

Control de Sistemas mediante QFT, aplicación a un secadero de arena

**Cecilio García Aguilar
Febrero, 2009**

Proyecto fin de carrera

Control de Sistemas mediante QFT, aplicación a un secadero de arena

Cecilio García Aguilar

Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla

Agradecimientos

Agradecer a mi tutor Luis Fernando Castaño la inestimable ayuda prestada en la realización del proyecto, además de su disposición y paciencia continua.

Como homenaje particular a los compañeros y amigos que me han ayudado en mis años de estudio y han contribuido a que estos sean más agradables: Victor Cuadrado, Leo Fernández, Sofía Presa, Manolo Bahamonde, Adnan y Reeda Chackour y la gente de la sala de estudio de medicina. A los de siempre, Raquel, Carlos Gustavo, Daniel, Julio, Gregorio, Isaac, José y Nuria.

A Virginia Cruz, Robert Olofsson y Vicente Lorenzo por ser tutores y referentes en mis comienzos profesionales.

Por último, expresar mi enorme gratitud a mi familia, en particular a mis padres Cecilio y Mercedes por la comprensión y el apoyo ante las dificultades a lo largo de mis años de estudio, mis hermanas María del Carmen, Rosa del Mar y mis sobrinos Pablo y Elvira.

Dedicado a la memoria de Francisco Aguilar Pérez y Rosa Moreno Rubiño.

Índice de Contenidos

INTRODUCCIÓN	1
General	1
Fundamentos de QFT	2
1 QFT aplicado a sistemas monovariable	3
1.1 Modelado paramétrico	3
1.1.1 Tiempo continuo	3
1.1.2 Tiempo discreto	4
1.2 Descripción del sistema	4
1.3 Especificaciones	6
1.4 Metodología en la resolución de problemas SISO mediante QFT	7
1.4.1 Planteamiento del problema y obtención de templates	7
1.4.2 Especificaciones y curvas de restricción (bounds)	8
1.4.3 Diseño del controlador (loop shaping)	9
1.4.4 Síntesis del prefiltro	10
1.4.5 Validación del sistema completo	10
1.5 Ejemplo de aplicación de la metodología SISO QFT	10
1.5.1 Modelado	10
1.5.2 Especificaciones	13
1.5.3 Síntesis del controlador (loop shaping)	15
1.5.4 Validación	18
1.5.5 Prefiltro	20
1.5.6 Respuesta del sistema completo ante entrada escalón	21

2 QFT aplicado a sistemas multivariables	26
2.1 Introducción	26
2.2 Metodología del diseño de controladores no diagonales	
MIMO-QFT	27
2.2.1 Fundamentos teóricos	27
2.2.2 Estudio de la matriz de acoplamiento	30
2.2.2 Estudio de los elementos no lineales del controlador ...	31
2.2.4 Metodología del diseño del controlador	31
2.2.5 Pasos a seguir en el diseño secuencial	32
3 Control MIMO-QFT aplicado a un secadero de arena	36
3.1 Introducción	36
3.1.1 Consideraciones sobre el secadero	37
3.2 Desarrollo práctico	38
3.2.1 Modelo de partida	38
3.2.2 Modelo paramétrico de la planta con incertidumbres ...	40
3.3 Diseño del controlador	44
3.3.1 Análisis del acoplamiento	44
3.3.2 Especificaciones para la temperatura del gas de salida T_0	45
3.3.3 Paso A-1: Síntesis del controlador para $\frac{1}{\hat{p}_{11}}$	46
3.3.4 Paso A-2: Controlador óptimo no diagonal de la primera columna (g_{21})	50
3.3.5 Especificaciones para la humedad del producto de salida H_0	51

3.3.6	Paso B-1: Síntesis del controlador para $\frac{1}{\hat{p}_{22}^e}$	52
3.3.7	Paso B-2: Controlador óptimo no diagonal de la segunda columna (g_{12})	55
3.3.8	Matriz completa del controlador	55
3.4	Prefiltro y validación	56
3.5	Análisis de resultados del sistema completo mediante el modelo aplicado	61
3.5.1	Simulación del sistema completo con el modelo simplificado	61
3.5.2	Simulación del sistema completo con el modelo de partida	63
4	Pruebas de modelado del retardo en H_0	65
4.1	Introducción	65
4.2	Modelado mediante aproximación de Padé	66
4.2.1	Fundamento teórico	66
4.2.2	Aplicación al modelado	66
4.4	Aplicación del retardo al lazo nominal	68
5	Diseño mediante el uso de un predictor de Smith	70
5.1	Introducción	70
5.2	Predictor de Smith	70
5.3	Modelado del secadero con empleo de un predictor de Smith ...	71
5.3.1	Modelo del predictor de Smith	71
5.3.2	Modelo paramétrico del secadero	73

