6 Análisis de resultados

6.1 Introducción

En los siguientes apartados, se muestran los resultados obtenidos mediante simulación, del diseño aplicado en el capitulo 5.

Primero, se analiza la forma de las curvas de salida ante una entrada escalón para las diferentes condiciones de aplicación. Posteriormente se pasa a un estudio más real y detallado de la respuesta del sistema completo así como de las señales de control ante diferentes entradas y a una simulación del comportamiento del conjunto ante ciertas perturbaciones, pasando por último por comparar los resultados a otros controladores utilizados para el secadero.

Todas las simulaciones se han realizado mediante la herramienta Simulink de MATLAB y como conjunto de plantas, las del modelo de partida (modelo original).

6.2 Respuesta del sistema completo a entrada en escalón

Inicialmente, el sistema completo, formado por la matriz de plantas *P*, compensador *G*, prefiltro *F* y predictor de Smith (P_q y θ_q), se pondrá a prueba para una entrada en escalón unitario, con el fin de poder analizar la estabilidad, para los distintos puntos que conforman la zona de trabajo y que se representaron mediante las figuras 3.3 y 3.4. Igualmente se mostrará el sistema de plantas original realimentado para que pueda ser comparado.

6.2.1 zona de trabajo nominal

En las figuras 6.1a y 6.1b, puede observarse como, en la respuesta para la temperatura de salida, el sistema completo es capaz de cumplir con la especificación de referencia dada. En el transitorio, se elimina cierta sobreoscilación como consecuencia del acoplamiento y se mantiene la misma rapidez en la respuesta. Para el permanente, se alcanza con exactitud el valor unitario ayudado por la mínima ganancia que se introdujo con el prefiltro.



Fig. 6.1a – Respuesta a escalón para la temperatura de salida en las condiciones nominales.



Fig. 6.1b – Detalle del régimen transitorio en la respuesta.

En el caso de la humedad en el producto de salida (Fig. 6.2), como ya se había pronosticado, los resultados no son tan favorables. No obstante se ha conseguido el objetivo inicial y es que el sistema sea estable y se alcancen los valores de referencia en el permanente.

El periodo transitorio sufre oscilaciones mayores de las que hubiesen sido deseadas, reducidas eso sí, mediante el ajuste realizado en el predictor de Smith, pero que en cualquier caso, quedan fuera del margen de acotación en la especificación de seguimiento de referencia reflejado en la Fig. 6.3.

El otro inconveniente, es la capacidad más reducida que se ha tenido, como consecuencia del uso del PS para reducir el acoplamiento y así queda de manifiesto, no solo en las oscilaciones comentadas sino también en los primeros instantes, en los cuales, la curva toma valores negativos como consecuencia del aporte de la parte no diagonal del conjunto *P*.



Fig. 6.2 – Respuesta a escalón para la humedad del producto de salida del sistema completo.



Fig. 6.3 – Márgenes de seguimiento de referencia y sistema con el PS ajustado y sin ajustar.

6.2.2 Zona de trabajo uno (P1)

Para las condiciones definidas en el punto 1, el sistema completo adquiere una oscilación cada vez mayor que provoca la definitiva inestabilidad del mismo. Esto se debe a que el retardo de H₀ para esta zona de trabajo (al igual que para el P2), es bastante menor que para el resto de condiciones, unido al hecho de que la amplitud de la respuesta de H₀ para esta zona está muy por encima del resto de puntos y, como el PS se ha diseñado aproximando el modelo nominal, cuanto mayor sea el alejamiento a este modelo, peor será la respuesta.

Esto mismo se puede explicar comentando que, para que esta zona sea estable, el PS debe diseñarse con un retardo θ_q en torno a los 800 segundos o una ganancia para $P_q(s)$ mucho mayor. Cualquiera de estas modificaciones tendría el inconveniente de generar una respuesta muy oscilatoria o inestable en las salidas para la zona nominal (la de mayor retardo) y las zonas P3 y P4.

6.2.3 Zona de trabajo dos (P2)

En este caso, a pesar de tener la planta P_{22} con menor retardo (en torno a los 600 segundos), el sistema se mantiene estable, gracias a que la amplitud de la respuesta en el permanente es más próxima a la nominal que la zona P1. Eso sí, con el inconveniente de tener una sobreoscilación importante en el transitorio y una ligera oscilación casi periódica en ambas salidas (figuras 6.4 y 6.5), por lo que se podría concluir que, en esta zona de trabajo, se acota el límite en la amplitud de respuesta de la incertidumbre, para la cual el sistema sigue siendo estable.



