esquema de control del invernadero

Todos estos procesos, dentro y fuera del invernadero tienen una gran relación entre ellos. El control de temperatura diurna se consigue mediante un intercambiador de aire entre el interior y el exterior. Este intercambio está relacionado con el CO_2 que absorben las plantas durante la fotosíntesis, determinando así la concentración de CO_2 dentro del invernadero. Cuando aumenta el proceso de fotosíntesis, la concentración de CO_2 disminuye llegando a un nivel inferior al que posee en la atmósfera cuando el cultivo alcanza su máximo desarrollo. Del mismo modo, la fotosíntesis afecta directamente al nivel de humedad debido a que cuando se abre el estoma de la hoja para captar CO_2 , la planta emite vapor de agua mediante el proceso de transpiración, aumentando la humedad dentro del invernadero. Este aumento de vapor se puede reducir mediante la ventilación. Dentro del invernadero, el crecimiento del cultivo se ve influenciado por la radiación PAR. Al aumentar la radiación, aumenta la temperatura, la cual está relacionada con la velocidad de producción de azúcar en la fotosíntesis. Por lo tanto, la radiación y la temperatura deben tener un balance para optimizar el proceso de fotosíntesis. La temperatura es por tanto, una de las principales variables a controlar.

Los experimentos han sido llevados a cabo en el invernadero ubicado en las Palmerillas, Fundación Cajamar, en Almería. Ver Figura 2.4.

Su estructura de acero galvanizado sostiene una capa cubierta PE. Los actuadores del sistema de control son: Una ventana abatible con un máximo ángulo de apertura de 45 grados, una ventana lateral enrollable con una longitud de 37 m y una apertura de 1.2 m. La temperatura del suelo se mide mediante sensores semiconductores de temperatura a diferentes profundidades (justo debajo del suelo y a 50 mm de profundidad) y en ambos lados del cultivo. La temperatura del aire es medida con un sensor termoresistivo y la humedad relativa del entorno con un sensor capacitivo colocado en la parte más alta del invernadero. Ocho sensores semiconductores de temperatura colocados en ambos lados de la cubierta miden su temperatura. También posee una estación meteorológica situada en el exterior a 6 m de altura para medir la temperatura, humedad relativa, radiación global, radiación PAR, lluvia y dirección y velocidad del viento. El sistema registra también todos los estados de los actuadores.



Figura 2.4: Invernadero de las Palmerillas

2.3. Linearización por realimentación

La idea básica de la técnica feedback linealization (FL) [32] es el tratamiento de sistemas no lineales como lineales mediante transformaciones algebraicas y realimentación teniendo en cuenta que el gradiente de una función $\varepsilon(x)$ (definida en un subconjunto U de \mathbb{R}^n) se denota como $d\varepsilon(x)$ y se define como un vector de n elementos donde el elemento i –simo es la derivada parcial de ε con respecto a x_i , con $i = 1, 2, \dots, n$:

$$d\varepsilon(x) = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_1} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_2} \dots \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_n} \right) \quad (2.1)$$

se define la función $L_f \varepsilon$ como la derivada de Lie de ε sobre f de la siguiente forma:

$$d\varepsilon(x) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} f(x) = \sum_n^{i=1} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} f_i(x) \quad (2.2)$$

La función resultante de (2.2) puede también ser empleada sobre otra función $g(x)$ de la siguiente forma:

$$L_g L_f \varepsilon(x) = \frac{\partial(L_f \varepsilon)}{\partial x} g(x) \quad (2.3)$$

Si ε es diferenciable k veces sobre f , la función $L_f^k \varepsilon(x)$ satisface la recursividad dada por:

$$L_f^k \varepsilon(x) = \frac{\partial(L_f^{k-1} \varepsilon)}{\partial x} g(x) \quad (2.4)$$

Por otra parte, considerando un sistema no lineal de una entrada u , y una salida y , de la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + g(x)u \\ y &= h(x), \end{aligned} \quad (2.5)$$

se define el grado relativo, r_d , del sistema en torno a un punto x^0 como el número de veces que ha de diferenciarse $y(t)$ en el instante $t = t^0$ para obtener $u(t^0)$. El grado relativo de un sistema del tipo 2.5 será aquel que cumpla:

$$\begin{aligned} L_g L_f^k h(x) &= 0 \forall x \text{ alrededor de } x^0 \text{ y } k < r_d - 1 \\ L_g L_f^{r_d-1} h(x^0) &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

El objetivo final de la técnica de linearización por realimentación es realizar una transformación de coordenadas del sistema no lineal de forma que el resultado sea un sistema lineal sobre el que se pueda emplear un control lineal. PARA ello, es imprescindible que exista una función $\Phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ en una región del espacio Ω y cuya función inversa $\Phi^{-1}(\psi)$, exista de forma que $\Phi^{-1}(\Phi(x)) = x$. Es decir, que exista un difeomorfismo, ya sea global (en todo el espacio definido por x) o local (solo si existe en el entorno del un punto dado). Partiendo del sistema definido en 2.5, es posible definir Φ como un conjunto de funciones que definen una transformación de coordenadas en torno a x^0 de la forma:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1(x) \\ \Phi_1(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \Phi_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ L_f^{r_d-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

siendo $r_d \leq n$.

las nuevas coordenadas, ψ , entrán la forma:

$$\psi_i = \Phi_i(x) \circ L_f^{i-1} h(x) \quad 1 \leq i \leq n. \quad (2.8)$$

Suponiendo $r_d = n$, es decir, un grado relativo igual a la dimensión del espacio de estados del sistema, el sistema 2.5 en espacio de estados para las coordenadas ψ puede obtenerse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_i}{\partial t} &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} = L_f h(x(t)) = \Phi_{i-1} = z_{i-1} \quad \forall i < r_d \\ \frac{d\psi_{r_d}}{dt} &= \frac{\partial L_f^{r_d-1} h(x)}{\partial x} (f(x(t)) + g(x(t))u) \\ &= L_f^{r_d} h(x(t)) + L_g L_f^{r_d-1} h(x(t))u(t) \quad \text{si } i = r_d. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Asignando:

$$\begin{aligned} a(\psi) &= L_g L_f^{r_d-1} h(x(t)) = L_g L_f^{r_d-1} h(\Phi^{-1}(\psi)) \\ b(\psi) &= L_f^{r_d} h(x(t)) = L_f^{r_d} h(\Phi^{-1}(\psi)) \end{aligned} \quad (2.10)$$

el sistema 2.9 se puede resumir en:

$$\dot{\psi}_i = \psi_{i-1}(t) \quad \text{si } i < r_d \quad (2.11)$$

$$\dot{\psi}_{r_d} = b(\psi) + a(\psi)u \quad \text{si } i = r_d.$$

Eligiendo como ley de control en el espacio de coordenadas ψ :

$$u = \frac{1}{\partial(\psi)} (-b(\psi) + v), \quad (2.12)$$

el sistema en el espacio de estados en lazo cerrado será el formado por el conjunto

$$\dot{\psi}_i = \psi_{i-1}(t) \quad \text{si } i < r_d \quad (2.13)$$

$$\dot{\psi}_{r_d} = v \quad \text{si } i = r_d \quad (2.14)$$

que es lineal y controlable y donde v es la nueva entrada del sistema lineal. Para el caso de un sistema no lineal del tipo 2.5, la salida, η , en el nuevo espacio de estados será $\eta = h(\Phi^{-1})$. La ley de control 2.12 en el espacio de coordenadas x será por tanto:

$$u = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} h(x)} - L_f^n h(x) + v \quad (2.15)$$

2.4. Control robusto

2.4.1. El problema del control robusto

Durante la fase de diseño de un sistema de control, la mayoría de las estrategias de control se basan en un modelo matemático que simula el comportamiento dinámico de los procesos a controlar. De esta manera, el correcto funcionamiento de un sistema de control depende en gran medida de lo fielmente que este modelo matemático representa la dinámica del proceso real.

En el campo del control automático, los modelos más utilizados durante la fase de diseño son los modelos determinísticos, es decir, modelos que no tienen en cuenta posibles errores de modelado o incertidumbres. Sin embargo, en algunas ocasiones, estos modelos no aportan suficiente información para controlar un sistema de forma correcta, siendo necesario tratar con técnicas de control robusto que permitan tener en cuenta incertidumbres durante la fase de diseño.

Un proceso real puede ser extremadamente complejo para ser descrito de forma precisa por un modelo matemático, por lo que se obtendrían errores de modelado. Si además, se trata de describir el sistema con un modelo lineal e invariante en el tiempo, se incluyen otras hipótesis simplificadoras que incrementan los errores en el modelo [38].

De esta forma, se considera que, cualquier modelo matemático de un proceso real va a ser en mayor o menor grado impreciso, teniendo incertidumbres o errores de modelado. Si se desea controlar de manera eficiente un proceso real, se deberá de tener información sobre las posibles fuentes de incertidumbre, evaluando su efecto sobre el comportamiento del sistema completo.

Algunos de los principales factores causantes de los errores de modelado se pueden clasificar en dos grupos, los de incertidumbre paramétrica:

1. Modificaciones en el punto de trabajo de la planta o con respecto al modelo nominal.
2. Imprecisiones en los parámetros, debidas al método de identificación y/o modelado empleado.

Y los de incertidumbre estructural:

1. Dinámica no lineal no considerada.

2. Dinámica de alta frecuencia no modelada.
3. Retardos de tiempo no contemplados.

También se pueden distinguir las causas de las incertidumbres siendo estructurada y no estructurada. En la incertidumbre no estructurada sólo se conoce que existen discrepancias entre el modelo y la planta real, y posiblemente puede conocerse también e tamaño de las desviaciones de determinadas medidas entrada/salida. En la estructurada, se sabe que se debe, en cierta medida, a algunos elementos de la planta.

A la hora de plantearse el diseño de un sistema de control robusto para un proceso con incertidumbre, surgen una serie de cuestiones escalonadas:

1. Cómo modelar los procesos.
2. Cómo analizar el sistema de control.
3. Cómo diseñar el controlador.

El campo de aplicación del control robusto abarca todos los problemas que se caractericen por considerar incertidumbres en el modelo que sean tolerables por un controlador fijo lineal e invariante en el tiempo. Para poder aplicarlo hay que definir algunos términos.

Se considera que un sistema tiene *Estabilidad Nominal* cuando es estable en lazo cerrado, para unas condiciones de trabajo dadas o nominales.

Una vez conseguida esta estabilidad, es necesario que algunas variables del sistema presenten un comportamiento deseado, haciendo que tenga un *Comportamiento Nominal*.

Es importante también, sobre todo en el ámbito industrial, que se tenga en cuenta en el diseño el conocimiento de la incertidumbre del modelo. Como se desea que el sistema de control sea estable en lazo cerrado en todo el conjunto de plantas que se puedan dar debido a la incertidumbre, se persigue la *Estabilidad Robusta*.

Si además, no solo se busca que para todo el conjunto de plantas posibles el sistema sea estable en lazo cerrado, si no que también cumpla unas especificaciones de funcionamiento, se habla de *Comportamiento Robusto* [38].

Dentro de este campo existen múltiples vías para llevar a cabo el diseño de controladores robustos, tales como QFT, H_∞ , etc. o el diseño de redes de retraso y adelanto

que aseguren ciertos márgenes de ganancia y fase en el dominio de la frecuencia. La gran mayoría de estas técnicas de control robusto, tales como H_∞ , tienen en cuenta los errores de modelado como incertidumbres no estructuradas, donde la incertidumbre se suele representar como una perturbación (incremento) fija ΔP sobre la planta P en todas las frecuencias, obteniéndose resultados bastante conservadores. Por otro lado, existen otras técnicas de control robusto que hacen uso de una representación más exacta de la incertidumbre, conocida como incertidumbre paramétrica o estructurada. En este caso, los errores de modelado vienen dados como límites en los parámetros de los modelos de la planta, de tal manera que su representación gráfica no corresponde a un incremento fijo en cada frecuencia, sino a múltiples incrementos que dan lugar a formas irregulares aunque permiten obtener resultados mucho menos conservadores que para el tipo de representación anterior. Debido a esta característica (además de su adecuación a los modelos utilizados a lo largo de este trabajo) esta última clase de incertidumbre ha sido seleccionada para el nuevo enfoque propuesto. Los métodos que hacen uso de este tipo de incertidumbre reciben la crítica de que los diseños obtenidos no tienen en cuenta la familia de plantas al completo, tomando un conjunto finito de las mismas para su desarrollo. Sin embargo, existen trabajos que permiten demostrar que si se hace un barrido lo suficientemente pequeño en la selección de tales plantas, los resultados globales de estabilidad y rendimiento robustos pueden ser confirmados basándose en propiedades de continuidad [16], [18]. Asimismo existen extensiones de estas técnicas basadas en el análisis de intervalos que permiten considerar el conjunto completo [27].

2.4.2. Teoría de la realimentación cuantitativa (QFT)

En el campo de control robusto la técnica que tiene en cuenta de forma más exacta las incertidumbres durante la fase de diseño es la metodología QFT [38]. QFT es una técnica de diseño muy potente que permite alcanzar tolerancias de rendimiento y estabilidad sobre un rango de plantas inciertas. Es una metodología de diseño basada en el dominio de la frecuencia que utiliza el diagrama de Nichols para alcanzar el diseño robusto deseado sobre una específica región de la incertidumbre de la planta, donde el objetivo es diseñar un compensador $G(s)$ y un prefiltro $F(s)$ (en caso de ser necesario), como muestra la Figura 2.5, tal que las especificaciones de rendimiento y estabilidad son alcanzadas para una familia de plantas $\Pi(s)$. Esta familia puede ser considerada como un conjunto de plantas $P(s)$ con incertidumbre paramétrica (aunque QFT soporta incertidumbre no paramétrica).

La técnica QFT usa la incertidumbre de la planta y un conjunto de especificaciones como información cuantitativa. El compensador de dos grados de libertad F, G , desde ahora en adelante la variable s será omitida cuando sea necesario por claridad, debe de

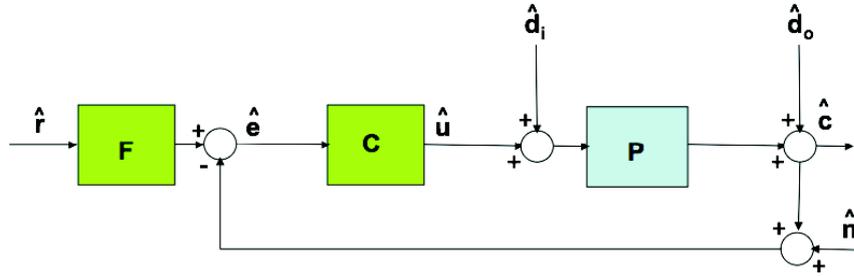


Figura 2.5: Sistema de realimentación con dos grados de libertad

ser diseñado de forma que las variaciones del comportamiento de la planta, debidas a la incertidumbre estén dentro de un margen de tolerancias específico en lazo cerrado. La familia Π es representada con la siguiente ecuación,

$$\Pi(s) = \left\{ P(s) = \kappa \frac{\prod_{i=1}^n (s + \ell_i) \prod_{j=1}^m (s^2 + 2\beta_j \omega_{0j} + \omega_{0j}^2)}{s^N \prod_{r=1}^a (s + \zeta_r) \prod_{s=1}^b (s^2 + 2\beta_s \omega_{0s} + \omega_{0s}^2)} : \right. \quad (2.16)$$

$$\left. \begin{aligned} \kappa &\in [\kappa_{min}, \kappa_{max}], \ell_i \in [\ell_{i,min}, \ell_{i,max}], \zeta_r \in [\zeta_{r,min}, \zeta_{r,max}], \\ \beta_j &\in [\beta_{j,min}, \beta_{j,max}], \omega_{0j} \in [\omega_{0j,min}, \omega_{0j,max}], \\ \beta_s &\in [\beta_{s,min}, \beta_{s,max}], \omega_{0s} \in [\omega_{0s,min}, \omega_{0s,max}], \\ n + m &< a + b + N \end{aligned} \right\} \text{ecuacion}_{conjunto}$$

Un diseño típico de QFT contiene los siguientes pasos:

1. *Especificaciones.* Se obtiene el modelo de la planta con incertidumbre y se selecciona un conjunto de frecuencias de diseño basándose en el ancho de banda del sistema, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$. Las especificaciones (estabilidad, seguimiento, perturbaciones en la entrada y la salida, ruido y esfuerzo de control) son definidas para cada frecuencia, y la planta nominal P_0 es seleccionada.
2. *Plantillas.* La información cuantitativa sobre las incertidumbres es representada por un conjunto de puntos en el plano de Nichols. Este conjunto de puntos se llama *plantillas* y define de forma gráfica la incertidumbre para cada frecuencia de diseño ω . En la Figura 2.7, se muestra un ejemplo de un sistema de segundo orden dado por la función de transferencia $P(s) = k/s(s + a)$, con $k \in [1, 10]$ y $a \in [1, 10]$ para un conjunto de frecuencias $\Omega = \{0,5, 1, 2, 3, 8, 15, 30, 60, 90, 120, 180\} rad/s$.
3. *Fronteras.* Las especificaciones fijadas en el primer paso se transforman para cada frecuencia ω , en zonas prohibidas dentro del plano de Nichols para la función de

transferencia $L_0(j\omega) = C(j\omega)P_0(j\omega)$. Estas zonas se definen con unos límites denominados *fronteras*. Cada especificación se traslada a cada frecuencia como una *frontera* diferente, es por ello que el conjunto de todas las *fronteras* para cada frecuencia se agrupan creando una zona única de prohibición. En la Figura 2.6 se muestra un ejemplo para especificaciones de estabilidad y seguimiento.

4. *Ajuste de la función de lazo abierto*. Este paso consiste en diseñar el controlador de forma que la función de transferencia $L_0(j\omega) = C(j\omega)P_0(j\omega)$ cumpla las *fronteras* calculadas en el paso anterior. La Figura 2.6 muestra el diseño de L_0 observándose que queda por encima y a la derecha de cada *frontera* en cada frecuencia.
5. *Ajuste del prefiltro*. El filtro F es diseñado para que la función de transferencia en lazo cerrado desde la referencia hasta la salida cumpla las especificaciones de diseño para seguimiento de referencias, por lo tanto, las variaciones del sistema en lazo cerrado deben estar dentro de un rango deseado, tal y como muestra la Figura 2.8.
6. *Validación*. Finalmente, se procede a validar que el sistema de control en lazo cerrado cumple, para todo el conjunto de plantas y de frecuencias dentro del ancho de banda, todas las especificaciones dadas en el primer paso.

Especificaciones en el dominio del tiempo.

