

CONTROL ROBUSTO CUANTITATIVO QFT: HISTORIA DE UNA IDEA

Mario García-Sanz

*Departamento de Automática y Computación. Universidad Pública de Navarra.
31006 Pamplona, Spain. Email: mgsanz@unavarra.es*

Resumen: Después de casi 45 años de investigación teórica y de aplicación práctica en muy diversas áreas de la ingeniería, el control robusto cuantitativo QFT (*Quantitative Feedback Theory*) ha demostrado ser una excelente metodología de diseño de controladores. Ante el reciente fallecimiento de su fundador, el Prof. Isaac Horowitz, el presente artículo resume los hitos históricos más relevantes, las líneas de investigación abiertas, las aplicaciones exitosas realizadas y las principales referencias bibliográficas de la técnica QFT.
Copyright © 2005 CEA-IFAC

Palabras Clave: Quantitative Feedback Theory (QFT), Control Robusto Cuantitativo, Dominio de la Frecuencia.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 1945, tras más de siete años de investigación original y de trabajo recopilatorio en los laboratorios *Bell Telephone* (New York), Hendrik W. Bode publicó una obra que más iba a influir en el control automático del siglo XX: el libro titulado *Network Analysis and Feedback Amplifier Design* (Bode, 1945). En sus páginas se recogen los fundamentos de la realimentación (*feedback*), del análisis de sistemas y del diseño de compensadores en el dominio de la frecuencia.

Años después, un joven Isaac M. Horowitz (1959), por entonces científico senior de la compañía *Hughes Aircraft* (Culver City, California), añadiría el concepto de cuantitativo a las ideas principales de Bode, en un pequeño artículo titulado *Fundamental theory of automatic linear feedback control systems*, presentando la necesidad de cuantificar el diseño del controlador de acuerdo con las especificaciones deseadas y la incertidumbre de la planta. Es el inicio del control cuantitativo en el dominio de la frecuencia. Su tesis principal es la constatación de que la función de sensibilidad $S = (1+L)^{-1}$ definida

por Bode es insensible al ruido y al ancho de banda, conceptos que Horowitz engloba en su acuñada frase *the cost of feedback*. Por ello, y ya desde éste primer artículo, se elige la función de transferencia en lazo abierto $L=PG$ como la herramienta de diseño de controladores. Con esa decisión (en el fondo en total acuerdo con los trabajos de Bode!) el problema a encarar será la incertidumbre de la planta, y el objetivo a alcanzar el diseño cuantitativo.

Cuatro años después, Horowitz (1963) ampliaría esas ideas en su libro *Synthesis of Feedback Systems*, interpretando los conceptos originales de Bode y aportando novedosas propuestas como el control de dos grados de libertad entre otros (Figura 1).

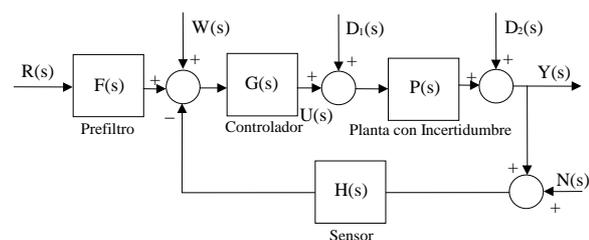


Fig. 1. Sistema de control de dos grados de libertad

Sin embargo habrá que esperar a la década de los 70 para encontrar un nombre propio al diseño robusto cuantitativo de controladores en el dominio de la frecuencia. Será precisamente en 1972, coincidiendo con la introducción del diagrama de Nichols como herramienta de trabajo, cuando Horowitz y su entonces doctorando Marcel Sidi utilizaran el nombre de QFT (*Quantitative Feedback Theory*) por primera vez (Horowitz y Sidi, 1972; Horowitz, 1973). En esta época Horowitz ostentaba ya una cátedra en el *Weizmann Institute of Science* (Israel) y otra en la *Universidad de Colorado* (Boulder, Colorado), donde ha seguido como profesor emérito hasta su reciente fallecimiento el 3 de julio de 2005, a los 85 años de edad.