Fig. 6.4 – Respuesta a escalón para la temperatura de salida del sistema completo en el punto P2.



Fig. 6.5 – Respuesta a escalón para la humedad del sistema completo en el punto P2.

6.2.4 Zona de trabajo tres (P3)

A la vista de los resultados (figuras 6.6 y 6.7) se podría decir que el punto P3 queda mejor ajustado con el PS ya que en la humedad del producto de salida se evitan las oscilaciones, se reduce ligeramente la amplitud en la zona de inflexión negativa comparado al punto nominal y además es algo más rápido que este en alcanzar el régimen permanente. No obstante se tiene que, para los gases de salida T_0 , si bien la respuesta queda holgadamente dentro de la especificación de seguimiento de referencia, no se llega con exactitud al valor unitario (el sistema sin compensar es el de menor amplitud para T_0).



Fig. 6.6 – Respuesta a escalón para la temperatura de salida del sistema completo en el punto P3.



Fig. 6.7 – Respuesta a escalón para la humedad del sistema completo en el punto P3.

6.2.5 Zona de trabajo cuatro (P4)

Las respuestas obtenidas (figuras 6.8 y 6.9) son semejantes a la zona de trabajo anterior, debido a que la amplitud de respuesta de ambas tanto para la submatriz de funciones de transferencia de P_{11} como para P_{22} son parecidas compartiendo además, junto con la zona nominal, tiempos de retardo semejantes. En el permanente, para H_0 se puede observar que la curva queda muy ligeramente por encima de la referencia unitaria.



Fig. 6.8 – Respuesta a escalón para la temperatura de salida del sistema completo en el punto P4.



Fig. 6.9 – Respuesta a escalón para la humedad del sistema completo en el punto P4.

6.3 Sistema completo ante condiciones reales de operación

A continuación, se analizan los resultados aplicando cambios en las referencias para valores en torno a la zona de trabajo nominal. Primero en la humedad del producto de salida H_0 que pasará de 1,08 % a 0,9 %, y posteriormente para un cambio de la temperatura de los gases de salida T_0 que pasa de los 37,5 a los 39° C. Con estas referencias se estudiaran las respuestas de cada una de las zonas de trabajo, a excepción del punto P1 que como ya se ha visto, queda fuera del estudio por ser inestable.

Además, se analizan los valores de las señales de control teniendo en cuenta sus valores mínimos y máximos.

F _{comb} :	$u_{1min} = 0,7 \text{ kg/h},$	u _{1max} = 5,4 kg/h
F _{prod} :	u _{2min} = 1,0 kg/min	u _{2max} = 5,0 kg/min

Los cambios de referencia descendente y ascendente se realizarán de manera ligeramente progresiva durante un tiempo de 1.500 segundos.

6.3.1 Zona de trabajo nominal

En la Fig. 6.12 se muestran los resultados de la simulación para esta zona de trabajo. Como se puede ver, la temperatura de salida se adapta bien a la referencia evitando casi en su totalidad el acoplamiento ya que cuando la referencia de la humedad cambia de valor, habría que ampliar bastante la zona (con tiempos en torno a 14.000 segundos) para poder observar leves oscilaciones en la T_0 .

Para la humedad no ocurre lo mismo, si bien es algo más lenta en adaptarse al cambio de referencia, no presenta una buena respuesta cuando se producen cambios en la temperatura de gases, provocado lógicamente por no haber podido evitar el acoplamiento para esta salida, como ya quedó de manifiesto, llegándose a un valor mínimo de 0,5 % de humedad, lo cual queda fuera de consideración. Esto solo se evitaría tomando unos criterios, de poca utilidad práctica, como sería estrechar el margen en el cambio de temperaturas o aplicar dichos cambios durante un tiempo lentamente progresivo.

En cuanto a las señales de control, los cambios producidos en los valores de F_{comb} y F_{prod} , quedan dentro de la zona nominal. También se puede ver, que basta una pequeña modificación en los flujos tanto de combustible como de caudal para motivar los cambios de salidas.

6.3.2 Zona de trabajo dos (P2)

Ya se ha comentado que esta zona se sitúa en el límite de estabilidad del sistema y así queda de manifiesto viendo los resultados de la Fig. 6.13.

Si bien, la amplitudes en las oscilaciones casi periódicas en las salidas tienen unos valores muy bajos (en torno a 0,03 °C para la T_0 y de 0,04 % para H_0), la humedad no sigue la referencia y adquiere en cualquier caso unos valores inferiores a los límites especificados.