Las especificaciones en bucle cerrado para el sistema de la Figura 2.5 son definidas en función de la entrada o la salida. Ambas han de estar delimitadas para que el sistema con incertidumbre trabaje dentro de un rango determinado. Por ejemplo:

1. En un problema de regulación, el objetivo es que la salida del sistema sea cercana a 0 o a un punto de operación. En este caso, las especificaciones en el dominio del tiempo se deben definir con regiones de operación donde se supone que el objetivo es tener la salida de la planta cercana a 0 o al punto de operación concreto.
2. En el problema de seguimiento, la salida de la planta debe seguir la referencia de entrada con unas características determinadas dentro del dominio del tiempo. En la Figura 2.9 se muestra una región específica donde la salida del sistema debe de mantenerse.

Especificaciones en el dominio de la frecuencia.

Las especificaciones en lazo cerrado para el sistema de la Figura 2.5 normalmente son definidas en términos de inecuaciones en la función de transferencia de lazo cerrado del sistema, tal y como muestran las ecuaciones (2.17)-(2.22).

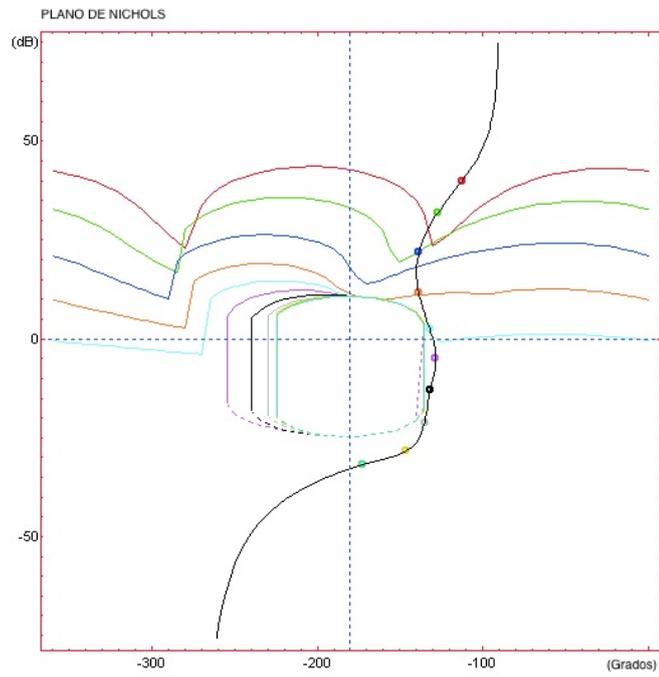


Figura 2.6: Ejemplo de fronteras y ajuste de la función de transferencia de lazo abierto en QFT.

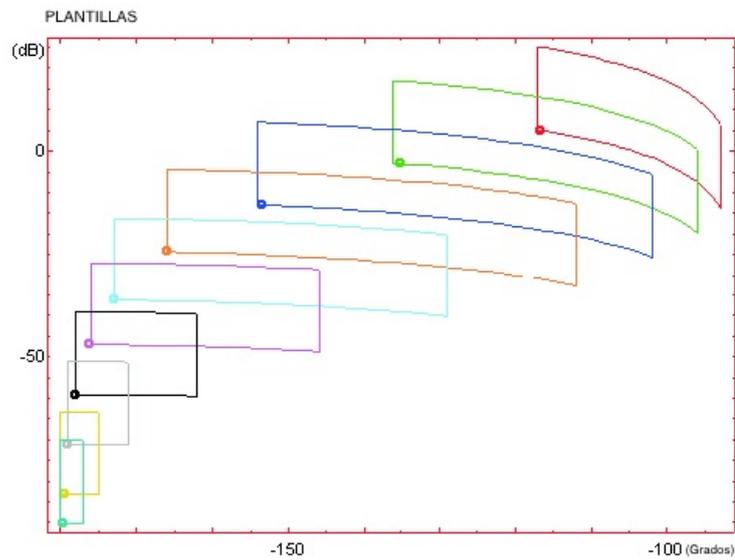


Figura 2.7: Ejemplo de las plantillas en QFT.

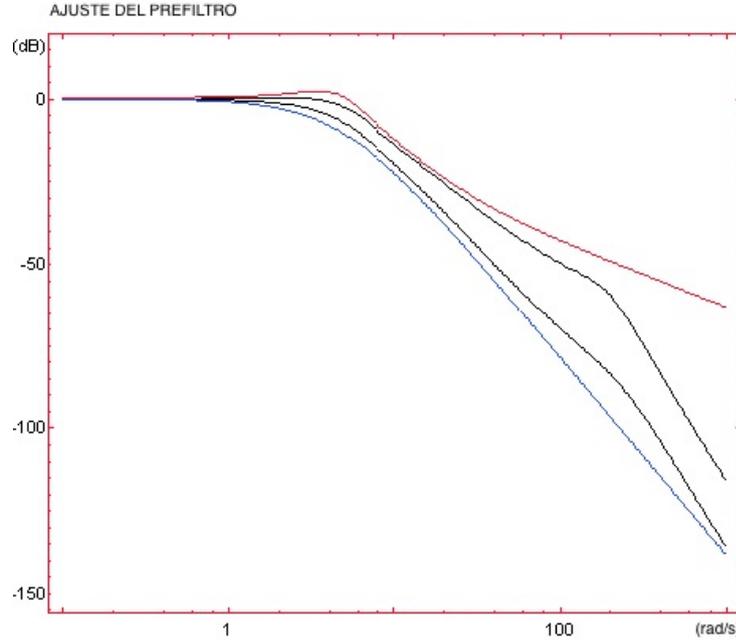


Figura 2.8: Ejemplo de ajuste del filtro en QFT.

1. Rechazo de perturbación a la salida de la planta.

$$\left| \frac{\hat{c}}{\hat{d}_0} \right| = \left| \frac{1}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \delta_{po}(\omega) \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.17)$$

2. Rechazo de perturbación a la entrada de la planta.

$$\left| \frac{\hat{c}}{\hat{d}_i} \right| = \left| \frac{P(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \delta_{pi}(\omega) \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.18)$$

3. Estabilidad.

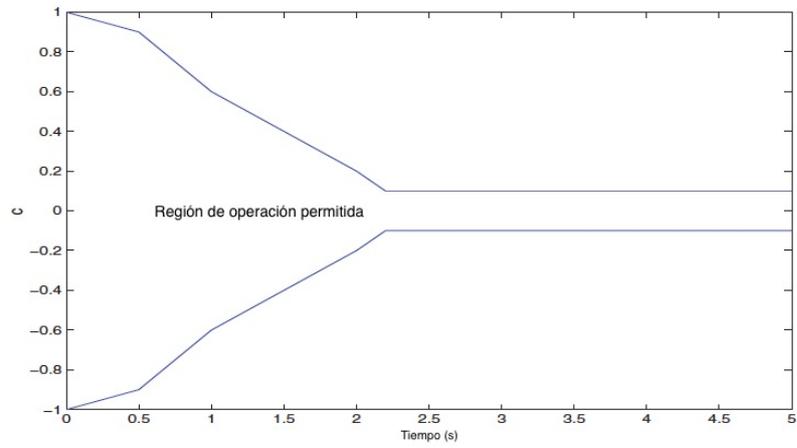
$$\left| \frac{\hat{c}}{\hat{r}F} \right| = \left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \lambda \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.19)$$

4. Seguimiento de referencias.

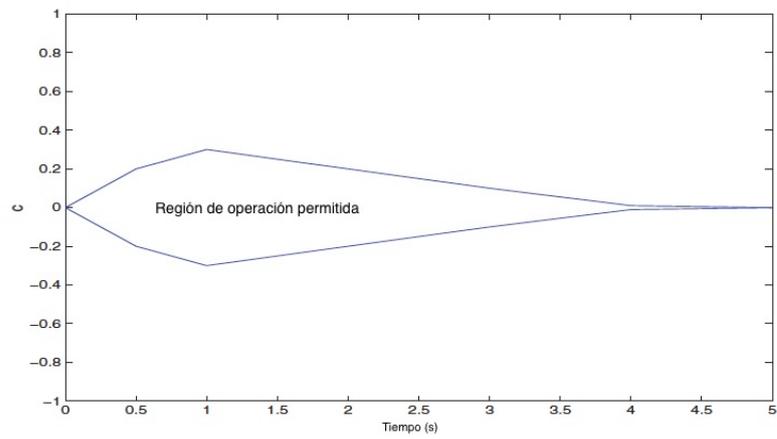
$$B_l \leq \left| \frac{\hat{c}}{\hat{r}} \right| = \left| \frac{F(j\omega)P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq B_u(\omega) \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.20)$$

5. Rechazo de ruido.

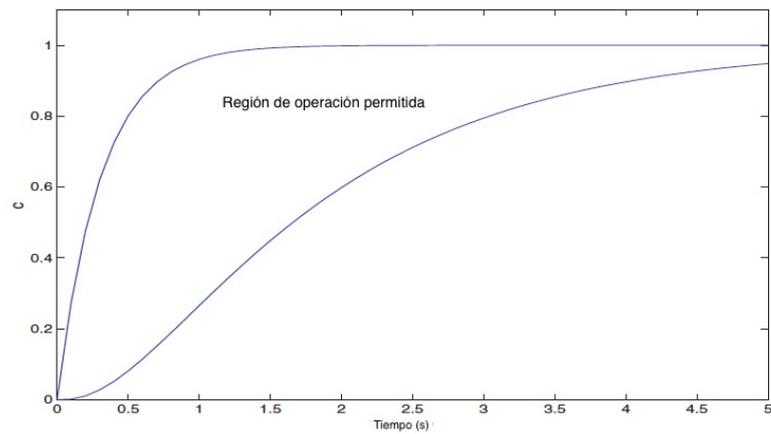
$$\left| \frac{\hat{c}}{\hat{n}} \right| = \left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \delta_n(\omega) \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.21)$$



(a) Problema de regulación



(b) Problema de regulación para otras condiciones iniciales



(c) Problema de seguimiento de referencias.

Figura 2.9: Especificaciones en el dominio del tiempo.

6. Esfuerzo de control.

$$\left| \frac{\hat{u}}{\hat{n}} \right| = \left| \frac{C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \delta_{ce}(\omega) \forall \omega > 0, \forall P \in \Pi \quad (2.22)$$

Para las especificaciones de las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.20), pequeñas especificaciones que se creen arbitrariamente pueden ser alcanzadas diseñado el controlador C de forma que $|C(j\omega)| \rightarrow \infty$ (debido a que aparece el círculo M en el plano de Nichols). Por lo tanto, con una pequeña desviación del punto de operación debido a alguna perturbación, y con una sensibilidad cercana a cero, el sistema de control se vuelve más independiente de la incertidumbre de la planta. Para alcanzar un incremento en $|C(j\omega)|$ es necesario incrementar la frecuencia de corte (frecuencia en rad/s en la que la magnitud de la función de transferencia en lazo abierto $L(j\omega) = P(j\omega)C(j\omega)$ es igual a 0 dB) en el sistema. Por lo tanto, para alcanzar pequeñas especificaciones arbitrarias es necesario aumentar el ancho de banda del sistema. El esfuerzo de control es definido, en este contexto, desde la entrada del sensor de ruido n a la señal de control u . Por otro lado, incrementar el valor del controlador $|C(j\omega)|$ implica un problema en el caso de la especificación del esfuerzo de control y del sensor para el rechazo a las perturbaciones ya que, al aumentar el ancho de banda, el ruido del sensor afectará más al sistema. Se debe conseguir un balance entre todas las especificaciones. La especificación de estabilidad esta relacionada con los márgenes de estabilidad relativos: margen de fase y ganancia.

Traslado de las especificaciones del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Como se ha comentado anteriormente, el diseño en QFT se realiza en el dominio de la frecuencia, por tanto es necesario trasladar las especificaciones fijadas en el dominio del tiempo al de la frecuencia. Una forma de hacerlo es asumir un modelo de la función de transferencia en lazo cerrado entre la referencia r y la salida c , $T_{cr}(s)$, y buscar valores para sus parámetros de forma que se satisfagan los límites definidos en el dominio del tiempo sobre la salida del sistema.

Ejemplo de modelo de primer orden Como ejemplo se tratará un sistema de primer orden dado por $T_{cr}(s) = K/(s + a)$. Cuando la referencia $r(t)$ es una escalón unitario, la salida del sistema se define como $c(t) = (K/a)(1 - e^{-at})$. Por lo tanto, con el objetivo de alcanzar $c(t) = r(t)$ para un tiempo t lo suficientemente largo, K debe de tomar el valor $K = a$. Para un modelo de primer orden $\tau_c = 1/a = a/\omega_b$ es la constante de tiempo. En general, a mejor ancho de banda, mas rápida será la salida del sistema. Una dificultad importante para un modelo de primer orden es que la primera derivada de la salida (en un tiempo infinitesimal después de cero $t = 0^+$) es $c = K$, cuando su valor deseado es 0. Por lo tanto se puede decir que los problemas aparecen en torno al tiempo 0. En la Figura

2.10 se muestran específicos límites de tiempo y la salida del sistema en un sistema de primer orden.

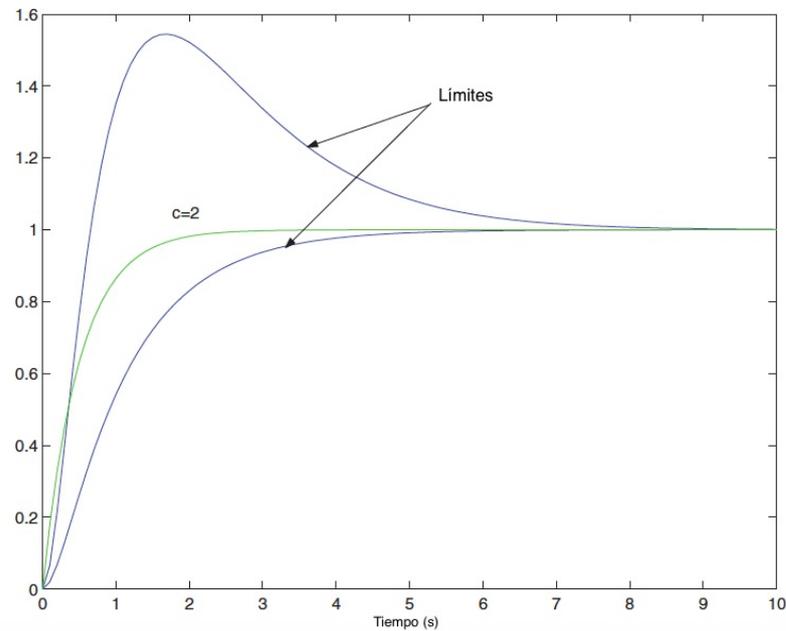


Figura 2.10: Ejemplo sistema de primer orden

Diseño del controlador

El objetivo es diseñar un controlador de dos grados de libertad F, G como muestra la Figura 2.5, de forma que todas las especificaciones previamente definidas y la estabilidad en lazo cerrado del sistema para toda la planta P en Π se cumplan. Las especificaciones son trasladadas del dominio del tiempo al de la frecuencia en círculos en el plano de Nyquist definiendo las zonas permitidas para la función $L(j\omega) = P(j\omega)C(j\omega)$. La zona permitida es la exterior para los círculos de las ecuaciones (2.17)-(2.21), y dentro para las de la ecuación (2.22). Combinando las zonas permitidas de cada función L correspondiendo a cada planta P en ϱ , se obtienen una serie de restricciones en cada frecuencia ω para el controlador C . Los límites de estas zonas representados en el plano de Nichols son llamados *fronteras*. Estos límites en el dominio de la frecuencia se pueden formular tanto para el controlador C como para la función $L(j\omega) = P_0(j\omega)C(j\omega)$, para cualquier planta nominal P_0 .

2.5. Control por adelanto

Los esquemas de control con compensación de perturbaciones medibles son muy bien conocidos en la industria de procesos [12]. La combinación del feedforward y el esquema de control realimentado como muestra la Figura 2.11 puede mejorar significativamente el control cuando el sistema se vea afectado por una perturbación medible que afecte a la salida del sistema. En una situación ideal, este esquema de control puede eliminar completamente el efecto de la perturbación, pero aun habiendo algunos errores de modelado, el control feedforward sigue reduciendo el efecto de la perturbación a la salida de la planta. Este esquema de control es muy usado en la industria. La mayoría de aplicaciones están realizadas en columnas de destilación, pero también en problemas de control distribuido para mejorar el desempeño del controlador.

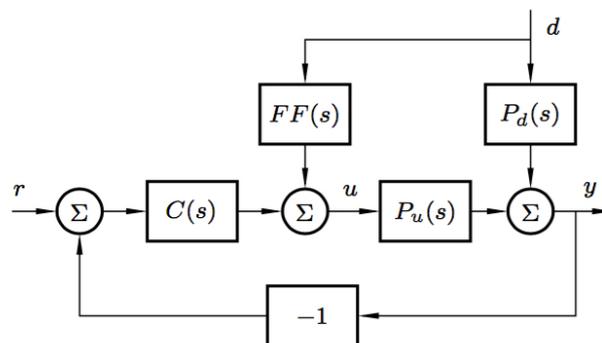


Figura 2.11: Esquema de control clásico con feedforward.

El esquema de control más utilizado es el que se muestra en la Figura 2.11. Consiste en un controlador por realimentación $C(s)$, un proceso $P_u(s)$, una señal de referencia r , una señal de control u , y la salida de sistema y . La perturbación d , que es medible, influye en el lazo de realimentación como se muestra en la Figura. El objetivo es que el control feedforward $FF(s)$ compense la perturbación d en la salida del sistema.

Su cálculo, de forma genérica, se realiza dividiendo el modelo de la perturbación $P_d(s)$ entre el modelo de la planta $P_u(s)$:

$$FF(s) = \frac{P_d(s)}{P_u(s)} \quad (2.23)$$

Se definen tres funciones de transferencia de primer orden con diferentes parámetros y retardos.

$$P_u = \frac{K_u}{1 + sT_u} e^{-sL_u} \quad P_d = \frac{K_d}{1 + sT_d} e^{-sL_d} \quad (2.24)$$

Hay procesos que no van a estar bien definidos por estas funciones de transferencia, pero para las aplicaciones de control de procesos esta estructura es suficientemente buena, convirtiéndose en un modelo estándar [12].

Se asume que el controlador es un PI, con la función de transferencia:

$$C = K \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right), \quad (2.25)$$

donde $T_d = 0$ en el caso del controlador PI.