En 1973 la oficina de investigación científica de las fuerzas aéreas norteamericanas, con base en *Wright-Patterson* (Dayton, Ohio), concedió a Horowitz una primera beca de investigación para desarrollar las incipientes ideas del QFT. A partir de ese momento, y durante más de 20 años, se mantuvo una estrecha y fructífera colaboración, dirigida y alentada en todo momento por Constantine H. Houpis, investigador y responsable del área de control automático en *Wright-Patterson*. Es en esta época cuando se fijarían definitivamente los fundamentos iniciales de la metodología QFT: síntesis de controladores, sistemas no-lineales, sistemas multivariables, QFT digital, sistemas con parámetros distribuidos, sistemas de fase no-mínima, sistemas multilazo, aplicaciones aeronáuticas, etc (véanse referencias por temas).

Desde entonces y hasta la actualidad la teoría QFT ha sido ampliada extraordinariamente, aplicándose con éxito al control de sistemas lineales y no-lineales, plantas monovariadas (SISO) y multivariables (MIMO), procesos de fase mínima y no-mínima, sistemas con retardo, sistemas con parámetros distribuidos y concentrados, etc. Un estudio más detallado sobre la historia del QFT puede encontrarse en los artículos de Horowitz (1992, 1999, 2002), Houpis (2002) y García-Sanz (2001).

En 1992, Houpis y Chandler celebraron en *Wright-Patterson* (Dayton, Ohio, USA) el primer congreso internacional de QFT. Desde entonces, y bajo el impulso constante de C.H. Houpis, el congreso se ha celebrado bienalmente: Indiana, USA (Nwokah y Chandler, 1995); Glasgow, UK (Petropoulakis y Leithead, 1997); Durban, Sudáfrica (Boje y Eitelberg, 1999); Pamplona, España (García-Sanz, 2001a); y Ciudad del Cabo, Sudáfrica (Boje y Eitelberg, 2003). El próximo congreso tendrá lugar en Kansas, USA (2005).

En los siguientes apartados se introducen los fundamentos de QFT y se comentan algunas de las aportaciones más relevantes en las diversas líneas de investigación de la técnica.

2. FUNDAMENTOS DE QFT

El presente apartado expone las principales características del método QFT. Para complementar lo aquí expuesto pueden consultarse los tres excelentes trabajos recopilatorios escritos por Horowitz (1982a, 1991) y Houpis (1996). Una mayor profundización en los temas puede encontrarse en los cuatro libros de QFT hasta ahora publicados: Horowitz (1993), Yaniv (1999a), Sidi (2002), y Houpis, Rasmussen y García-Sanz (2005). Finalmente tres números especiales de la *International Journal of Robust and Nonlinear Control* (Wiley) exponen algunos de los avances más relevantes del estado de la técnica QFT en su momento correspondiente: Houpis (1997), Eitelberg (2001-2002) y García-Sanz (2003b).

QFT es un método de ingeniería de control que propone explícitamente el uso de la realimentación para reducir simultáneamente los efectos de la incertidumbre de la planta y satisfacer las especificaciones de comportamiento deseadas. El método hunde sus raíces en el control clásico frecuencial propuesto por Bode. Descansa en la observación de que la realimentación es únicamente necesaria cuando existe incertidumbre en el modelo de la planta o cuando hay perturbaciones no medidas actuando sobre 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 $B(j\omega)$ en el diagrama de Nichols, llamadas contornos o *Horowitz-Sidi Bounds*. Dichos contornos sirven como guía para obtener la función de transferencia de lazo abierto nominal: $L_o(j\omega) = G(j\omega) P_o(j\omega)$, mediante la introducción de ganancias, ceros y polos en el controlador $G(j\omega)$.