Además, en cuanto a la señal de control de la cantidad de producto F_{comb} , se puede decir que al compensador "le cuesta" mantener la estabilidad ya que aquí, las oscilaciones si son importantes e imposibles de llevar a la práctica, no solo por su reducida longitud de onda y su amplitud sino porque escapa de los límites superiores especificados.

Con todo ello, esta zona de trabajo, aún siendo estable, queda fuera de consideración en cuanto al cumplimiento de algunos de los objetivos propuestos.

6.3.3 Zona de trabajo tres (P3)

Si se observan los resultados en cuanto a las salidas para estas condiciones (Fig. 6.14), las referencias de ambas salidas quedan ligeramente desplazadas del seguimiento aunque dentro de las especificación considerada en cualquier caso ($\Delta T_0 = 0.09$ ° C y $\Delta H_0 = 0.12$ %). Además, como ya se ha visto mediante la respuesta en escalón para este punto, la salida de humedad es algo más atenuada que en las condiciones nominales, unido al hecho del ligero desplazamiento superior a la referencia, hace que toda la curva "caiga" dentro de las condiciones definidas, es decir, la convexidad en la curva de H_0 provocada por el aumento de la temperatura es, en su punto de inflexión, menor que en el caso nominal y queda en el límite del margen definido (en torno al 0,72 %).

En cuanto a las señales de control, ambas quedan dentro de los márgenes definidos, con valores de F_{prod} y F_{comb} ligeramente mayores al punto nominal, todo lo cuál es concordante si se comprueba en la Fig. 3.3.

6.3.4 Zona de trabajo cuatro (P4)

Los resultados para esta zona de trabajo (Fig. 6.15), se asemejan bastante al anterior como ya se pudo comprobar con la respuesta a escalón, si bien la respuesta de humedad queda ligeramente por encima de lo especificado en el permanente de la referencia, favoreciendo igualmente que el punto de más bajo valor quede dentro de los márgenes establecido así como el resto de la curva.

Los valores de la señal de control de F_{prod} están próximos al punto nominal y con F_{comb} semejante al punto P3 (Fig. 3.3).



Fig. 6.10 – Salidas y señales de control para la zona nominal







Fig. 6.12 – Salidas y señales de control en la zona P3.





6.4 Rechazo de perturbaciones

Para verificar el comportamiento del sistema con el modelo simplificado a diferentes perturbaciones se pudieron ver, en el capitulo anterior, los resultados representados en el dominio del a frecuencia. Para el modelo original y con el efecto de predictor de Smith a la salida realimentada, se van a simular una serie de perturbaciones, en el dominio del tiempo, a las entradas y salidas de la planta, con el objeto de comprobar la forma de actuar del controlador.

6.4.1 Perturbaciones para la salida de la planta de T_0

Basándose en la aplicación de la perturbación a la salida de las plantas d_0 localizada según el Diag. 6.A, se procede a analizar los resultados obtenidos y mostrados en la Fig. 6.14. Al producirse en la salida, los efectos se notan claramente sobre la salida de temperatura y al mismo tiempo sobre la humedad debido al acoplamiento, con valores mínimos fuera de margen. Este aumento de temperatura que llega hasta los 47,5 ° C es corregida disminuyendo rápidamente la cantidad de combustible, con un valor mínimo de 1 *Kg/h*, a su vez esto provoca una disminución momentánea en la humedad con registros fuera de especificación, igualmente, en este caso el controlador actúa inyectando gran cantidad de producto hasta quedar por encima de los valores permitidos (6,6 Kg/min > u_{2max}). De esta forma, se evidencia nuevamente los efectos del acoplamiento.

6.4.2 Perturbaciones para la salida de la planta de H₀

Este caso (Diag. 6.B y Fig. 6.15), puede corresponder por ejemplo a un aumento excesivo en las condiciones de humedad a la salida, durante un tiempo de 100 segundos en el cual, la humedad puede llegar al *1,24 %*. La forma de corregirlo del compensador será lógicamente disminuir la cantidad de producto (hasta un valor mínimo de *1,2 Kg/min*). La perturbación es eliminada prácticamente en el tiempo que dura.

Nótese el efecto casi nulo sobre la temperatura de salida y el flujo de combustible.

6.4.3 Perturbaciones para la entrada de la planta de T₀

En este caso, aplicando la perturbación d_i a la entrada, según muestra el Diag. 6.C, la perturbación es reducida y no provoca importantes cambios (Fig. 6.16), quedando ambas salidas y señales de control dentro de los márgenes especificados.