Se pueden tratar cuatro posibles estructuras de feedforward G_{ff} :

Estática:	$G_{ff} = K_{ff}$
Estática con retardo:	$G_{ff} = K_{ff} e^{-sL_{ff}}$
Adelanto:	$G_{ff} = K_{ff} \frac{1 + sT_z}{1 + sT_p}$
Adelanto con retardo:	$G_{ff} = K_{ff} \frac{1 + sT_z}{1 + sT_p} e^{-sL_{ff}}$

En las plantas industriales se utilizan estructuras más complejas. De hecho, el feedforward estático es la estructura más utilizada, y el uso del mismo solo con la ganancia del compensador normalmente hace mejoras drásticas en el desempeño del control comparado con un control de realimentación únicamente.

La mayoría de los métodos de compensación por adelanto no tienen en cuenta el la realimentación del controlador $C(s)$ ni el efecto que tiene sobre la perturbación. Esto significa que la función de transferencia entre d y y es considerada, siendo:

$$Y = (P_d - P_u G_{ff}) D \quad (2.26)$$

El feedforward perfecto elimina el efecto de la perturbación d por completo en la salida y , obteniéndose

$$G_{ff} = \frac{P_d}{P_u} = \frac{K_d}{K_u} \cdot \frac{1 + sT_u}{1 + sT_d} e^{-s(L_d - L_u)} \quad (2.27)$$

lo que significa que

$$K_{ff} = \frac{K_d}{K_u} \quad T_z = T_u \quad T_p = T_d \quad L_{ff} = L_d - L_u \quad (2.28)$$

Cuando $L_d < L_u$ los parámetros óptimos dados por (2.28) dan un compensador por realimentación no causal, cuando L_{ff} se vuelve negativo. Esto significa que la cancelación perfecta de la perturbación no es posible en este caso, y se tiene que usar $L_{ff} = 0$.

Es normal tener únicamente un compensador por adelanto estático. En este caso

$$G_{ff} = K_{ff} = \frac{K_d}{K_u} \quad (2.29)$$

elimina el efecto de la perturbación en régimen permanente.

También es normal que la perturbación d entre al proceso a la vez que la señal de control, lo que significa que $T_u = T_d$ y $L_u = L_d$. En esta caso, el feedforward estático es la opción más óptima.

Un resumen de las reglas de diseño en lazo abierto para las diferentes estructuras de compensación es:

$$\begin{aligned} \text{Estática:} & \quad G_{ff} = \frac{K_d}{K_u} \\ \text{Estática con retardo:} & \quad G_{ff} = \frac{K_d}{K_u} e^{-s(L_d - L_u)} \\ \text{Adelanto:} & \quad G_{ff} = \frac{K_d}{K_u} \frac{1 + sT_u}{1 + sT_d} \\ \text{Adelanto con retardo:} & \quad G_{ff} = \frac{K_d}{K_u} \frac{1 + sT_u}{1 + sT_d} e^{-s(L_d - L_u)} \end{aligned} \quad (2.30)$$

3

Implementación de las estrategias de control

3.1. Introducción

En esta sección se presentan tres diferentes aproximaciones de uso del control robusto para abordar el problema de control de dos procesos industriales no lineales y como apoyo en la compensación de perturbaciones. En todas ellas, QFT ha sido seleccionada como metodología de diseño de control robusto.

3.2. Control robusto de un fotobiorreactor industrial

Una forma de abordar el control de un sistema no lineal es linealizarlo en torno a un punto de operación deseado y considerar como incertidumbre la variación del proceso sobre el modelo nominal lineal obtenido. En este apartado se presenta esta idea aplicada al control del pH de un fotobiorreactor industrial tipo raceway considerando incertidumbre paramétrica y haciendo uso de QFT como estrategia de diseño [22].

3.2.1. Modelado

Desde el punto teórico, el control del pH es un problema no lineal, que solo puede ser linealizado bajo varias circunstancias [9]. Considerando que la salida del proceso es el pH del cultivo, la apertura de la válvula de inyección de CO₂ es la variable manipulable, y la radiación solar es la mayor perturbación del sistema, el comportamiento del sistema puede ser representado con la siguiente ecuación diferencial [39]:

$$\tau \frac{dpH}{dt} = \alpha u(t - t_r) + \beta(pH_0 - pH) + \gamma pH \quad (3.1)$$

El pH_0 es el pH en el punto de equilibrio, β es un factor para ajustar la constante de tiempo del sistema, α es la ganancia estática del sistema, u es la señal de control, que representa las inyecciones de CO_2 , t_r es el tiempo de retardo, y γ and τ son los parámetros que dependen de la radiación solar y del estado del cultivo, respectivamente.

Este modelo lineal de bajo orden ha sido identificado teniendo en cuenta la estructura del fotobiorreactor, la distribución del sensor y actuador y las dinámicas observadas en los datos. El modelo anterior relacionado con la salida del pH y la inyección de CO_2 puede ser representada con las siguientes funciones de transferencia:

$$pH = \frac{k}{1 + \tau s} e^{-t_r s} u_{CO_2} + \frac{k_r}{1 + \tau_r s} I \quad (3.2)$$

donde pH es el pH del cultivo, u_{CO_2} es el porcentaje de apertura de la válvula, I es la radiación global, k y k_r son las ganancias estáticas, y τ y τ_r las constantes de tiempo correspondientes.

Los modelos utilizados en este trabajo para el desarrollo del control robusto han sido obtenidos para diferentes puntos de operación en torno a los cuales la productividad del sistema es máxima. Para ello, se han analizado los datos de relación pH y productividad observados en la Figura 3.1 [28].

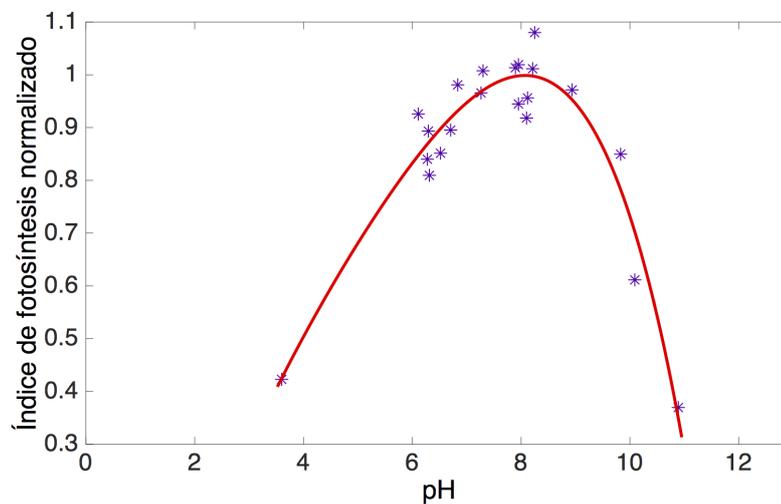


Figura 3.1: Relación pH y productividad

De esta forma, se escogieron los puntos de operación $pH=7$, $pH=8$ y $pH=9$, cubriendo así un amplio rango de trabajo y donde, como se verá más adelante, el modelo varía tanto en ganancia, en constante de tiempo y en retardo.

Para obtener los modelos, se han realizado diferentes trenes de pulsos en la inyección del CO_2 a lo largo del periodo diurno y en torno a cada uno de los puntos de operación, para un total de 20 días con diferentes condiciones medioambientales. Los modelos obtenidos se basan en la función de transferencia de primer orden del primer término de (3.2). Destacar que, en esta primera versión del diseño de control robusto, únicamente se ha obtenido el modelo de esta primera función de transferencia, dejando pendiente el cálculo de la incertidumbre del segundo término para un trabajo futuro. La Figura 3.2 muestra un ejemplo la validación del modelo para un determinado día de ensayo.

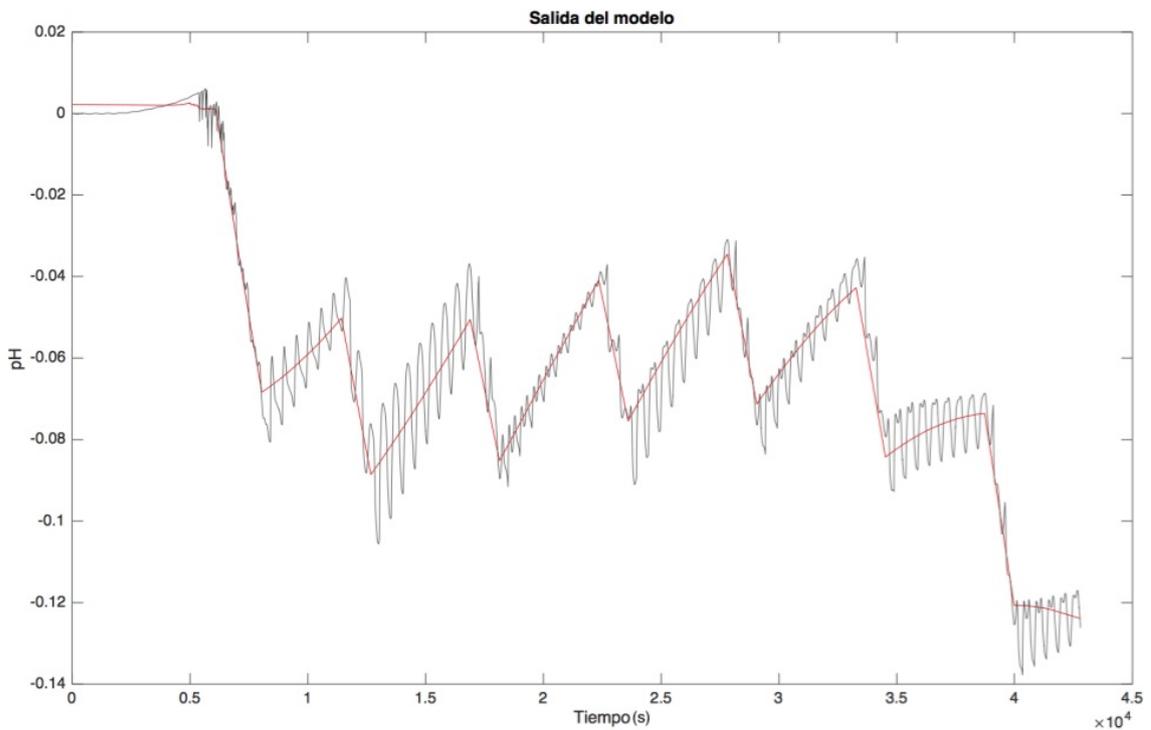


Figura 3.2: Validación del modelo. En rojo el modelo resultante.

Se hicieron ensayos de 20 días y 3 puntos de operación diferentes, ascendiendo a un total de 60 ensayos. Una vez obtenidos los modelos para cada uno de estos ensayos, se calcularon las cotas de incertidumbre para el modelo del pH, resultando en (constantes de tiempo y retardo en segundos):

$$pH = \frac{k}{1 + \tau s} e^{-t_r s} \text{CO}_2 \quad (3.3)$$

$$k = [-4,1, -0,35]$$

$$\tau = [3,4, 8] \cdot 10^3$$

$$t_r = [1, 1,4] \cdot 10^2$$

Destacar la gran variabilidad en los parámetros debido al efecto diurno de la radiación en el proceso de fotosíntesis y el cambio de punto operación.

3.2.2. Diseño del controlador

Teniendo en cuenta el modelo de primer orden con retardo comentado en el apartado anterior, y los valores de incertidumbre para ganancia, constante de tiempo y retardo, se ha optado por diseñar un controlador robusto basado en QFT [17].

Como se ha explicado en la sección 2.3, se comienza definiendo las especificaciones que se desean obtener en el problema. En este caso, se asumen unas especificaciones de estabilidad dadas por un margen de fase mayor o igual a 45 grados para todos los puntos de operación. Para el seguimiento de referencias se han tomado las cotas dadas por las siguientes ecuaciones:

$$T_l(s) = \frac{1}{(6400s + 1)(2600s + 1)(1000s + 1)} \quad (3.4)$$

$$T_u(s) = \frac{1}{3500s + 1} \quad (3.5)$$

Estas especificaciones en frecuencia se corresponden con una constante de tiempo de lazo cerrado entre 58 y 175 minutos.

El conjunto de frecuencias seleccionado para diseño ha sido $W = \{0,0001, 0,0005, 0,001, 0,01\}$ rad/s.

La Figura 3.3 muestra la representación de la incertidumbre del modelo en el plano de Nichols para las frecuencias en W . En cada plantilla el nominal, dado por (3.6), es marcado con un asterisco. La elección de planta nominal se ha hecho de forma libre, pero aún así, existen reglas para una elección adecuada en casos específicos [16].

$$P_0(s) = \frac{-4,1}{3390s + 1} e^{-100s} \quad (3.6)$$

Escogida la planta nominal del $P_0(j\omega)$ del conjunto de plantas, la función de transferencia de lazo directo es definida como $L_0(j\omega) = P_0(j\omega)C(j\omega)$ utilizando $C(j\omega)$. Para obtener en el lazo directo las especificaciones deseadas se utiliza el controlador $C(j\omega)$

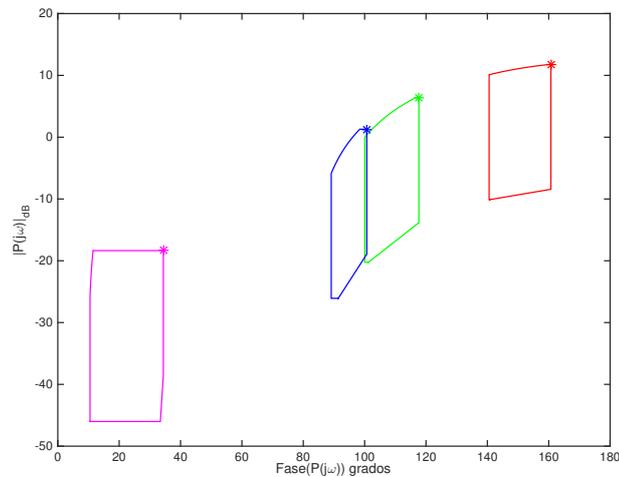


Figura 3.3: Plantillas (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).

como grado de libertad para alcanzarlas.

Una vez definidas las especificaciones y obtenido los templates para cada frecuencia, el siguiente paso es obtener los boundaries. Cada boundary en cada frecuencia ω define una zona límite.

En la Figura 3.4 se muestran las fronteras correspondientes a la especificación de estabilidad de 2.32dB y a la especificación de seguimiento de referencias dada por la magnitud de las cotas en (3.4) y (3.5), evaluadas para las frecuencias en el conjunto W . En esta Figura se puede observar también el ajuste de la función nominal de lazo abierto para el controlador PID dado por la siguiente ecuación:

$$C(s) = -34,2852 \left(1 + \frac{0,00035}{s} \right) (1 + 83,89265s) \quad (3.7)$$

Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran la validación del diseño para las especificaciones de seguimiento y de estabilidad, respectivamente, que como se observa se cumple satisfactoriamente. La zona permitida por las fronteras de seguimiento es la que queda por encima de la misma, para las de estabilidad es la que queda en la parte exterior de las fronteras.

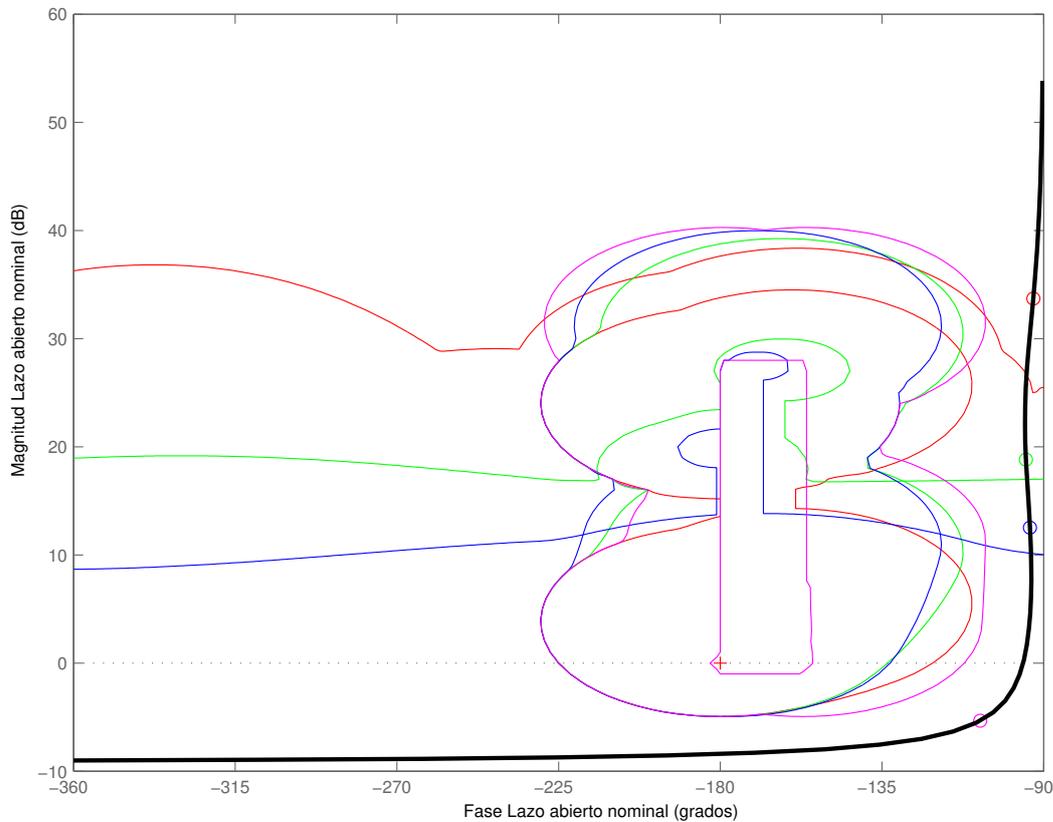


Figura 3.4: Ajuste de L_0 , fronteras de estabilidad y seguimiento (0.0001 - rojo, 0.0005 - verde, 0.001 - azul, 0.01 - magenta).

3.2.3. Resultados

Esta sección presenta la evaluación en simulación del controlador robusto diseñado. Para evaluar su correcto funcionamiento se han tomado como referencia diversos días con distintas condiciones climatológicas y en distintos puntos de operación, tratando de evaluar el rendimiento del controlador frente a la variabilidad de la dinámica del proceso.

Las simulaciones se han llevado a cabo haciendo uso del modelo no lineal del fotobiorreactor implementado en Simulink y desarrollado en [9]. Con el fin de analizar el comportamiento del sistema en los diversos puntos de trabajo, como referencia se le ha introducido, en diferentes ensayos, escalones descendientes del pH al comienzo del día, con el fin de analizar el comportamiento del sistema en distintos puntos de operación.