En definitiva, el principal objetivo de QFT es la síntesis (*loop-shaping*) de un controlador lo más simple posible, con mínimo ancho de banda, que satisfaga el conjunto de especificaciones deseadas para cualquier planta dentro de la incertidumbre. El método de diseño es muy transparente, permitiendo al diseñador sopesar cuantitativamente diferentes compromisos de complejidad y robustez para cumplir las especificaciones deseadas a cada frecuencia. Los principales pasos del método son:

- Modelado de la planta con su incertidumbre, generación de plantillas y planta nominal $P_o(j\omega)$.
- Definición de especificaciones.
- Creación de contornos $B(j\omega)$.
- Síntesis del controlador $G(j\omega)$.
- Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$.
- Validación del diseño.

En los siguientes apartados se detallan los pasos del método (véase también Figura 2).

2.1. Modelo de la planta, generación de plantillas y planta nominal.

QFT permite la descripción del modelo dinámico de la planta a controlar desde muy diversas perspectivas: mediante datos de respuesta frecuencial (dB, Φ , ω), mediante funciones de transferencia lineales, variantes (LTV) o invariantes (LTI) en el tiempo, y mediante ecuaciones no-lineales (NL), todas ellas con incertidumbre paramétrica y/o no paramétrica.

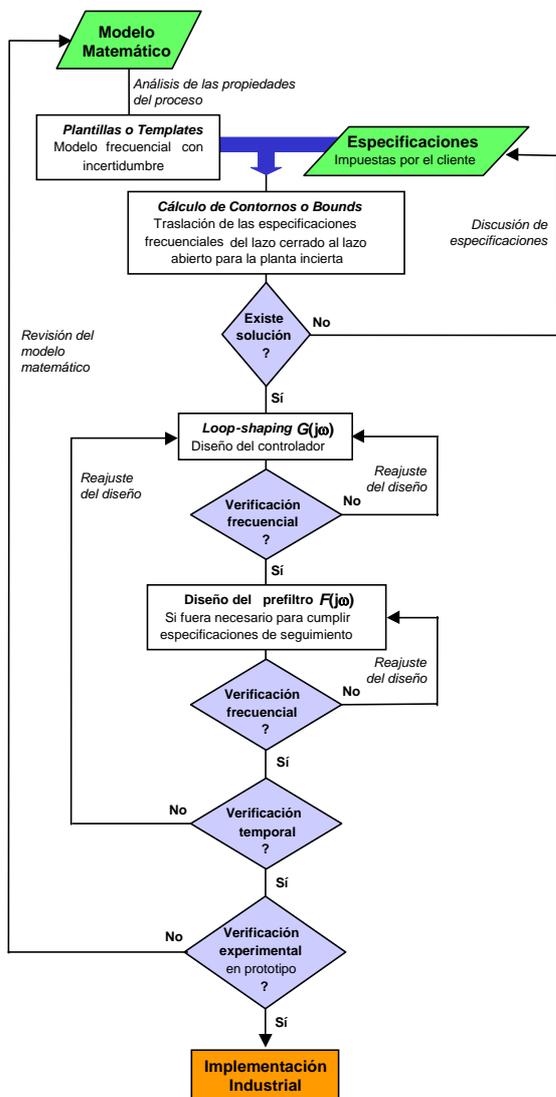


Fig. 2. Principales pasos del método QFT.

Los modelos son trasladados al dominio de la frecuencia, generándose en el diagrama de Nichols, a cada frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$, un conjunto de puntos (números complejos -dB, Φ -), uno para cada planta dentro del espacio de incertidumbre.

Dicho conjunto de puntos a cada frecuencia se denominan plantillas $\mathcal{P}(j\omega_i)$ (templates). Describen la dinámica de la planta a cada frecuencia ω_i , y son más o menos extensos según la incertidumbre asociada a la planta $\mathcal{P}(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$. En otras palabras, las plantillas son la proyección del

espacio de parámetros n -dimensional en el diagrama de Nichols a cada frecuencia de interés. En la Figura 3 se puede ver la plantilla a $\omega = 1$ rad/s de la planta:

$$P(s) = \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \exp(-\tau s)$$

donde $\zeta = 0.02$, $\omega_n \in [0.7, 1.2]$, $\tau \in [0, 2]$.

