

## **7 Conclusiones**

### **7.1 Sobre el desarrollo práctico**

#### **7.1.1 Modelado**

Si bien con la metodología del diseño QFT, para garantizar la estabilidad es condición necesaria y suficiente que los sucesivos lazos de control sean estables (Chait y Yaniv, 1991). En este caso existe una dificultad añadida, y es que el modelo utilizado para el desarrollo, es una aproximación al modelo original de partida. Esto significa que si bien, se puede garantizar la estabilidad del sistema mediante QFT para el modelo de aplicación (en este caso el modelo simplificado de bajo orden), no se puede asegurar que sea igualmente estable para el modelo original. De esta misma forma, cuando se aplica la técnica QFT usando un modelo matemático o extraído de una planta, al aplicarlo sobre la planta real, esta puede no funcionar como es debido o volverse inestable. De ahí la importancia en la elección del modelado, no obstante, la dificultad añadida en este caso va más allá; el modelo simplificado adoptado para el caso multivariable es consecuencia del alto orden obtenible si se emplea el modelo original en el cálculo de las plantas del sistema monofásico equivalente, y de la repercusión muy negativa que esto tendría tanto en la fiabilidad “real” del sistema, como en el elevado orden alcanzable por el lazo y la parte del controlador diagonal o no diagonal. Por otro lado, la dificultad en la elección de un modelado satisfactorio del subconjunto de plantas  $P_{22}$  como consecuencia del importante retardo y que en cualquier caso sería poco práctico para la síntesis de controlador, como ya se puso de manifiesto en el capítulo 4.

#### **7.1.2 Pasos seguidos**

A la hora de elegir como y cuales van a ser las especificaciones, hay que tener especial cuidado, ya que en muchos casos puede resultar muy difícil o imposible obtener un lazo de control que cumpla con cada una de ellas y sea estable, debido a la intersección de contornos obtenida en la síntesis del controlador. Para ello, por ejemplo, cuando no se conoce con exactitud el tipo de perturbación real que puede aparecer, esta debe ser elegida de forma que en la intersección de contornos mediante el diagrama de Nichols no excluya al resto de especificaciones, es decir que el peso de una pueda quedar equilibrado con las otras, de forma que el diseño no se realice con la consideración casi exclusiva de una de ellas. Así mismo, hay que conocer su relevancia, ya que escoger más de tres o cuatro especificaciones en el diseño, puede hacer muy difícil o imposible obtener una solución, sobre todo si son muy restrictivas.

Además, en la mayoría de casos como el presente, las especificaciones normalmente se definen sobre un rango limitado de frecuencias, la razón es que en la transmisión de señales del sistema real en bucle abierto, estas pueden ser despreciables a partir de ciertas frecuencias (a frecuencias altas, la magnitud de la función de transferencia del sistema es muy pequeña, es decir, con valores muy negativos en dB sobre el diagrama de Nichols), e igualmente despreciable en el dominio del tiempo (de consideración solo en torno a  $t = 0$  segundos).

De especial importancia también, es la especificación de seguimiento de referencia. Si el objetivo básico del controlador  $G$  es reducir la incertidumbre y alcanzar los objetivos de estabilidad y rechazo de perturbaciones, el del prefiltro  $F$  será el cumplimiento de la especificación de seguimiento de referencia. Hecho esto, se debe observar la validez del resto de especificaciones mediante la respuesta en frecuencia del sistema completo en bucle cerrado. Esto implica que, en algunos casos, pueda realizarse la síntesis del controlador sin tener en cuenta los contornos de la misma e incluirla posteriormente en el diseño del prefiltro, con el fin de no dificultar demasiado el diseño del lazo. No obstante, en el presente estudio, el hecho de incluir los contornos de seguimiento de referencia en el cálculo de las intersecciones, ha servido para que mediante el loop-shaping, se pueda ajustar la ganancia del sistema sin tenerla que modificar necesariamente mediante el prefiltro, para cualquiera de las dos salidas.

Con todo, la discusión sobre como y cuales van a ser las especificaciones, llevará al proceso recursivo definido por el diagrama 2.E.

En el cálculo de la planta equivalente  $\hat{p}_{22}^e$ , se ha optado por emplear la ecuación simplificada donde se elimina la suma de la parte no diagonal del compensador, lo cual era una de las posibilidades que se tenía según se ha visto en el capítulo 2.

$$[\hat{p}_{22}^e] = [\hat{p}_{22}] - \frac{|\hat{p}_{21}| \cdot |\hat{p}_{12}|}{[\hat{p}_{11}] + g_{11}}$$

Hay varias razones de peso. Por un lado, el primer término de la ecuación es mucho mayor que el segundo y por otro lado, considerando la hipótesis H1, el aporte, en el segundo término de la ecuación, de la suma de la parte no diagonal de  $G$  es muy reducido, por contra, la suma de estas funciones de transferencia va a dar como resultado un lazo control de grado muy alto.