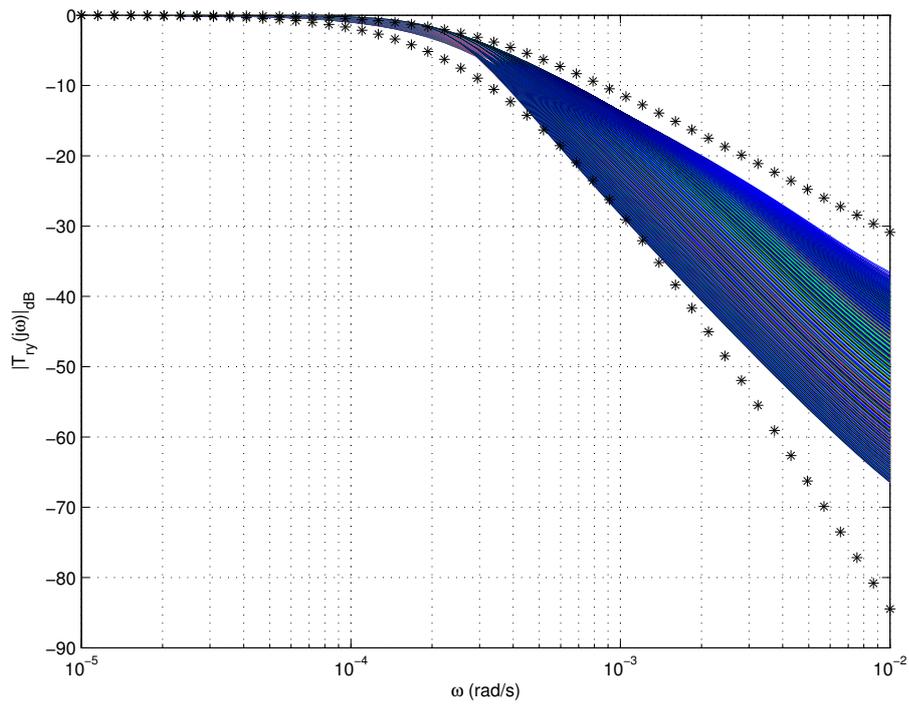


Figura 3.5: Validación de las especificaciones de seguimiento de referencia.

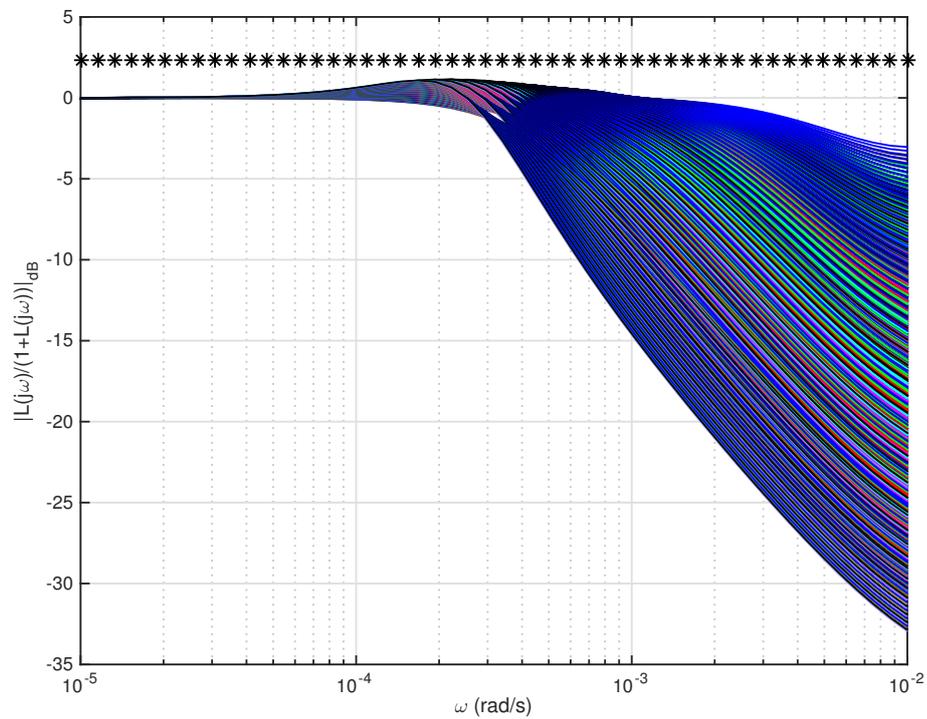


Figura 3.6: Validación de las especificaciones de estabilidad.

Las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 muestran dos ensayos de ejemplo para un día soleado y otro con nubes, cada uno de ellos además en distintos puntos de operación, comenzando los escalones de los ensayos en valores iniciales de pH de 8.3 y 7.9 respectivamente. En dichas Figuras se puede observar que el comportamiento del sistema es acorde a las especificaciones de diseño y es prácticamente el mismo en ambos días a pesar de comenzar en distintos puntos de trabajo y estar sometido a diferentes condiciones de clima, lo que hace demostrar el correcto funcionamiento del controlador robusto propuesto. La señal de control hace referencia a la salida del controlador PID, mientras que la inyección de CO_2 es la salida generada por el PWM.

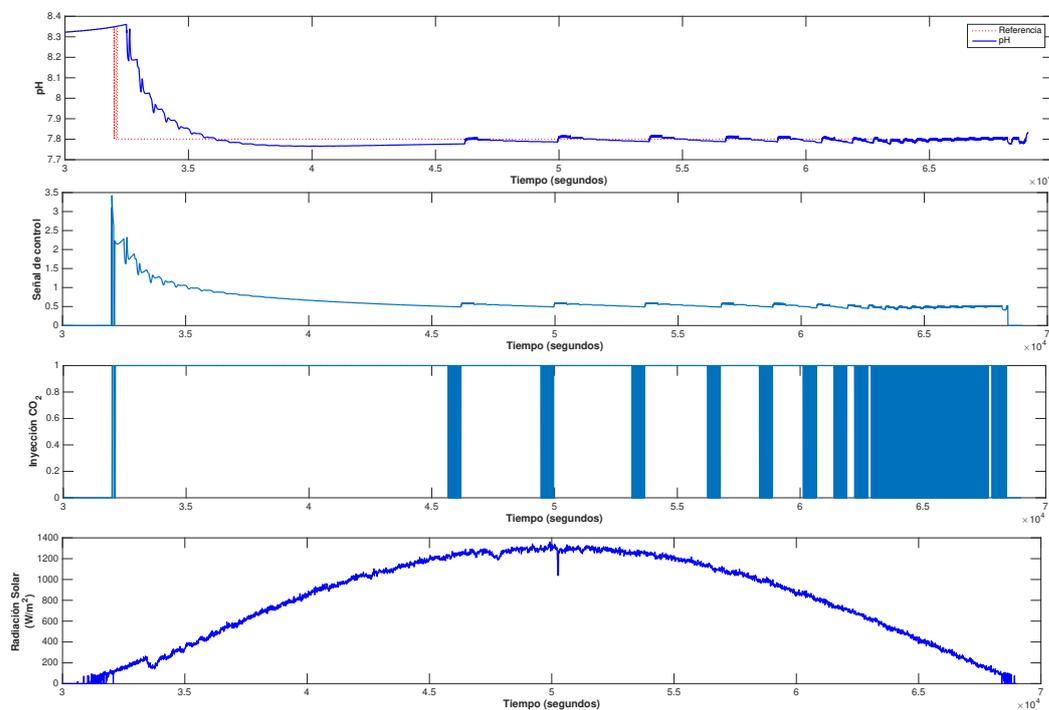


Figura 3.7: Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=8.3

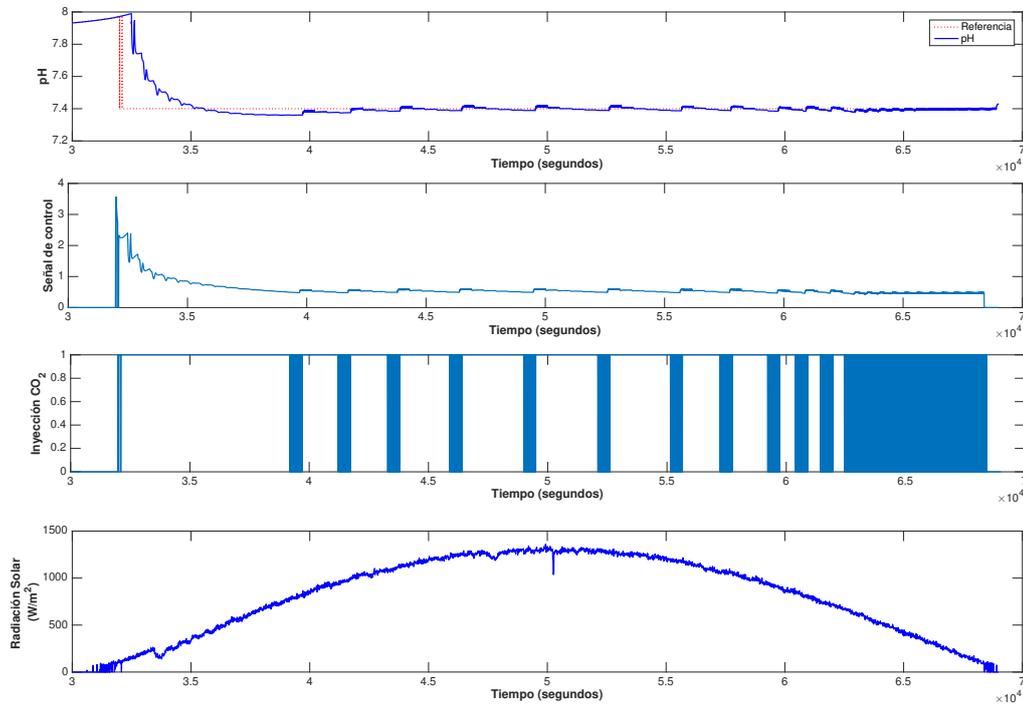


Figura 3.8: Ensayo día soleado para para un valor inicial de pH=7.9

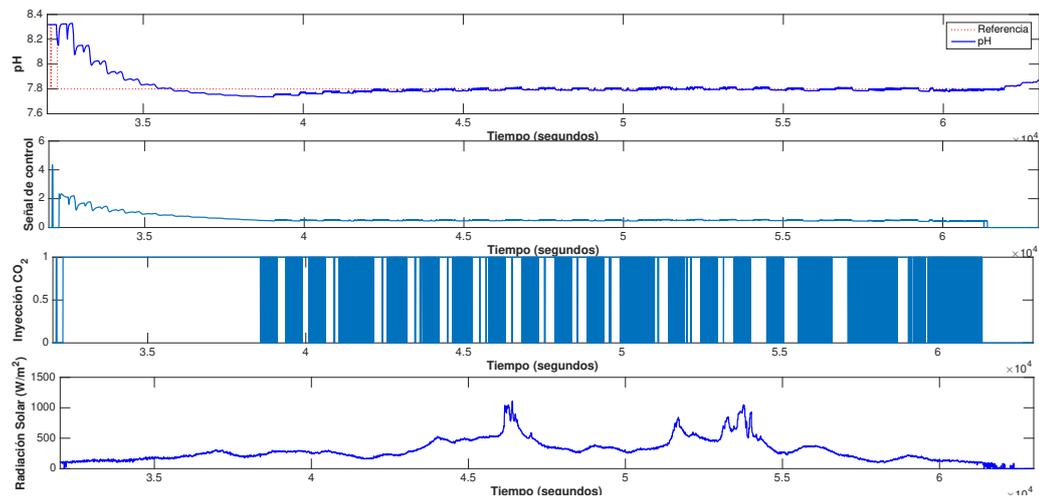


Figura 3.9: Ensayo día nublado para para un valor inicial de pH=8.3

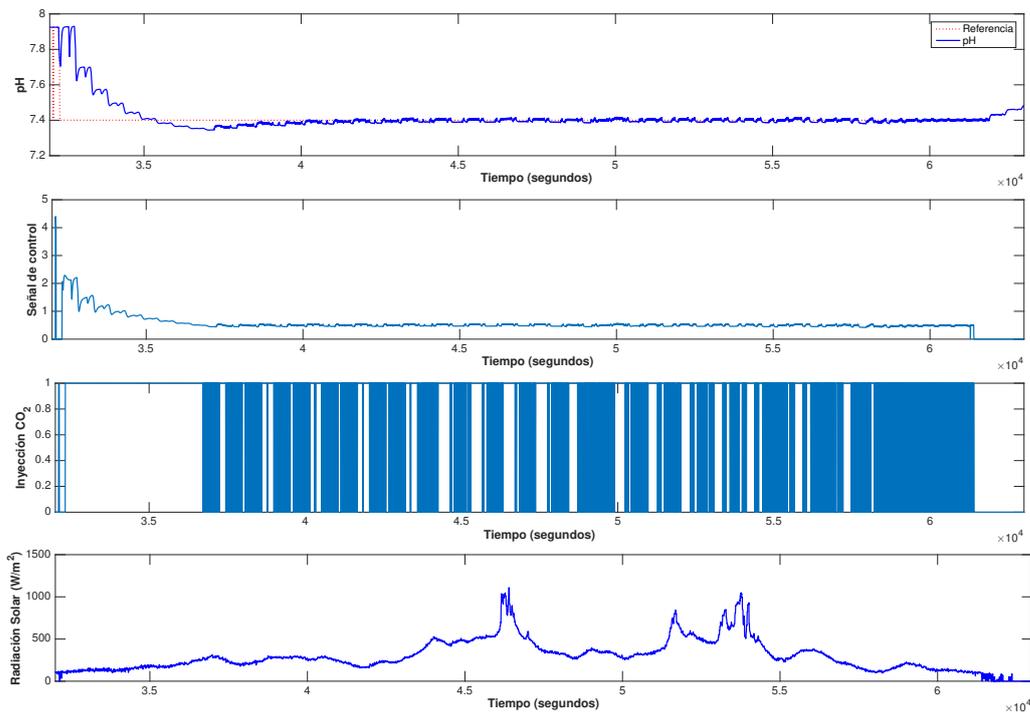


Figura 3.10: Ensayo día nublado para para un valor inicial de $\text{pH}=7.9$

3.3. Control robusto QFT con linealización por realimentación para el control de temperatura de un invernadero

Esta sección describe la combinación de las técnicas de linealización por realimentación y control QFT para el control de la temperatura interior de un invernadero haciendo uso de ventilación natural. En un primer paso, se hace uso del modelo no lineal del invernadero presentado en [37] para diseñar un estructura de control por realimentación. Dicha estructura permite determinar la apertura de ventilación del proceso a partir de una señal de control virtual de entrada. Gracias a dicho esquema de control las no linealidades del proceso y el efecto de las perturbaciones se reducen considerablemente, siendo posible aproximar el comportamiento del sistema por un proceso de primer orden con retardo. Sin embargo, debido a la complejidad del proceso y las diversas fuentes de error, el modelo lineal aproximado presenta variaciones en sus parámetros que son capturadas como incertidumbre. Es por ello que además de la linealización por realimentación se hace uso de QFT para diseñar un controlador PI robusto que tome como base el modelo lineal de primer orden aproximado con incertidumbre paramétrica.

3.3.1. Modelado

El modelo simplificado del clima interior de un invernadero que se va a describir, se compone de un conjunto de dos ecuaciones diferenciales, asumiendo las siguientes hipótesis generales:

- Sólo se considera al aire como elemento del invernadero.
- Las variables de estado del sistema son la temperatura del aire, $X_{t,a}$ y la humedad del aire (absoluta, $X_{ha,a}$ y relativa, $X_{hr,a}$).
- Existen tres sistemas externos que interactúan con el sistema invernadero: aire exterior, superficie del suelo y cultivo.
- Las variables exógenas y perturbaciones que actúan sobre el sistema y que se consideran como condiciones de contorno son la temperatura del aire exterior, $P_{t,e}$, la humedad absoluta del aire exterior, $P_{ha,e}$, la velocidad del viento, $P_{vv,e}$, la dirección del viento, $P_{dv,e}$, la radiación global en el exterior, $P_{rs,e}$, la temperatura de la superficie del suelo, $P_{t,ss}$ y el índice de área foliar como medida del estado del cultivo, P_{LAI} .
- Las entradas de control del sistema son la posición de las ventilaciones, U_{ven} , la posición de la malla de sombreado, U_{malla} y la temperatura del agua que circula por las tuberías del sistema de calefacción, $U_{t,cal}$.
- Se supone el mismo valor de las variables en el volumen de aire del invernadero.
- Con respecto a los procesos relacionados con la radiación solar se establecen las siguientes hipótesis:
 - El aire no es inerte a la radiación (la absorbe y la transmite).
 - No se considera la reflexión.
- Las características físicas del aire, como la densidad o el calor específico, se consideran constantes con la temperatura y el tiempo.

Modelo simplificado de temperatura de aire

Basándose en todos los procesos que se indican, el calor acumulado en el aire del invernadero viene dado por la siguiente ecuación de balance:

$$Q_{ac,a} = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd-cnva-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (3.8)$$

donde $Q_{sol,a}$ es la radiación solar que absorbe el aire del invernadero, $Q_{cnd-cnv,a-e}$ es la transferencia de calor por convección y conducción entre el aire interior y exterior del invernadero, $Q_{cnv,ss-a}$ es la transferencia de calor por convección con la superficie del suelo, $Q_{cnv,cal-a}$ es la transferencia de calor por convección con las tuberías del sistema de calefacción, $Q_{ven,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior debido a la ventilación natural, $Q_{perd,a-e}$ es el intercambio de calor con el aire exterior por infiltración por la no estanqueidad de la estructura y las roturas en la cubierta y $Q_{tra,cu}$ es el calor latente producido por el proceso de transpiración del cultivo. Si se expresa el calor acumulado como la variación de la temperatura del aire del invernadero, $X_{t,a}$, en función del tiempo, τ , resulta:

$$c_{cesp,a}c_{den,a} \frac{c_{vol,a}}{c_{area,ss}} \frac{dX_{t,a}}{d\tau} = \\ = Q_{sol,a} + Q_{cnv,ss-a} + Q_{cnv,cal-a} - Q_{cnd-cnv,a-e} - Q_{ven,a-e} - Q_{perd,a-e} - Q_{tra,cu} \quad (3.9)$$

donde $c_{cesp,a}$ es el calor específico del aire, $c_{den,a}$ es la densidad del aire, $c_{vol,a}$ es el volumen de aire que ocupa el invernadero y $c_{area,ss}$ es el área de la superficie del suelo.