5.3.3	Especificaciones	76
5.3.4	Paso A-1: Síntesis del controlador para $\frac{1}{\hat{p}_{11}}$	76
5.3.5	Paso A-2: Controlador óptimo no diagonal de la primera columna (g_{21})	79
5.3.6	Paso B-1: Síntesis del controlador para $\frac{1}{\hat{p}_{22}^e}$	79
5.3.7	Paso B-2: Controlador óptimo no diagonal de la segunda columna (g_{12})	82
5.3.8	Matriz completa del controlador	83
5.4	Prefiltro	84
5.4.1	Análisis y prefiltro para la temperatura de los gases de salida T_o	84
5.4.2	Análisis y prefiltro para la humedad en el producto de salida H_o	87
5.5	Ajustes en el predictor de Smith	90
6	Análisis de resultados	91
6.1	Introducción	91
6.2	Respuesta del sistema completo a entrada en escalón	91
6.2.1	Zona de trabajo nominal	91
6.2.2	Zona de trabajo uno (P1)	94
6.2.3	Zona de trabajo dos (P2)	94
6.2.4	Zona de trabajo tres (P3)	95
6.2.5	Zona de trabajo cuatro (P4)	96

6.3 Sistema completo ante condiciones reales de operación	97
6.3.1 Zona de trabajo nominal	98
6.3.2 Zona de trabajo dos (P2)	98
6.3.3 Zona de trabajo tres (P3)	99
6.3.4 Zona de trabajo cuatro (P4)	99
6.4 Rechazo de perturbaciones	104
6.4.1 Perturbaciones para la salida de la planta de T_0	104
6.4.2 Perturbaciones para la salida de la planta de H_0	104
6.4.3 Perturbaciones para la entrada de la planta de T_0	104
6.4.4 Perturbaciones para la entrada de la planta de H_0	105
6.5 Comparación de resultados con otros tipos de controladores	110
7 Conclusiones	115
7.1 Sobre el desarrollo práctico	115
7.1.1 Modelado	115
7.1.2 Pasos seguidos	115
7.2 Sobre los resultados obtenidos	117
7.2.1 Objetivos	117
7.2 Generalidades sobre QFT	118
ANEXO: Código de programación en MATLAB	119
Ejemplo monovariable	119
Modelado del secadero	122
Diseño del controlador g_{11}	123
Prefiltro f_{11} y validación	125

Obtención de g_{21}	126
Diseño del controlador g_{22}	137
Prefiltro f_{22} y validación	129
Obtención de g_{12}	131

REFERENCIAS 132

Bibliografía básica	132
Aplicaciones y artículos sobre QFT	132
Otros	134

Introducción

General

El presente proyecto se basa en la aplicación de los conocimientos de mayor aceptación desarrollados hasta el momento en el diseño de controladores mediante la teoría cuantitativa de realimentación QFT (del inglés *Quantitative Feedback Theory*), tanto para el caso de sistemas monovariantes como multivariantes.

Para ello, en primer lugar, se procede de forma teórica a la explicación detallada de cada uno de los pasos a seguir en el caso de sistemas de una variable, con una descripción genérica de los tipos de modelados y los posibles objetivos que se pueden plantear, todo ello con la correspondiente demostración práctica mediante un ejemplo.

Posteriormente, se profundiza en el estudio teórico de diseño mediante QFT aplicado a sistemas multivariantes, desarrollado por Horowitz y Sidi entre los años 1979 y 1991 y con una metodología más compleja que para el caso monovariante.

El propósito principal será, por último, la aplicación de los conocimientos teóricos desarrollados en la metodología QFT especialmente para sistemas multivariantes, en el control de un secadero de arena, planteando una serie de objetivos iniciales y observando mediante los resultados, cuales son las mejoras sustanciales que este método puede ofrecer frente a otro tipo de controladores así como los inconvenientes y las limitaciones que puedan existir.

Fundamentos de QFT

QFT es un método de ingeniería de control que propone de forma explícita el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas y tiene sus raíces en el control frecuencial propuesto por Bode y descansa en la observación de que la realimentación es únicamente necesaria cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o perturbaciones indebidas actuando en la misma.

Tanto la incertidumbre del modelo de la planta $P(j\omega)$ como sus especificaciones frecuenciales y temporales son trasladadas a un conjunto de curvas $B(j\omega_i)$ en el diagrama de Nichols, llamadas contornos o *Horowitz-Sidi Bounds*. Estos contornos sirven como guía para obtener la función de transferencia del lazo abierto nominal $L_0(j\omega) = G(j\omega) \cdot P_0(j\omega)$ mediante la introducción de ganancia, ceros y polos en el controlador $G(j\omega)$, así, el controlador óptimo será aquel que, teniendo mínima ganancia consiga que L_0 descansa sobre los contornos a cada frecuencia de interés.

En definitiva, el objetivo principal de la metodología QFT es la síntesis (loop shaping) de un controlador que ha de ser lo más simple posible, con mínimo ancho de banda y que satisfaga el conjunto de especificaciones definidas para cualquier planta dentro de la incertidumbre. Los pasos en este método son:

- Modelado de la planta con la incertidumbre.
- Definición de especificaciones.
- Creación de contornos (bounds) $B(j\omega)$.
- Síntesis del controlador $G(j\omega_i)$.
- Síntesis del prefiltro $F(j\omega_i)$.
- Validación del diseño.