6.4.4 Perturbaciones para la entrada de la planta de H₀

Puede corresponder a un aumento de impurezas en el cilindro por el que circula el producto (Diag. 6.D), para hacerlo más real, a este hecho se le supone una duración de 1.500 segundos (25 minutos),

Se puede ver en la Fig. 6.17, que la respuesta del sistema es bastante más lenta en este caso, ya que tarda posteriormente aproximadamente unos 25.000 segundos en estabilizarse plenamente. Con valores del flujo de producto que se ajustan demasiado al rango establecido.

También se comprueba definitivamente la insensibilidad de la temperatura a los cambios en las condiciones para la humedad.



Diag. 6.A - Detalle de parte del esquema donde se aplica la perturbación d_{θ} .



Fig. 6.14 – Resultados de perturbaciones aplicadas la salida en T_{θ} para: (a) Salida de T_{θ} , (b) Señal de control F_{comb} , (c) Salida de H_0 y (d) Señal de control F_{prod} .



Diag. 6.B - Detalle de parte del esquema donde se aplica la perturbación d_{θ} .



(c) (d) Fig. 6.15 – Resultados de perturbaciones aplicadas la salida en H_0 para: (a) Salida de T_0 , (b) Señal de control F_{comb} , (c) Salida de H_0 y (d) Señal de control F_{prod} .



Diag. 6.C - Detalle de parte del esquema donde se aplica la perturbación d_i .



Fig. 6.16 – Resultados de perturbaciones aplicadas la entrada en T_0 para: (a) Salida de T_0 , (b) Señal de control F_{comb} , (c) Salida de H_0 y (d) Señal de control F_{prod} .



Diag. 6.D - Detalle de parte del esquema donde se aplica la perturbación d_i.



Fig. 6.17 – Resultados de perturbaciones aplicadas la entrada en H_{θ} para: (a) Salida de T_{θ} , (b) Señal de control F_{comb} , (c) Salida de H_{θ} y (d) Señal de control F_{prod} .

6.5 Comparación de resultados con otros tipos de controladores

A continuación se analizan los resultados de simulación entre distintos tipos de controladores aplicados al secadero, realizando una comparación entre el controlador QFT y otros como el LQG y el H ∞ . Para ello se presentan de forma gráfica cada uno de los resultados en óptimas condiciones de aplicabilidad así como los obtenidos mediante QFT, para las condiciones nominales. Se emplea en este caso los mismos valores en las referencias y tiempos.

En la Fig. 6.18 aparecen los resultados para la temperatura de salida de los gases T_0 . Se puede ver claramente la mejora sustancial en el seguimiento mediante el empleo del controlador QFT, observando además, el importante acoplamiento existente mediante el empleo del control LQG ante cambios en la referencia de la humedad (Fig. 6.19) con lectura máxima de hasta 42,5 °C y un tiempo de acercamiento más lento al régimen permanente, todo ello consecuencia de penalizar la señal de flujo de combustible en favor de mantener la señal de F_{prod} dentro de los límites establecidos. En cuanto al control H $_{\infty}$, este sigue una evolución libre que ha sido necesaria a fin de mejorar la respuesta en cuanto al seguimiento de la humedad.

Para la respuesta en cuanto a la humedad del producto de salida (Fig. 6.19), en el caso del control LQG se ha evitado en buen grado el acoplamiento existente con la temperatura, no registrándose de esta forma valores tan bajos como los obtenidos mediante QFT. Así mismo los tiempos de respuesta en ambos tipos de controladores son semejantes. Con el control H_{∞} , los tiempos de respuesta son mucho mayores, si bien son más homogéneos.

En la señal de control del flujo de combustible (Fig. 6.20), no hay muchos aspectos que comparar, tan solo resaltar que las señales son más homogéneas para QFT y H_{∞} que para LQG, en este último con variaciones de poca importancia, como consecuencia del acoplamiento.

En la señal de control de la cantidad de producto (Fig. 6.21), la salida en humedad es más sensible a cambios de F_{prod} en el control QFT que en LQG y H ∞ , aunque en estos dos últimos se evitan las ligeras oscilaciones producidas en la señal del control QFT.

Por último, comentar la robustez de cada tipo de controlador, Si bien el controlador H_{∞} garantiza la robustez y la estabilidad en todas las zonas de trabajo, el controlador LQG solo lo hace para la zona nominal y el controlador QFT es aplicable para la zona nominal y las zonas P3 y P4, con resultados algo pobres en la salida de humedad.



(c) Fig. 6.18 –Comparación entre las distintas salidas de T_{θ} para el controlador: (a) QFT, (b) LQG y (c) H ∞ .



(c) Fig. 6.19 –Comparación entre las distintas salidas de H_{θ} para el controlador: (a) QFT, (b) LQG y (c) H ∞ .