Cada uno de estos flujos de energía se modelan de la siguiente manera:

- *Radiación solar absorbida por el aire interior del invernadero.* La radiación solar que atraviesa la cubierta y alcanza el cultivo, $V_{rs,cu}$, que es la que, en parte, absorbe el aire viene determinada por:

$$V_{rs,cu} = V_{toc,cu}P_{rs,e} \quad (3.10)$$

donde $P_{rs,e}$ es la radiación solar en el exterior y $V_{toc,cu}$ es el coeficiente de transmisión de onda corta función del coeficiente de transmisión de la cubierta, $c_{toc,cb}$, del estado del blanqueado de la misma, $c_{toc,bl}$, y del estado de la malla de sombreado, $c_{toc,malla}$, tal y como se indica en la ecuación la siguiente expresión.

$$V_{toc,cu} = \begin{cases} c_{toc,cb} & \text{Malla sin extender, sin blanquear} \\ c_{toc,cb}c_{toc,bl} & \text{Malla sin extender, blanqueado} \\ c_{toc,cb}c_{toc,malla} & \text{Malla extendida, sin blanquear} \\ c_{toc,cb}c_{toc,bl}c_{toc,malla} & \text{Malla extendida,blanqueado} \end{cases} \quad (3.11)$$

Por tanto, la radiación solar que absorbe el aire, $Q_{sol,a}$, viene expresada por:

$$Q_{sol,a} = c_{aoc,a}V_{rs,cu} \quad (3.12)$$

donde $c_{aoc,a}$ es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta del aire del invernadero, aunque, como realmente el aire es inerte a la radiación solar, se trata de un parámetro de eficiencia térmica de la energía solar. Este coeficiente hay que estimarlo en el proceso de calibración del modelo.

- *Transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y el aire interior.* El modelado de este proceso, $Q_{cnv,ss-a}$ es función de la diferencia entre la temperatura de la superficie del suelo, $X_{t,ss}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$:

$$Q_{cnv,ss-a} = c_{cnv,ss-a}(X_{t,ss} - X_{t,a}) \quad (3.13)$$

donde $c_{cnv,ss-a}$ es el coeficiente de convección que se considera constante y que hay que estimar.

- *Transferencia de calor por convección entre las tuberías de calefacción y el aire interior.* En el modelado de este proceso, $Q_{cnv,cal-a}$, se considera que la temperatura de la superficie exterior de las tuberías es igual a la del agua que circula por ellas, $U_{t,cal}$, que es una entrada de control del sistema. Este proceso se modela como una función de su diferencia con la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{cnv,cal-a} = c_{cnv,cal-a}(U_{t,cal} - X_{t,a}) \quad (3.14)$$

donde $c_{cnv,cal-a}$ es el coeficiente de convección de la calefacción que se considera constante y que hay que estimar.

- *Transferencia de calor por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior.* El modelado de este proceso, $Q_{cnd-cnv,a-e}$ es una función lineal proporcional a la diferencia entre la temperatura del aire exterior, $P_{t,e}$, y la temperatura del aire interior, $X_{t,a}$, es decir:

$$Q_{cnd-cnv,a-e} = c_{cnd-cnv,a-e}(X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (3.15)$$

donde $c_{cnd-cnv,a-e}$ es el coeficiente de pérdidas que se considera constante y se estima empíricamente.

- *Transferencia de calor con el aire exterior debido a ventilación y pérdidas por infiltración.* Como se ha comentado anteriormente, los dos flujos se modelan simultáneamente ya que el proceso de las pérdidas por infiltración entre el exterior y el interior se incluye como un efecto constante en el flujo de ventilación, $V_{ven,flujo}$. Por tanto, se utiliza el siguiente modelo para describir estos procesos:

$$Q_{ven,a-e} + Q_{perd,a-e} = \frac{c_{den,a}c_{esp,a}}{c_{area,ss}} V_{ven,flujo} (X_{t,a} - P_{t,e}) \quad (3.16)$$

Existen distintas teorías para modelar el flujo de ventilación. Después de implementar y estudiar diversos modelos, comparando datos reales y estimados, se optó por el siguiente, basado en una combinación de efecto térmico y efecto eólico:

$$V_{ven,flujo} = c_{ven,n} \frac{c_{ven,l}c_{ven,cd}V_{ven,ae}}{2} \left[\left(c_{gv} \frac{V_{ven,ae}}{2} \frac{(X_{t,a} - P_{t,e})}{P_{t,e}} \right)^{0,5} + (c_{ven,cv}^{0,5} P_{vv,e}) \right] + V_{perd} \quad (3.17)$$

donde $c_{ven,n}$ es el número de ventilaciones que dispone el invernadero, $c_{ven,l}$ es la longitud de la ventilación, $c_{ven,cd}$ es el coeficiente de descarga y $c_{ven,co}$ es el coeficiente debido al viento. Es necesario estimar estos dos últimos coeficientes. La apertura efectiva de la ventana, $V_{ven,ae}$, se calcula en función de la apertura de la misma, U_{ven} , y a su anchura, $c_{ven,a}$. Corresponde a la longitud del segmento que une los extremos de la apertura, por lo que por trigonometría:

$$V_{ven,ae} = 2c_{ven,a}\text{sen}(U_{ven}/2) \quad (3.18)$$

Cuando el invernadero se encuentra con la ventilación cerrada, existe un flujo de ventilación debido a que no es completamente estanco y a las posibles roturas que presente la cubierta, por lo que por infiltración se produce una corriente de aire entre el interior y el exterior del invernadero que se conoce como flujo de pérdidas, V_{perd} . Evidentemente, es función del viento en el exterior y la forma de modelarlo consiste en utilizar un valor constante, $c_{perd,vb}$, para una velocidad de viento menor que una determinada, $c_{vv,limven}$ (también a estimar ya que varía según los estudios realizados por distintos autores) y otro valor $c_{perd,va}$ si supera esa determinada velocidad del viento, es decir:

$$V_{perd} = \begin{cases} c_{perd,vb} & P_{vv,e} < c_{vv,limven} \\ c_{perd,va} & P_{vv,e} \geq c_{vv,limven} \end{cases} \quad (3.19)$$

El principal problema de este modelo para utilizarlo en tareas de control es que es difícilmente invertible, por lo que es conveniente optar por otro tipo de formulaciones que simplifiquen el problema y proporcionen unos resultados aceptables. En concreto, se puede demostrar la utilidad del modelo empírico de flujo de ventilación, $V_{ven,flujo}$, descrito por la siguiente expresión:

$$V_{ven,flujo} = c_{ven,n}(c_{ven,1}U_{ven}^{c_{ven,2}}) + c_{ven,3} \quad (3.20)$$

donde $c_{ven,n}$ es el número de ventilaciones que dispone el invernadero, $c_{ven,1}$ y $c_{ven,2}$ son dos parámetros empíricos utilizados para ajustar el modelo de flujo de ventilación en función de la apertura de la ventana y $c_{ven,3}$ modela el flujo de pérdidas. Hay que indicar que los parámetros $c_{ven,1}$ y $c_{ven,3}$ dependen de la velocidad del viento luego presentan ciertas incertidumbres.

- *Transferencia de calor latente por transpiración del cultivo.* El efecto de la transpiración del cultivo sobre la temperatura del aire del interior del invernadero se ha modelado utilizando relaciones empíricas con variables ambientales. La energía utilizada por el cultivo para la transpiración en un cultivo de tomate se puede modelar con:

$$Q_{tra,cu} = c_{tra,1}V_{rs,cu} + c_{tra,2}V_{dpv,a} + c_{tra,3}V_{vv,cu} \quad (3.21)$$

donde $V_{rs, cu}$ es la radiación que alcanza al cultivo, $V_{dpv, a}$ corresponde al déficit de presión de vapor, $V_{vv, cu}$ es la velocidad del viento sobre el cultivo y los parámetros empíricos $c_{tra,1}$, $c_{tra,2}$ y $c_{tra,3}$ de cada una de estas perturbaciones.

En resumen, cabe indicar que el modelo simplificado de la temperatura del aire del invernadero tiene una estructura afín en el flujo de ventilación. Se muestra un modelo simplificado:

$$c_{ter,a} \frac{dX_{t,a}}{dt} = c_r P_{rs,e} + c_h (U_{t,cal} - X_{t,a}) - (\phi_v + \phi_c) (X_{t,a} - P_{t,e}) + c_s (X_{t,ss} - X_{t,a}) + \lambda E_{vap} \quad (3.22)$$

donde $c_{ter,a}$ es el producto del calor específico del aire, su densidad y la altura efectiva del invernadero, ϕ_v el coeficiente de transferencia de calor debido a la ventilación ϕ_c el coeficiente de transferencia de calor del interior al exterior del invernadero, c_r la eficiencia del calentamiento debido al sol, c_h un coeficiente de transferencia de calor del sistema de calefacción y c_s el coeficiente de transferencia de calor del suelo al aire interior. El balance incluye un término que tiene en cuenta los flujos de energía latente λE_{vap} , donde λ es la energía de vaporización del agua y E_{vap} la evapotranspiración. Nótese que el modelo tiene una estructura afín en ϕ_v , que está relacionada directamente con la apertura de ventilación a través de (3.16) y (3.20).

Para implementar el controlador a un sistema tan complejo, se ha hecho uso del feedback linealization, se saca factor común al término $X_{t,a}$ obteniéndose una función diferencial simplificada del modelo como muestran las ecuaciones (3.23) y (3.25).

$$c_{ter,a} \frac{dX_{t,a}}{dt} + X_{t,a} (c_h + ((\phi_v + \phi_c) + c_s)) = c_r P_{rs,e} + c_u U_{t,cal} - P_{t,e} + c_s X_{t,ss} + \lambda E_{vap} \quad (3.23)$$

$$v(t) = c_r P_{rs,e} + c_u U_{t,cal} - P_{t,e} + c_s X_{t,ss} + \lambda E_{vap} \quad (3.24)$$

$$c_{ter,a} \frac{dX_{t,a}}{dt} + X_{t,a} (c_h + ((\phi_v + \phi_c) + c_s)) = v(t) \quad (3.25)$$

De esta forma utilizando una señal virtual llamada $v(t)$ se simplifica el modelo a uno de primer orden. La variable a controlar es la temperatura, haciéndolo mediante el flujo de ventilación (apertura de la ventana).

No obstante, se obtuvo el modelo en el sistema real de forma empírica en diferentes ensayos, y cambiando el modelo del invernadero en base a las ecuaciones (3.23) y (3.25),

obteniendo incertidumbre paramétrica y retardo que viene representada por la función de transferencia (3.26).

$$X_{t,a} = P(s) = \frac{k}{\tau s + 1} e^{-ds} \quad (3.26)$$

$$k \in [0,0021, 0,0084]^{\circ}C / \%$$

$$\tau \in [9, 32] \text{min}$$

$$d \in [2, 7] \text{min}$$

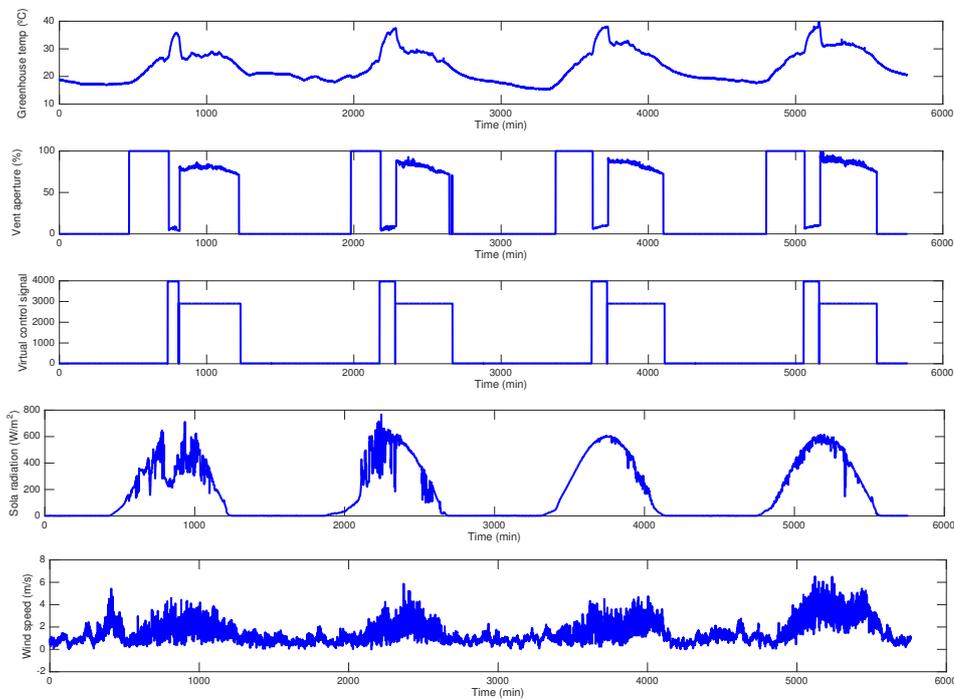


Figura 3.11: Ensayo en lazo abierto en el invernadero.

Las Figuras 3.11 muestra un ensayo en lazo abierto en el sistema para obtener el modelo, que tal y como se observa, la respuesta del sistema ante una entrada en escalón de la señal virtual de control tiene forma de un sistema de primer orden. La Figura y 3.12 muestra la validación del modelo lineal calculado, para uno de los días mostrados en la Figura 3.11.

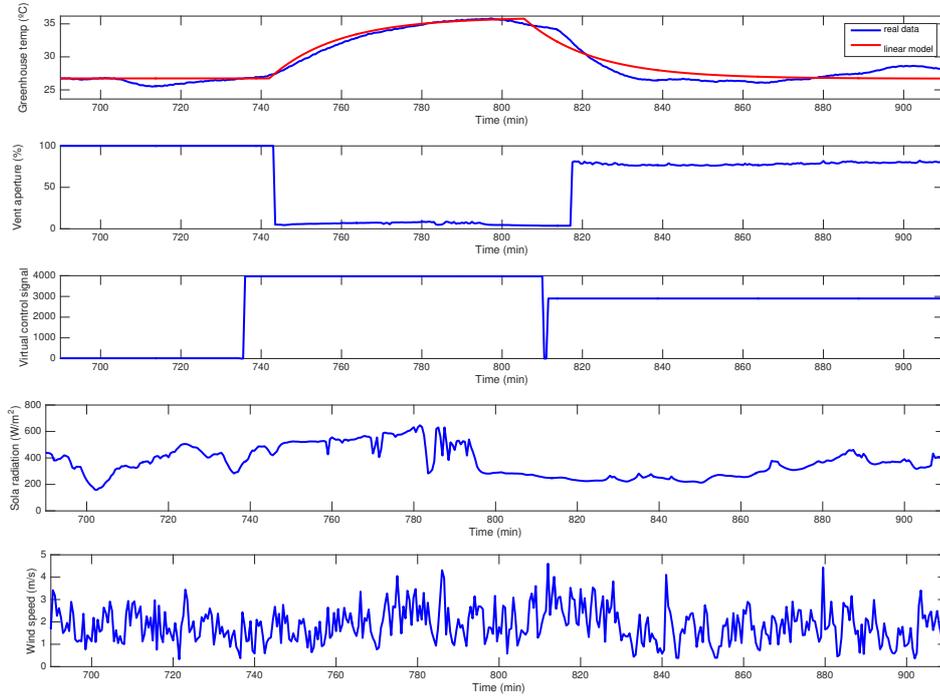


Figura 3.12: Validación del modelo del invernadero.

3.3.2. Diseño del controlador

La aproximación al modelo lineal obtenido después de implementar el FL viene dada por (3.23) y (3.25). Un sistema FOPDT con incertidumbre en la ganancia, en la constante de tiempo y con retardo. Debido al orden de la constante de tiempo y al retardo, las bajas frecuencias son las que se deben estudiar, por eso se seleccionan $W = \{0,00010,0050,010,1\}$ rad/s como frecuencias de trabajo para el diseño del controlador con QFT. Se considera la especificación para que el margen de fase sea mayor o igual que 45 grados. Debido a la naturaleza del sistema, el principal problema a tener en cuenta es el de regulación. Por lo tanto, la especificación para el problema de rechazo a perturbaciones viene dada por la siguiente ecuación:

$$|T_{dy}(j\omega)| = \left| \frac{P(j\omega)}{1 + C(j\omega)P(j\omega)} \right| \leq \left| \frac{K_d j\omega}{(\tau_d j\omega + 1)^n} \right| \forall \omega \in W \quad (3.27)$$

donde $\tau_d = (0,95/n)$, con $K = 9$, $n = 2$ y $\tau_{ol} = 9$ min. El parámetro τ_{ol} es escogido como

la constante de tiempo en bucle abierto de la planta más lenta.

La planta nominal escogida para el diseño viene dada por $k = 0,0021 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$, $\tau = 32 \text{ min}$ y $d = 2 \text{ min}$. La Figura 3.13 muestra los templates obtenidos para todas las frecuencias de diseño. La Figura 3.14 muestra la estabilidad y los bounds de las perturbaciones en la entrada para las frecuencias W y las especificaciones fijadas anteriormente.

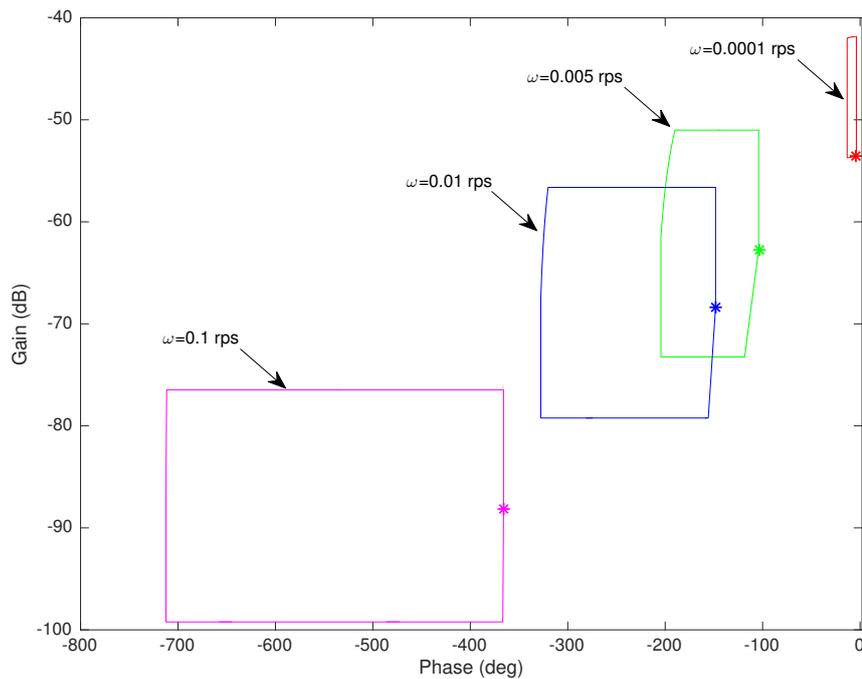


Figura 3.13: Templates para las frecuencias en W .