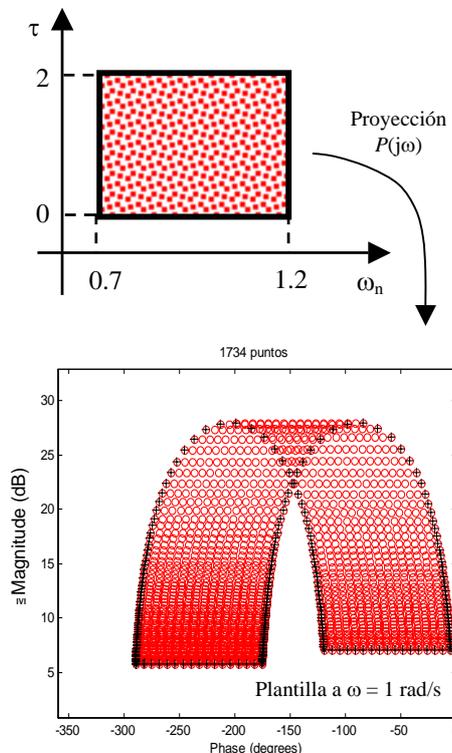


Fig. 3. Plantilla ($\omega = 1$ rad/s). Proyección del contorno (+) y puntos interiores (o) del espacio de parámetros.

Del conjunto de posibles plantas de la familia de plantas se seleccionará un conjunto de parámetros, el mismo para todas las frecuencias, que determinará la planta nominal $P_o(j\omega)$.

Entre los distintos trabajos de cálculo de plantillas publicados hasta el momento destacan los algoritmos propuestos por Bartlett (1993), Bartlett *et al.* (1993) y Gutman *et al.* (1994). Ballance y Hughes (1996) presentan una recopilación de las diferentes técnicas de generación de plantillas. El mismo Ballance y Chen (1998), y García-Sanz y Vital (1999) proponen métodos simbólicos de cálculo, y Nataraj y Sardar (2000a) utilizan análisis intervalar.

2.2. Definición de especificaciones

El sistema de control de dos grados de libertad definido en la Figura 1 incluye el conjunto de plantas con incertidumbre $\mathcal{P}(j\omega_i) = \{P(j\omega_i), \omega_i \in \Omega\}$, el controlador $G(j\omega)$ y prefiltro $F(j\omega)$ a diseñar, y la dinámica del sensor $H(j\omega)$. Las entradas al sistema son: la referencia $R(j\omega)$, las perturbaciones $W(j\omega)$, $D_1(j\omega)$ y $D_2(j\omega)$, y el ruido $N(j\omega)$. La variable a controlar es $Y(j\omega)$, el error es $E(j\omega)$ y la señal de

control $U(j\omega)$. De la Figura 1 se pueden extraer las ecuaciones (1) a (3).

La definición de las especificaciones de estabilidad y comportamiento robustos (rechazo de perturbaciones, tracking, inmunidad al ruido, atenuación de frecuencias de resonancia, etc) puede realizarse en términos de limitación de las magnitudes de las funciones de transferencia de las ecuaciones (1) a (3) a las frecuencias deseadas –Ec. (4) a (9) en Tabla I–.

$$Y = \frac{1}{1+PGH} D_2 + \frac{P}{1+PGH} D_1 + \frac{PG}{1+PGH} (W + FR) - \frac{PGH}{1+PGH} N \quad (1)$$

$$U = \frac{G}{1+PGH} (W + FR) - \frac{GH}{1+PGH} (N + D_2 + PD_1) \quad (2)$$

$$E = -\frac{H}{1+PGH} D_2 + \frac{PH}{1+PGH} D_1 + \frac{PGH}{1+PGH} W + \frac{1}{1+PGH} FR - \frac{H}{1+PGH} N \quad (3)$$