## 7.2 Sobre los resultados obtenidos

### 7.2.1 Objetivos

Mediante el análisis realizado en el capítulo 6, ha quedado de manifiesto las limitaciones existentes en la metodología QFT aplicada a sistemas multivariados, en este caso al incluir en la salida de humedad un sistema para eliminar el retardo, como es el predictor de Smith, que actúa sobre la señal realimentada y que, inevitablemente, no solo lo hace sobre la señal de salida de la humedad responsable del retardo (parte diagonal  $P_{22}$ ), sino también sobre la parte causante del acoplamiento (parte no diagonal  $P_{12}$ ). El efecto conjunto, impide que el desarrollo matemático que implica el equivalente monofásico y la ecuación óptima del compensador no diagonal tenga una validez plena y, como consecuencia, la no reducción del acoplamiento para estas plantas y la penalización en cuanto a las zonas de trabajo controlables, o lo que es lo mismo, la pérdida de robustez del controlador.

En cuanto al rechazo de perturbaciones, mediante la validación en el dominio frecuencial del controlador (figuras 5.25, 5.26 y 5.30, 5.31), se observa el amplio margen existente entre el límite impuesto y la curva del sistema para el caso más desfavorable, por lo que está garantizado su cumplimiento, aún considerando que estos resultados no son fielmente representativos en la salida de humedad. También se puede comprobar con los resultados de la simulación en el dominio temporal realizada en el apartado 6.4

Igualmente, según se ha visto en el capítulo 6, las limitaciones en el control son evidentes con otros tipos de controladores debido a las dificultades inherentes del secadero.

En resumen, se podría decir que hay una serie de objetivos que se han logrado. Se nombran a continuación:

- Estabilidad del sistema completo para un amplio margen que incluye las zonas de trabajo P3, P4 y nominal.
- La respuesta del sistema a cambios en la temperatura de los gases cumple con todas las especificaciones para esta misma salida.
- El desacoplo de la respuesta de la temperatura de los gases de salida.
- Las señales de control quedan dentro de los márgenes especificados.
- El rechazo de perturbaciones tanto para temperatura de gases como para la humedad en el producto.

Los objetivos que no se han logrado son los siguientes:

- Las zonas de trabajo P1 y P2, quedan fuera del control, la primera por resultar inestable y la segunda por la respuesta oscilatoria y valores fuera de límite en la señal de control.
- No se ha podido evitar el acoplamiento en la respuesta de la humedad del producto de salida.

- Como consecuencia de lo anterior, para cambios en la referencia de la temperatura de gases, la humedad de producto adquiere valores fuera de los márgenes establecidos.
- No se logra el cumplimiento de la especificación de referencia, en el transitorio, para la humedad.
- La lenta respuesta para la humedad ante cambios en la referencia de la misma.

### **7.3 Generalidades sobre QFT**

Es un hecho contrastado que la metodología QFT, aplicada a una variedad cada vez mayor de sistemas reales, como pueden ser sistemas monovariantes o multivariantes, sistemas no lineales, discretos, de parámetros distribuidos, etc., pueden ofrecer unos buenos resultados. No solo porque, a diferencia de otro tipo de controladores, se tienen en cuenta una serie de especificaciones y su garantizado cumplimiento en un rango determinado de frecuencias, sino también, por su robustez al reducir los efectos de la incertidumbre en planta, por minimizar el “coste” de la realimentación (ancho de banda) y ser capaz de reducir en buen grado el acoplamiento para sistemas MIMO.

Sin embargo, como se ha explicado en reiteradas ocasiones, existen importantes limitaciones en cuanto al uso de QFT en sistemas MIMO. Mediante las técnicas y desarrollos matemáticos aplicados, por sí solo, o con ayuda de otros procedimientos, no es capaz de compensar con eficacia sistemas con importantes retardos. Además, existe una limitación aún mayor en cuanto al tipo de modelos que tienen validez, y viene dada en la obtención del lazo de control de la planta equivalente monofásica, como consecuencia del cálculo de la inversa de la matriz, pudiendo dar lugar, de forma difícilmente predecible dado el conjunto de plantas involucradas, a la existencia de ceros en el semiplano real positivo, que reduce los márgenes de estabilidad, restringe su ancho de banda y provoca, por tanto, lazos de control inestables.