El controlador seleccionado para cumplir las restricciones que presentan los boundaries es un PI, representado por la ecuación (3.28). La Figura 3.14 muestra la función de transferencia nominal del lazo abierto cumpliendo todos los boundaries para todas las frecuencias en W .

$$C(s) = \frac{0,14(s/0,0007 + 1)}{s} \quad (3.28)$$

Las Figuras 3.15 y 3.16 muestran la validación del controlador PI controller. Se cumplen todas las especificaciones.

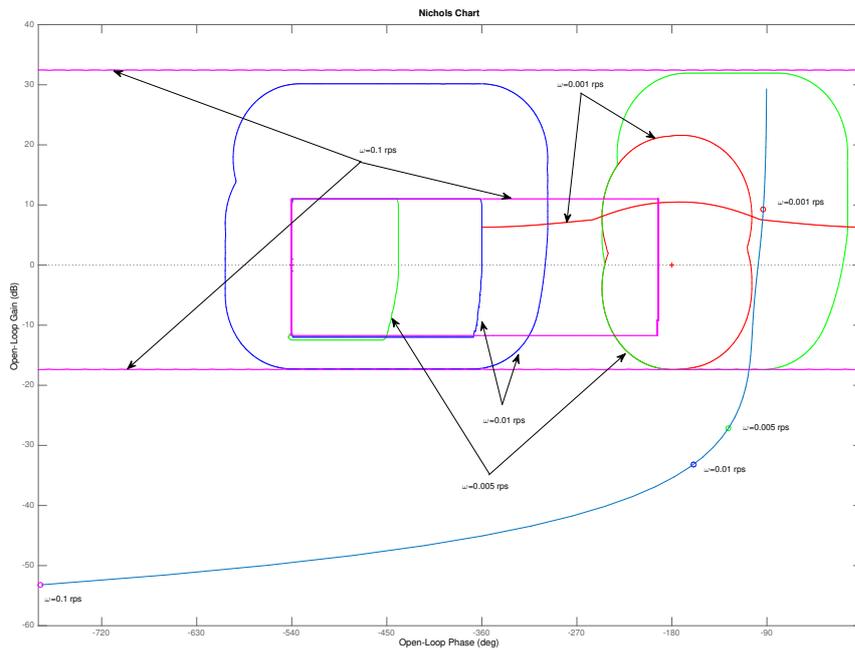


Figura 3.14: Fronteras de estabilidad y rechazo a perturbaciones, y ajuste de la función nominal en bucle abierto.

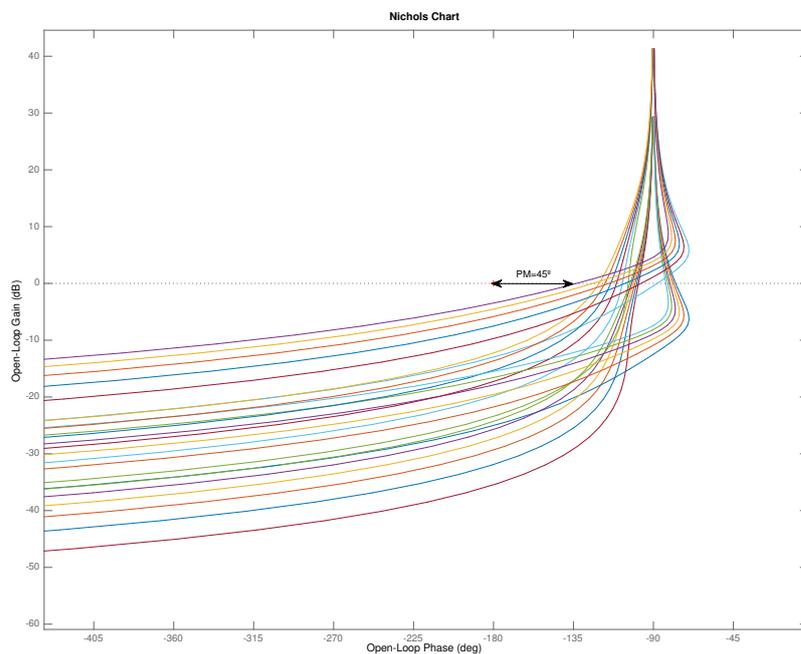


Figura 3.15: Validación de la especificación de estabilidad (Margen de fase de 45°).

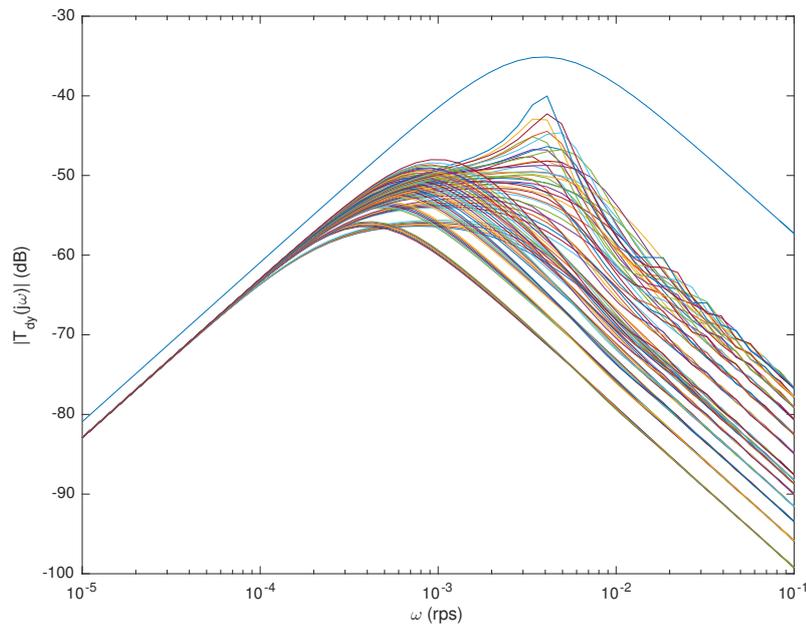


Figura 3.16: Validación para el rechazo de perturbaciones en la entrada.

3.3.3. Resultados

Dicho controlador fue evaluado experimentalmente haciendo uso de la arquitectura de control presentada en las Figuras 3.17, 3.18 y 3.19.

En todos los ensayos se puede observar cómo el esquema de control propuesto sigue la referencia del proceso a pesar de las variaciones en las variables climáticas y los cambios de punto de operación. Se observa que el sistema se comporta del mismo modo en todos los puntos de operación tal y como se desea con un controlador robusto. Del mismo modo, se compensa la no linealidad del sistema, obteniendo una respuesta similar en los tres días.

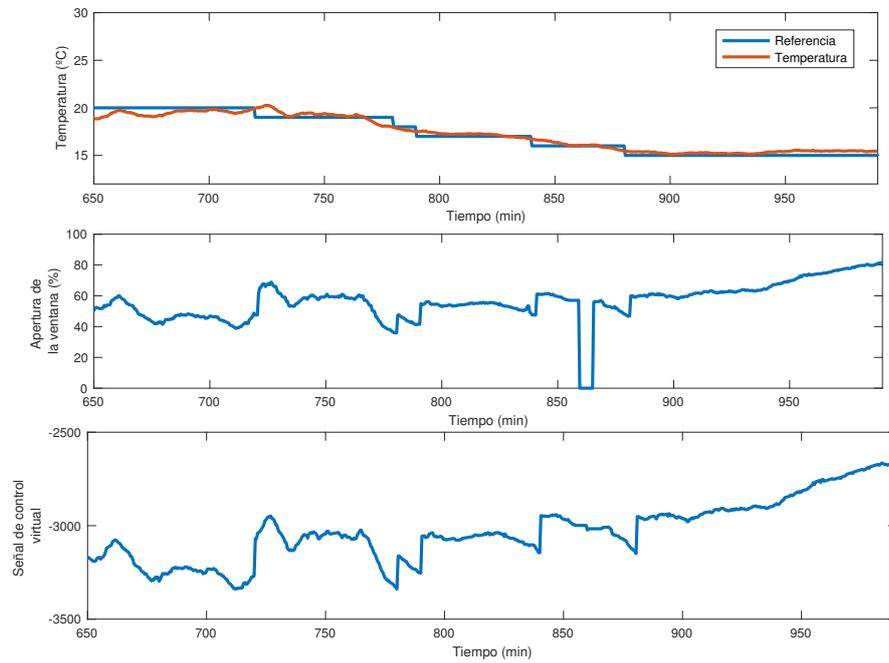


Figura 3.17: Ensayo de control el primer día.

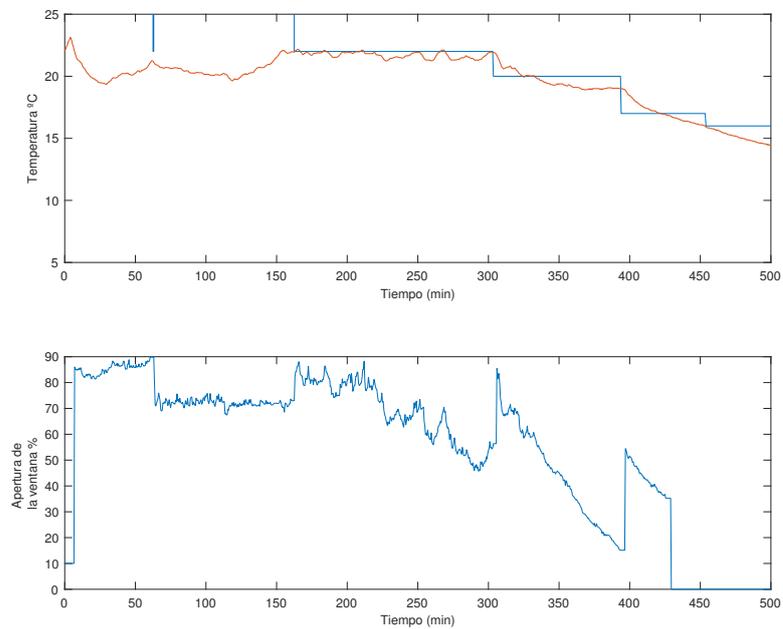


Figura 3.18: Ensayo de control el segundo día.

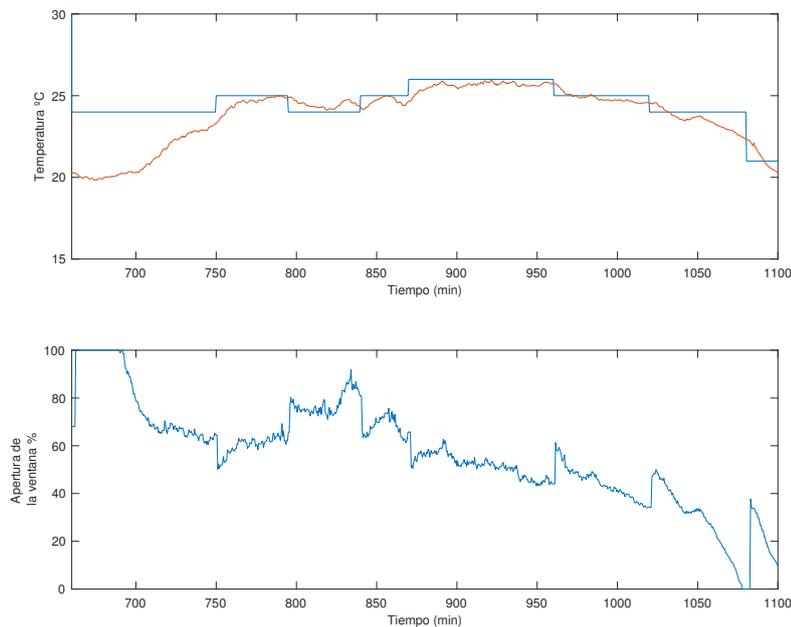


Figura 3.19: Ensayo control el tercer día.

3.4. Controlador PI robusto en un esquema de control con feed-forward

En este apartado se propone una solución para el esquema de control con feed-forward presentado en [11], donde un controlador PI se combina con el feedforward. La idea consiste en mover traducir el efecto de la incertidumbre de las perturbaciones en boundaries en las especificaciones de QFT y diseñar un controlador PI para el sistema, modificando los boundaries originales del diseño clásico de un controlador robusto mediante QFT para el problema de regulación. Destacar que no se diseña el feedforward desde un punto de vista robusto, si no que su efecto se traduce en modificar las especificaciones una vez que diseñemos el controlador mediante QFT.

Como se describe en la sección 2.5, el feedforward es usado como compensador por adelantado. Normalmente se calcula asumiendo que no hay incertidumbre [11]. Cuando se consideran solo los casos nominales no hay problemas de inversión, haciendo que el rechazo de la perturbación se realice por completo, y de forma exacta.

En este trabajo, se asumen incertidumbres paramétricas tanto en la modelo de la plan-

ta P_u como en el de la perturbación P_d . De esta forma se analiza el problema clásico de diseño de un feedforward para el rechazo a perturbación pero desde un punto de vista robusto. Las plantas utilizadas son:

$$\mathcal{P}_u = \{P_u : k_u \in [k_{u,low}, k_{u,high}], \tau_u \in [\tau_{u,low}, \tau_{u,high}]\} \quad (3.29)$$

$$\mathcal{P}_d = \{P_d : k_d \in [k_{d,low}, k_{d,high}], \tau_d \in [\tau_{d,low}, \tau_{d,high}]\} \quad (3.30)$$

$$P_u^0(s) = \frac{k_u^0}{\tau_u^0 s + 1} \quad (3.31)$$

$$P_d^0(s) = \frac{k_d^0}{\tau_d^0 s + 1} \quad (3.32)$$

donde $P_u^0(s) \in \mathcal{P}_u$ y $P_d^0(s) \in \mathcal{P}_d$ son las plantas nominales.

El primer problema a analizar es observar cómo el uso de un esquema con feedforward que posee incertidumbre afecta a las especificaciones del sistema en un problema de regulación.

Se reescriben las ecuaciones:

$$T_{dy}(s) = \frac{P_{dg}(s)}{1 + C(s)P_u(s)}$$

donde P_{dg} viene dado por la siguiente ecuación

$$P_{dg}(s) = -FF(s)P_u(s) + P_d(s) \quad (3.33)$$

Si $FF = 0$ se tienen las especificaciones clásicas de rechazo a perturbaciones de QFT.

Donde P_u y P_d son inciertas, y el diseño mediante QFT es utilizado para calcular el controlador. La especificación para el problema de regulación viene dada por:

$$|T_{dy}(j\omega)|_{dB} = \left| \frac{P_{dg}(j\omega)}{1 + C(j\omega)P_u(j\omega)} \right|_{dB} \leq \delta_{dB} \quad (3.34)$$

que equivale a:

$$\left| \frac{1}{1 + C(j\omega)P_u(j\omega)} \right|_{dB} \leq \delta_{dB} - |P_{dg}(j\omega)|_{dB} = \gamma(\omega) \quad (3.35)$$

para todas las plantas $P_u \in \mathcal{P}_u$, $P_d \in \mathcal{P}_d$ y donde γ es el nuevo bound para la especificación.

Por lo tanto, se puede observar cómo el compensador feedforward y las incertidumbres afectan al límite dentro de la definición de la especificación. De esta forma, teniendo en cuenta (3.34) y (3.35), hay dos formas de abordar el problema de control robusto:

- El primero es usar (3.35) y continuar diseñando el controlador de la forma clásica que indica el QFT. En este caso, el límite de la especificación γ depende de las incertidumbres del sistema y del compensador por feedforward $P_{dg}(j\omega)$. El valor mínimo de γ para todas las plantas $P_u \in \mathcal{P}_u$ y $P_d \in \mathcal{P}_d$, y en todas las frecuencias evaluadas se debe de considerar como especificación. Una vez que el límite mínimo se calcule, se calcula el controlador de la forma clásica con QFT. De este modo se obtiene una solución muy conservadora ya que se calcula el bound para el peor caso.
- Por otro lado, la segunda solución es considerar la especificación de la ecuación (3.34) explícitamente y modificar el cálculo de la frontera en QFT. De esta forma, los nuevos boundaries se obtienen teniendo en cuenta la presencia de la incertidumbre en el feedforward obteniendo un controlador que cumpla los nuevos límites. **Así es como se realiza en este trabajo.**

Primero, se seleccionan las plantas nominales $P_u^0(s)$ and $P_d^0(s)$, y el feedforward se calcula utilizando las reglas propuestas en [11]. Esto es, K_{ff} se configura con $T_p = \tau_d^0$ and $T_z = \tau_u^0$.

A continuación, se modifica el algoritmo propuesto en [24] para el cálculo de las nuevas fronteras en QFT con el objetivo de incluir un nuevo tipo de boundary que asegure cumplir con las especificaciones de la ecuación 3.34) cuando $FF \neq 0$. Es importante tener en cuenta el concepto de sección de corte definido en [24]. Fijando una pase en el plano de Nichols (NP) (y la frecuencia ω de donde se calcula el boundary), la sección de corte es una función de la magnitud de la planta nominal en lazo abierto $L_0 = CP_u^0$, que proporciona un valor de interés, el valor $Max|T_{dy}(j\omega)|_{dB}$ en este trabajo. Como P_u^0 esta fijada, el valor de $L_0(j\omega)$ en el plano de Nichols dependerá del valor de $C(j\omega)$ (el grado de libertad que se tiene).

La Figura 3.20 muestra un ejemplo de crosssection para el problema de regulación en el caso de tener feedforward y sin él, para $\omega = 1$ rad/s y fase $(L_0(j\omega)) = -100$ grados. En esta Figura, se muestran dos especificaciones diferentes, $\delta_{dB} = -20dB$ y $\delta_{dB} = -10dB$ respectivamente. Se puede observar cómo ambas soluciones corta la especificación $\delta_{dB} < -20dB$ cortan en el valor de 5.66 dB. Aún así, para las especificaciones con $\delta_{dB} \geq -20dB$ ambas soluciones son diferentes. Esto significa que se obtienen diferentes

boundaries en ambos casos, y por lo tanto diferentes diseños en el controlador. Por ejemplo, para la especificación de $\delta_{dB} = -10dB$, el caso de $FF = 0$ no corta el límite, mientras que $FF \neq 0$ lo hace en el valor de -4.19 dB. De este modo, se obtiene una solución más restrictiva cuando se incluye el feedforward.

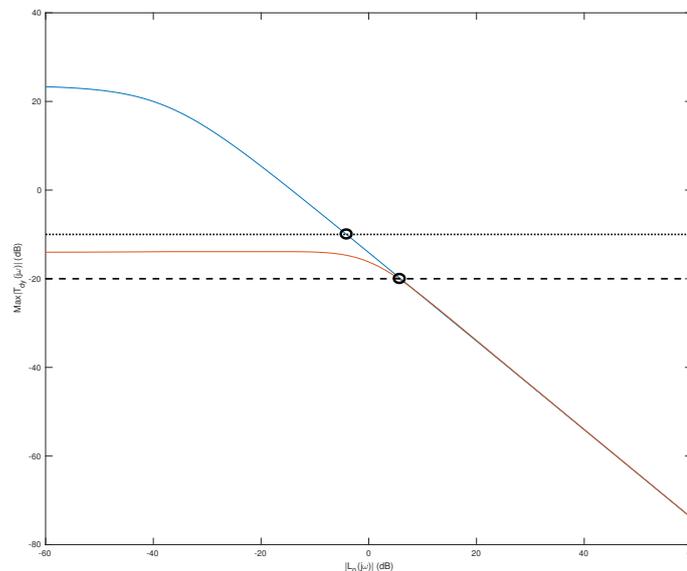


Figura 3.20: Secciones de corte para el problema de regulación para $FF = 0$ (rojo) y para $FF \neq 0$ (azul) para $\omega = 1$ rad/s y $phase(L_0(j\omega)) = -100$ grados. Se muestran dos especificaciones, para $\delta_{dB} = -20$ (-) y $\delta_{dB} = -10$ (-).

Este resultado indica que el uso del feedforward puede afectar negativamente al control si no se presentan errores de modelado. Este hecho se puede observar mejor en la Figura 3.21. En esta Figura se muestran los boundaries para la especificación de $\delta_{dB} = -10dB$. Se puede observar que el boundary está abierto cuando $FF \neq 0$ y cerrado cuando $FF = 0$, siendo el primero mucho más restrictivo. No obstante, es interesante observar cómo para la zona cercana a $(-180^\circ, 0$ dB), el boundary para $FF \neq 0$ es más pequeño y por lo tanto, menos restrictivo. En cualquier caso, normalmente esta zona está protegida por los boundaries de estabilidad y por lo tanto, no es una gran ventaja frente al otro.

Así, se concluye que QFT se puede utilizar para diseñar el controlador robusto con el esquema de feedforward, considerando también incertidumbres en el proceso. Sin embargo, la presencia del feedforward afecta al cálculo clásico de los boundaries en QFT, y hay que cumplir nuevas especificaciones en el proceso de diseño del controlador. En

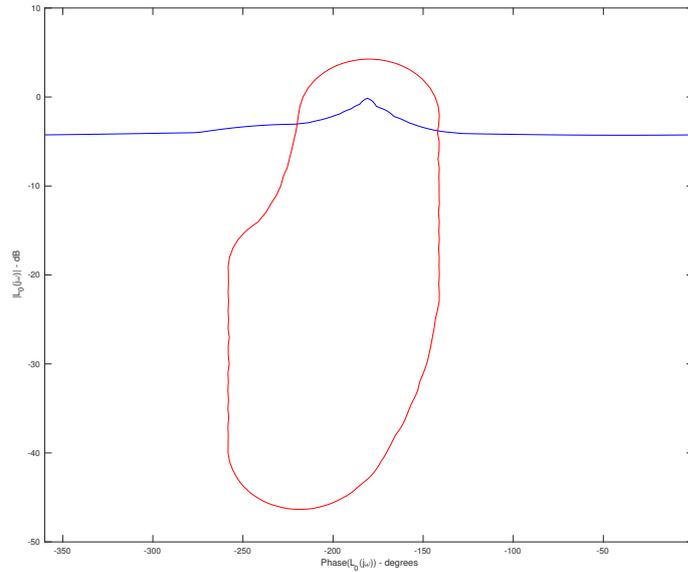


Figura 3.21: Comparación de la frontera para el problema de regulación para $FF = 0$ (rojo) and for $FF \neq 0$ (azul) for $\omega = 1$ rad/s and $phase(L_0(j\omega)) = -100$ grados y para la especificación $\delta_{dB} = -10$.

las siguientes secciones se muestra un ejemplo numérico del proceso.

3.4.1. Ejemplo numérico

Se asumen los siguientes modelos:

$$\mathcal{P}_u(s) = \frac{k_u}{\tau_u s + 1}, \quad k_u \in [1, 10], \tau_u \in [1, 10] \quad (3.36)$$

y

$$\mathcal{P}_d(s) = \frac{k_d}{\tau_d s + 1}, \quad k_d \in [3, 7], \tau_d \in [11, 15] \quad (3.37)$$

con los modelos nominales P_u^0 con $k_u^0 = 1$ y $\tau_u^0 = 10$ y P_d^0 con $k_d^0 = 3$ y $\tau_d^0 = 11$.

Como se ha comentado anteriormente, hay dos posibles soluciones para el problema basándose en las ecuaciones (3.34) o (3.35). Ambas se llevan a cabo.

Solución clásica

Una solución para el problema es utilizar la especificación para el problema que define la ecuación (3.35). En este caso se utiliza el peor caso para definir las especificaciones y a continuación se diseña el controlador QFT con los clásicos boundaires.

La Figura 3.22 muestra diferentes valor para la función γ definida en la ecuación (3.35) para todas las plantas \mathcal{P}_u y \mathcal{P}_d . La curva con asteriscos muestra el caso cuando $FF = 0$ y el resto de curvas todos los valores de γ cuando $FF \neq 0$. Por lo tanto, se observa cómo para esta selección del nominal, hay mucha más incertidumbre cuando hay presencia del feedforward, convirtiéndose en una especificación mas restrictiva (se requiere también un controlador más agresivo) ya que se encuentran por debajo del caso cuando $FF = 0$. Por lo tanto, este resultado indica que en este caso, la selección de la planta nominal no puede ser arbitraria. Se necesita obtener la planta nominal que dé el valor máximo de γ para todas las combinaciones posibles.

Si se lleva a cabo este ejemplo, los resultados que se muestran en la Figura 3.23 han sido obtenidos para el mejor caso, seleccionando los modelos nominales de la planta para el valor menos restrictivo de γ . Esta solución se ha obtenido para los modelos nominales P_u^0 con $k_u^0 = 10$ y $\tau_u^0 = 1$ y P_d^0 con $k_d^0 = 3$ y $\tau_d^0 = 11$. Se puede observar que cuando $FF \neq 0$ todas las funciones γ son mejores o iguales a la función γ cuando $FF = 0$. Ahora, esta función ha de ser utilizada como especificación en la ecuación (3.35) con $\gamma(\omega) = \delta_{dB} - |P_d(j\omega)|_{dB}$, la cual es la misma que cuando no se incluye el feedforward en el control. Si se coge cualquier otro valor para la planta nominal, algunas funciones γ estarán por debajo de la línea de asteriscos de la Figura 3.23 como se muestra en el caso de la Figura 3.22, haciendo que la especificación sea más restrictiva y por lo tanto la señal de control sea más agresiva.

Nueva solución

En este caso se considera la especificación de la ecuación (3.34) y se muestra una nueva solución. Se tienen en cuenta las especificaciones clásicas de estabilidad de QFT y un nuevo tipo de especificación para el rechazo de perturbaciones. Para la especificación de estabilidad se considera un margen de fase mayor o igual a 45 grados para todo el conjunto de incertidumbre. Esta especificación en la función de transferencia de bucle cerrado viene dada por:

$$|T(j\omega)| = \left| \frac{C(j\omega)P_u(j\omega)}{1 + C(j\omega)P_u(j\omega)} \right| \leq 2,32dB \quad (3.38)$$

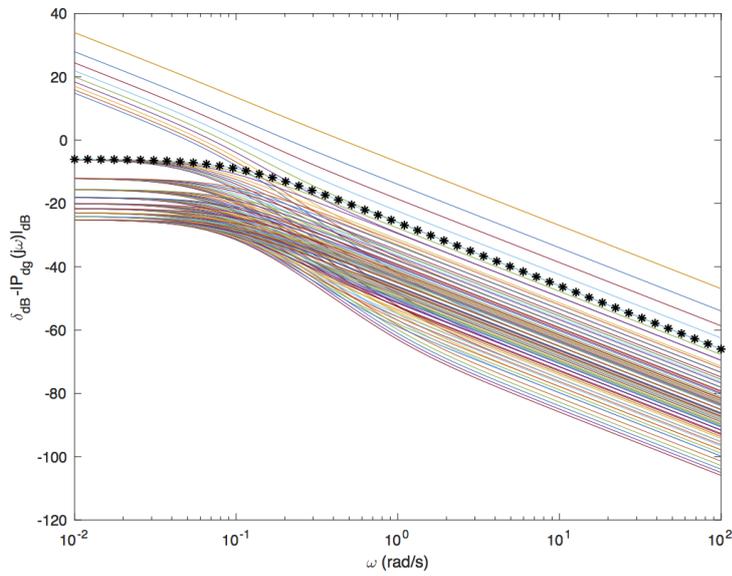


Figura 3.22: Término a la derecha de la ecuación (3.35) con $FF = 0$ (*) y con $FF \neq 0$ (-) para los modelos nominales P_u^0 con $k_u = 1$ y $\tau_u = 10$ y P_d^0 con $k_d = 3$ y $\tau_d = 11$.

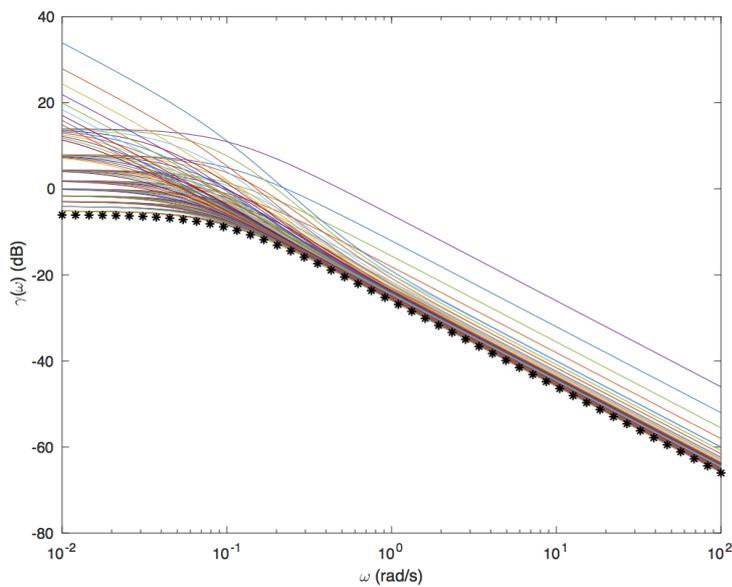


Figura 3.23: Término a la derecha de la ecuación (3.35) con $FF = 0$ (*) and with $FF \neq 0$ (-) para los modelos nominales P_u^0 con $k_u = 10$ y $\tau_u = 1$ y P_d^0 con $k_d = 3$ y $\tau_d = 11$.

Por otro lado, la especificación para el rechazo de perturbaciones es $\delta_{dB} = -40dB$. El conjunto de frecuencias donde se va a trabajar es $W = \{0,1,1,10,100\}$ rad/s.

La Figura 3.24 muestra los templates para el conjunto de frecuencias de diseño y el conjunto de plantas de la ecuación (3.36). La Figura 3.25 muestra los bounds de estabilidad (todos son cerrados), y los de rechazo a perturbaciones (todos son abiertos) para todo el conjunto de frecuencias de diseño. Se muestra cómo la planta nominal de lazo directo cumple todos los boundaries, obteniendo así un controlador PI con $K_p = 400$ and $T_i = 100$. Los parámetros utilizados para el FF son $T_z = 10$, $T_p = 11$, y $K_{ff} = 3$.

Las Figuras 3.26 y 3.27 muestran que el sistema de control satisface las especificaciones en el dominio de la frecuencia.

Finalmente, las Figuras 3.28 and 3.29 muestran los resultados en el dominio del tiempo para el controlador robusto seleccionado y para el control nominal utilizado en [11]. Se puede observar como para el caso propuesto, la perturbación casi se rechaza por completo a pesar de la incertidumbre con una mejora importante frente al caso nominal de la Figura 3.29. Además, el esfuerzo de control en ambos casos es similar.

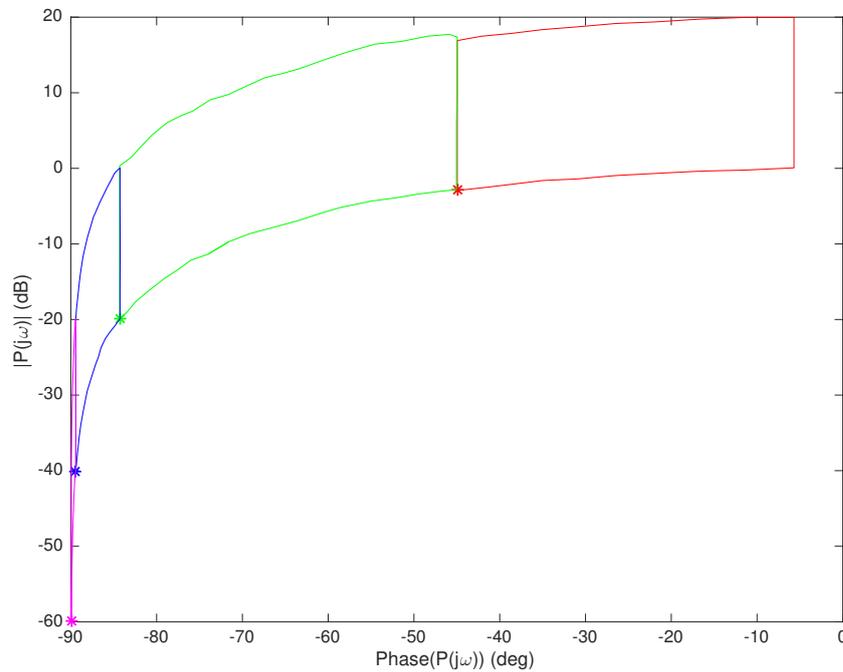


Figura 3.24: Templates para $\omega \in \{0,1,1,10,100\}$ rad/s

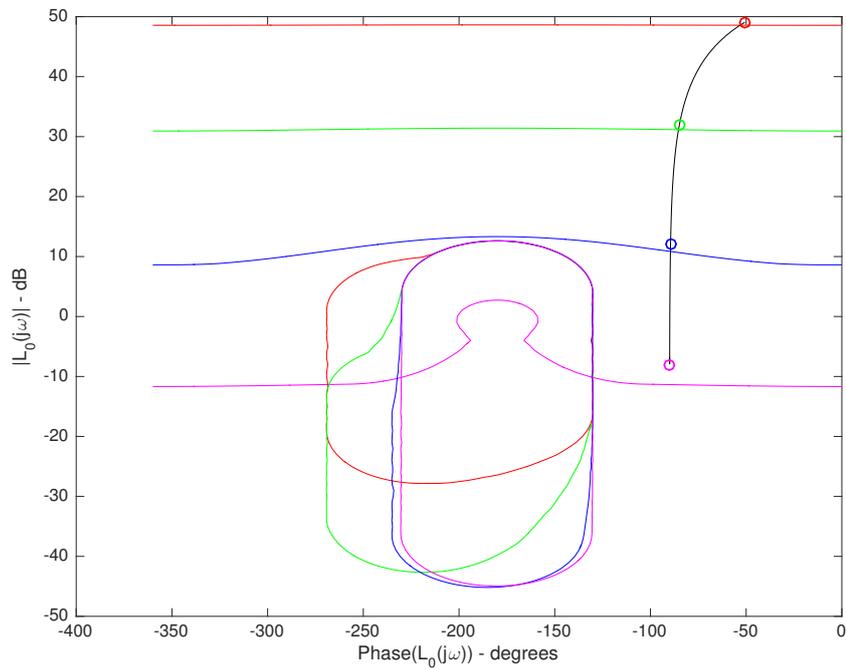


Figura 3.25: Ajuste del lazo abierto nominal y fronteras de estabilidad y de rechazo a perturbaciones teniendo en cuenta el FF.

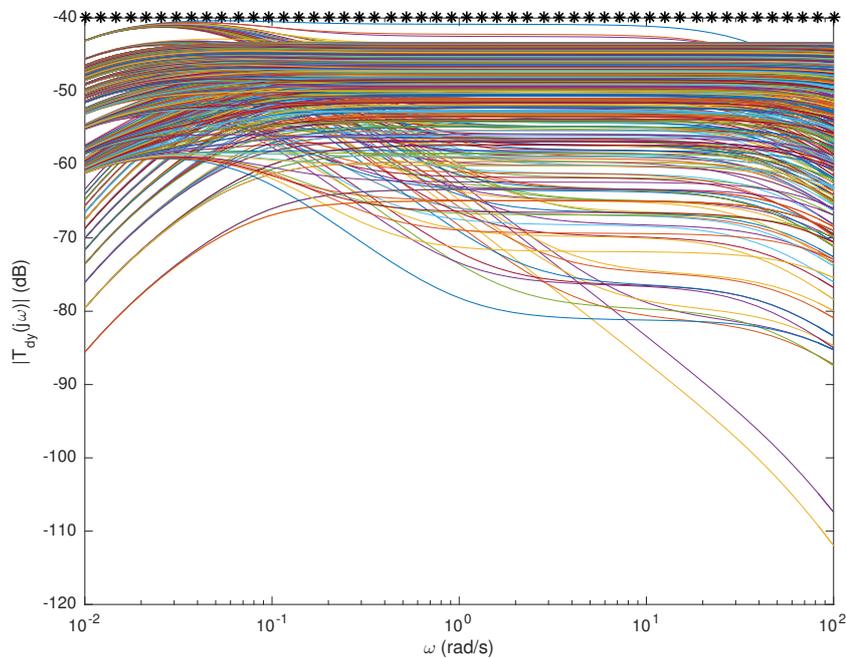


Figura 3.26: $T_{dy}(j\omega)$ especificación y función de transferencia con incertidumbre

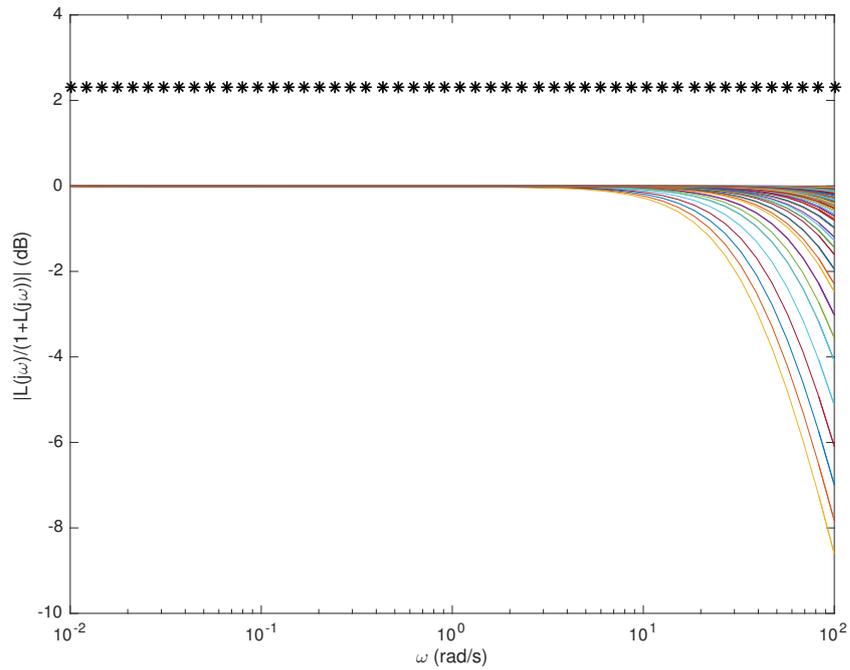


Figura 3.27: $T(j\omega)$ especificación y función de transferencia con incertidumbre

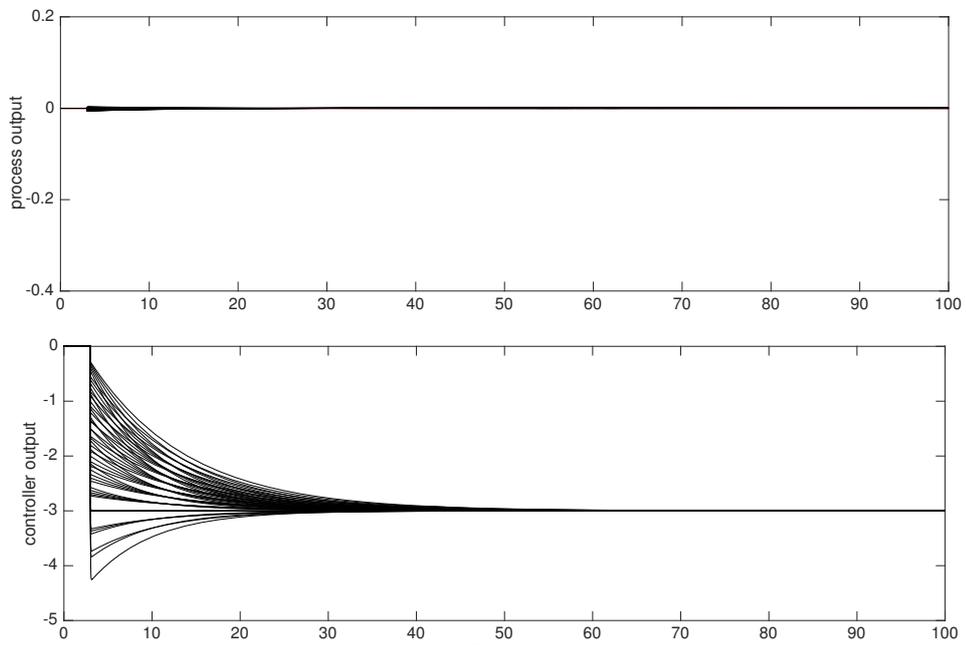


Figura 3.28: Simulación en el dominio del tiempo para el controlador robusto diseñado. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos

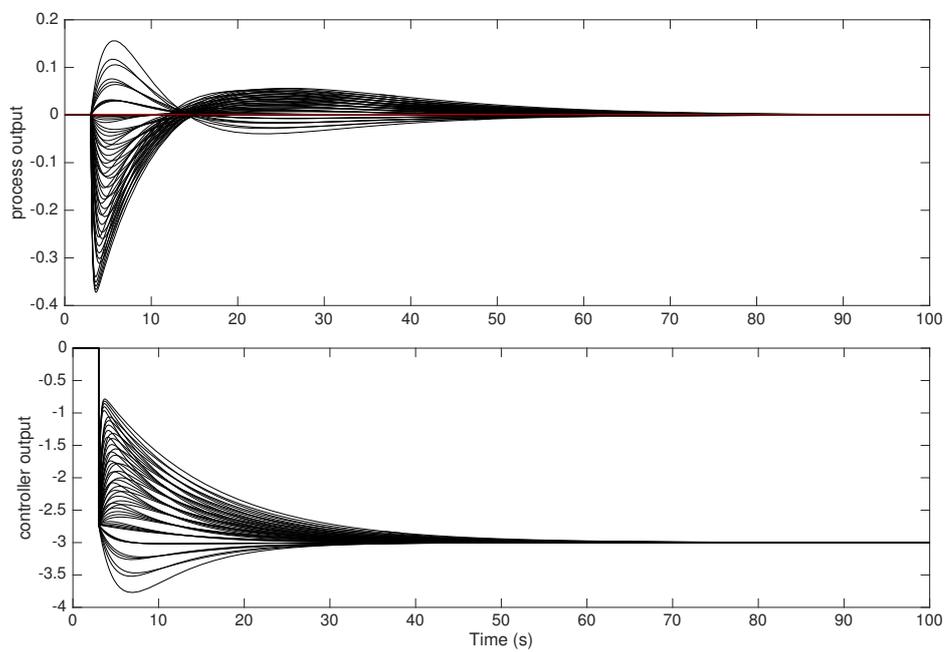


Figura 3.29: Simulación en el dominio del tiempo para el controlador propuesto por [11]. Se le añade una perturbación con un escalón unitario en el instante $t = 3$ segundos.

4

Conclusiones y futuros trabajos

En este Trabajo de Fin de Máster se han presentado algunas ideas preliminares sobre el desarrollo de estrategias de control robustas para sistemas no lineales centrado fundamentalmente en el rechazo a perturbaciones. Se han presentado dos enfoques con carácter práctico para realizar el control del pH de un fotobiorreactor industrial y de la temperatura interior de un invernadero con ventilación natural.

En el caso del fotobiorreactor, en primer lugar, la dinámica no lineal del proceso ha sido capturada en forma de modelo de bajo orden con incertidumbre paramétrica. El modelo ha sido obtenido tras realizar ensayos para 20 días diferentes y 3 puntos de operación cercanos a la zona de productividad óptima del proceso. Posteriormente, se procedió al diseño de un controlador robusto que fue evaluado en simulación para diferentes puntos de operación y bajo diversas condiciones climatológicas, obteniendo resultados satisfactorios. Como trabajos futuros se pretenden capturar igualmente la incertidumbre del término del modelo referente a la perturbación del sistema y realizar un control por adelanto robusto. Igualmente, se tiene planificado realizar ensayos reales en el reactor industrial.

Para el invernadero se ha propuesto una solución combinada de linealización por realimentación con QFT para compensar el efecto de las no linealidades del proceso y de las perturbaciones del mismo. En ambos casos se pretenden realizar más ensayos para validar correctamente los resultados obtenidos.

Por otro lado, se ha presentado también una solución preliminar robusta a un esquema de control con compensadores por adelanto combinados con controladores PID en el lazo de realimentación. Esta solución permite considerar incertidumbre en los modelos de la perturbación y trasladar dicha fuente de error al diseño del lazo de realimentación sin tener que resintonizar el controlador por adelanto.

Las líneas futuras se centrarán en diseño de estrategias de control robustas que permitan considerar de forma explícita la presencia de incertidumbre en los efectos provenientes de perturbaciones externas al proceso. Dichas ideas serán combinadas con esquemas de control por adelanto. Del mismo modo, se realizarán nuevos ensayos en el reactor industrial para implementar el diseño del controlador robusto, y teniendo en cuenta también las perturbaciones que hay en el sistema.

Mediante la realización de este TFM se han publicado tres artículos:

- *Control robusto con QFT del pH en un fotobiorreactor raceway*. en las XXXVIII Jornadas de Automática de [22].
- *Control robusto de procesos industriales no lineales con compensación de perturbaciones* en el XVI Simposio de Ingeniería de Control. [20]
- *Robust QFT-based PI controller for a feedforward control scheme* en 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID 2018 [21]. Con esta publicación se obtuvo el premio Young Author Award.

Referencias

- [1] E.J. Adam and J.L. Marchetti. Designing and tuning robust feedforward controllers. *Computers Chemical Engineering*, 28(9):1899 – 1911, 2004.
- [2] K. J. Aström and T. Hägglund. *Advanced PID Control*. ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC 27709, 2005.
- [3] Karl Johan Åström and Tore Hägglund. *Advanced PID Control*. ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2006.
- [4] A. Baille. Irrigation management strategy of greenhouse crops in Mediterranean countries. *Acta Horticulturae*, 361:105–122, 1994.
- [5] M. Berenguel, F. Rodríguez, and J. G. Acién. Model predictive control of ph in tubular photobioreactors. *Journal of Process Control*, 14:377–387, 2004.
- [6] G.P.A. Bot. *Greenhouse climate from physical processes to a dynamic model*. PhD thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 1983.
- [7] T. A. Costache, F. G. Acién, J. M. Morales, M. M. and Fernández-Sevilla, I. Stamatina, and E. Molina. Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97:7627–7637, 2013.
- [8] J. Elso, M. Gil-Martínez, and M. García-Sanz. Quantitative feedback-feedforward control for model matching and disturbance rejection. *IET Control Theory Applications*, 7(6):894–900, April 2013.
- [9] I. Fernández, F. G. Acién, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and J. L. Mendoza. Dynamic model of an industrial raceway reactor for microalgae production. *Algal Research*, 17:67–78, 2016.
- [10] I. Fernández, J. Peña, J. L. Guzmán, M. Berenguel, and F. G. Acién. Modelling and control issues of ph in tubular photobioreactors. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(6):186 – 191, 2010. 11th IFAC Symposium on Computer Applications in Biotechnology.

- [11] J.L. Guzmán and T. Hägglund. Simple tuning rules for feedforward compensators. *Journal of Process Control*, 21:92–102, 2011.
- [12] J.L. Guzmán, T. Hägglund, M. Veronesi, and A. Visioli. Performance indices for feedforward control. *Journal of Process Control*, 26:26 – 34, 2015.
- [13] M. Hast and T. Hägglund. Low-order feedforward controllers: Optimal performance and practical considerations. *Journal of Process Control*, 24(9):1462 – 1471, 2014.
- [14] Michael A. Henson and Dale E. Seborg, editors. *Nonlinear Process Control*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1997.
- [15] E.J. van Henten and J. Bontsema. A time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Control Engineering Practice*, 17:88–96, 2009.
- [16] I. Horowitz. *Quantitative Feedback Design Theory (QFT)*. QFT Publications, Boulder, Colorado, 1993.
- [17] I. M. Horowitz. *Quantitative Feedback Design Theory (QFT)*. QFT Publications, Boulder, Colorado, 1993.
- [18] I.M. Horowitz. *Synthesis of feedback systems*. Academic Press, 1963.
- [19] I.M. Horowitz. Quantitative feedback design theory (qft). *International Journal of Robust and Non-linear Control*, 11(10):887–921, 2001.
- [20] A. Hoyo, J. L. Guzmán, and J.C. Moreno. Control robusto de procesos industriales no lineales con compensación de perturbaciones. Almería, España, 2017. XVI Simposio de Ingeniería de Control.
- [21] A. Hoyo, J. L. Guzmán, J.C. Moreno, and T. Hägglund. Robust QFT-based pi controller for a feedforward control scheme. volume 51, pages 262–267, Gent, Belgium, 2018. 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control PID 2018.
- [22] A. Hoyo, J. L. Guzmán, J.C. Moreno, and Berenguel M. Control robusto con QFT del ph en un fotobiorreactor raceway. Gijón, España, 2017. XXXVIII Jornadas de Automática.
- [23] J. L. Mendoza, I. Granados, M.R. and deGodos, F. G. Ación, E. Molina, C. J. Banks, and S. Heaven. Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy*, 54:267–275, 2013.

- [24] J. C. Moreno, A. Baños, and M. Berenguel. Improvements on the computation of boundaries in QFT. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 16(12):575–597, 2006.
- [25] A. Eli Nisenfeld and R. K. Miyasaki. Applications of feedforward control to distillation columns. *Automatica*, 9(3):319 – 327, 1973.
- [26] W. J. Oswald and C. G. Golueke. Biological transformation of solar energy. *Advances in Applied Microbiology*, 2:223–262, 1960.
- [27] N. Paluri. Interval QFT: A mathematical and computational enhancement of QFT. 12:385 – 402, 04 2002.
- [28] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acién, and S. Dormido. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture. *Bioresource Technology*, 170:1 – 9, 2014.
- [29] A. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Acién, and S. Dormido. Selective ph and dissolved oxygen control strategy for a raceway reactor within an event-based approach. *Control Engineering Practice*, 44:209 – 218, 2015.
- [30] CA. Pawlowski, J. L. Mendoza, J. L. Guzmán, M Berenguel, F.G. Acién, and S Dormido. Effective utilization of flue gases in raceway reactor with event-based ph control for microalgae culture. *Bioresource Technology*, 170:1–9, 2014.
- [31] R. Rabbinge, W.A.H. Rossing, and W. van der Werf. Systems approaches in epidemiology and plant disease management. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 99(3):161–171, 1993.
- [32] L. Roca. *Contribuciones al modelado y control de una planta de desalación solar*. PhD thesis, Universidad de Almería, 2009.
- [33] C. Rodríguez, J.L. Guzmán, M. Berenguel, and T. Hägglund. Generalized feedforward tuning rules for non-realizable delay inversion. *Journal of Process Control*, 23(9):1241 – 1250, 2013.
- [34] C. Rodríguez, J.L. Guzmán, M. Berenguel, and T. Hägglund. Optimal feedforward compensators for systems with right-half plane zeros. *Journal of Process Control*, 24(4):368 – 374, 2014.
- [35] C. Rodríguez, J. E. Normey-Rico, J. L. Guzmán, and M. Berenguel. Robust design methodology for simultaneous feedforward and feedback tuning. *IET Control Theory Applications*, 10(1):84–94, 2016.

- [36] C. Rodríguez, J. L. Guzmán, F. Rodríguez, and Berenguel M. Control predictivo de la temperatura interior de un invernadero con ventilación haciendo uso de transformación de restricciones. Valladolid, España, 2009. XXX Jornadas de Automática.
- [37] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and A. Ramírez. *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*. Springer, 978-3-319-11133-9, 2015.
- [38] Francisco Rodríguez Rubio and Manuel López. *Control Adaptativo y Robusto*. Universidad de Sevilla, 1996.
- [39] E. Sierra, F. Acién, J. Fernández, J. García, C. González, and E. Molina. Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 138:136–147, 2008.
- [40] R. Vilanova, O. Arrieta, and P. Ponsa. Imc based feedforward controller framework for disturbance attenuation on uncertain systems. *ISA Transactions*, 48(4):439 – 448, 2009.
- [41] J.C. Weissman and R.P. Goebel. Design and analysis of pond system for the purpose of producing fuels. Institute, Golden CO, SERI/STR., 1987. 231st ed. Solar Energy Research.
- [42] C. K. Weng and A. Ray. Robust wide-range control of steam-electric power plants. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(1):74–88, Jan 1997.
- [43] O. Yaniv. *Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems*. Kluwer Academic Publishers, 1999.



Resumen

Desde un punto de vista de control procesos, los problemas de control más comunes en la industria son relativos al problema de regulación o rechazo a perturbaciones y al diseño de estrategias de control robustas que permitan tener en cuenta las posibles fuentes de error del sistema.

Como es bien conocido, la inmensa mayoría de los procesos industriales presentan dinámicas no lineales que vienen dadas por un comportamiento no lineal intrínseco del sistema o por el empleo de actuadores con no linealidades tales como histéresis o zona muerta, lo que resulta en modelos no lineales del sistema de alta complejidad. Generalmente, a la hora de diseñar estrategias de control, dichos modelos son linealizados alrededor del punto de operación obteniendo modelos lineales simplificados de bajo orden que faciliten la etapa de sintonía de los controladores. Dichas aproximaciones lineales (bien sea a través de un proceso de linealización matemático o mediante ensayos en lazo abierto en torno al punto de trabajo) suelen generar errores de modelado especialmente cuando el sistema se aleja del punto de operación. Es por ello que se requiere el uso de estrategias de control robustas para tener en cuenta dichas incertidumbres en la etapa de diseño del esquema de control. Otra solución típica en la industria para acometer las no linealidades de los procesos es el uso de las técnicas de linealización por realimentación, que mediante un cambio de variable permiten de forma relativamente sencilla aproximar el comportamiento del sistema a una dinámica lineal. Sin embargo, esta estrategia requiere de modelos no lineales del proceso muy precisos que hacen que esta idea matemática no pueda llevarse a la práctica de forma exacta y las cancelaciones que se suponen en la teoría no sean efectivas debido a las discrepancias del modelo con el proceso real y al origen exógeno de las perturbaciones. Debido a este motivo, es habitual capturar estos errores como incertidumbre en los parámetros sobre el modelo lineal que se obtiene de la combinación de la linealización por realimentación con el proceso, haciendo uso posteriormente de estrategias de control robusto para considerar las mismas.

Por otro lado, las perturbaciones de carga son señales de baja frecuencia que afectan al proceso y alejan al sistema del punto de operación deseado. La reducción eficiente del efecto de las perturbaciones de carga es un tema clave en el control de procesos. Las perturbaciones pueden ser compensadas por el controlador de realimentación, pero la principal consecuencia de esta estrategia es que dicho controlador tiene que ser sintonizado para rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia al mismo tiempo. El control por adelantado proporciona una solución para tratar con el rechazo a perturbaciones de forma independiente aportando acciones de control en el mismo momento que el que la perturbación afecta a la salida del proceso. El compensador por adelantado ideal se forma como las dinámicas negativas entre la salida del proceso y la perturbación divididas por las dinámicas entre la salida del proceso y la señal de control. Este compensador ideal puede no ser realizable debido a un retardo negativo, polos en el semiplano derecho, o comportamientos de fase no-mínima. Sin embargo, incluso en el caso ideal de inversión, es posible que el rechazo de perturbaciones no sea efectivo debido a la presencia de incertidumbre en el proceso. Este hecho ha sido muy poco estudiado en la literatura donde el diseño de los controladores por adelantado son fundamentalmente nominales. Es por ello que resulta interesante abordar el análisis robusto del problema y el diseño de soluciones de control robustas para el mismo.

De esta forma, en este TFM se pretende hacer uso de las ideas de modelado y control no lineal y robusto comentadas anteriormente para resolver los problemas de control asociados a un fotobiorreactor industrial y a un invernadero. Además, se propone una nueva idea de diseño robusto para el esquema clásico de control por adelantado.