Tabla I. Especificaciones (sin perder generalidad, $H=1$)

$$|T_1(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)F(j\omega)} \right| = \left| \frac{U(j\omega)}{D_1(j\omega)} \right| = \left| \frac{Y(j\omega)}{N(j\omega)} \right| = \left| \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_1(\omega), \quad \omega \in \Omega_1 \quad (4)$$

$$|T_2(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{D_2(j\omega)} \right| = \left| \frac{1}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_2(\omega), \quad \omega \in \Omega_2 \quad (5)$$

$$|T_3(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{D_1(j\omega)} \right| = \left| \frac{P(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_3(\omega), \quad \omega \in \Omega_3 \quad (6)$$

$$|T_4(j\omega)| = \left| \frac{U(j\omega)}{D_2(j\omega)} \right| = \left| \frac{U(j\omega)}{N(j\omega)} \right| = \left| \frac{U(j\omega)}{R(j\omega)F(j\omega)} \right| = \left| \frac{G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_4(\omega), \quad \omega \in \Omega_4 \quad (7)$$

$$\delta_{5\text{inf}}(\omega) < |T_5(j\omega)| = \left| \frac{Y(j\omega)}{R(j\omega)} \right| = \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)G(j\omega)}{1+P(j\omega)G(j\omega)} \right| \leq \delta_{5\text{sup}}(\omega), \quad \omega \in \Omega_5 \quad (8)$$

$$\frac{|G(j\omega)P_d(j\omega)|}{|G(j\omega)P_e(j\omega)|} \frac{|1+G(j\omega)P_e(j\omega)|}{|1+G(j\omega)P_d(j\omega)|} \leq \delta_5(\omega) = \frac{\delta_{5\text{sup}}(\omega)}{\delta_{5\text{inf}}(\omega)}, \quad \omega \in \Omega_5 \quad (9)$$

2.3. Creación de contornos $B(j\omega)$, (bounds).

Una vez escogida la planta nominal $P_o(j\omega)$, la metodología QFT convierte las especificaciones en lazo cerrado –Ec. (4) a (9)– y la incertidumbre de la planta $\tilde{P}(j\omega)$ en un conjunto de curvas de restricción o contornos $B(j\omega)$ (Horowitz-Sidi Bounds) para cada

frecuencia de interés $\omega_i \in \Omega$, dibujados sobre el diagrama de Nichols.

Esta gran síntesis de información (especificaciones más incertidumbre) en un conjunto de simples curvas (los contornos) permitirá posteriormente el diseño del controlador utilizando solamente una única planta: la planta nominal $P_o(j\omega)$.

Expresando las ecuaciones de la Tabla I en forma polar, donde a cada frecuencia de interés cada planta es $P(j\omega_i) = p \angle \theta$, y el controlador es $G(j\omega_i) = g \angle \phi$, con $\phi \in [-2\pi, 0]$, las especificaciones de la Tabla I $\{|T_k(j\omega_i)| \leq \delta_k(\omega_i), k = 1, \dots, 5\}$ son trasladadas respectivamente a las inecuaciones cuadráticas de la Tabla II –Ec. (10) a (14)–.

Tabla II. Inecuaciones cuadráticas en g

$$p^2 \left(1 - \frac{1}{\delta_1^2}\right) g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + 1 \geq 0 \quad (10)$$

$$p^2 g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + \left(1 - \frac{1}{\delta_2^2}\right) \geq 0 \quad (11)$$

$$p^2 g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + \left(1 - \frac{p^2}{\delta_3^2}\right) \geq 0 \quad (12)$$

$$\left(p^2 - \frac{1}{\delta_4^2}\right) g^2 + 2 p \cos(\phi + \theta) g + 1 \geq 0 \quad (13)$$

$$p_e^2 p_d^2 \left(1 - \frac{1}{\delta_5^2}\right) g^2 + 2 p_e p_d \left(p_e \cos(\phi + \theta_d) - \frac{p_d}{\delta_5^2} \cos(\phi + \theta_e) \right) g + \left(p_e^2 - \frac{p_d^2}{\delta_5^2} \right) \geq 0 \quad (14)$$

La forma general de dichas inecuaciones, donde p , θ , y δ_k son conocidas, ϕ varía entre -2π y 0 rad, y g es la incógnita, se muestra en la ecuación (15).

$$I_{\omega_i}^k(p, \theta, \delta_k, \phi) = a g^2 + b g + c \geq 0 \quad (15)$$

Chait y Yaniv (1993), y Rodrigues *et al.* (1997), desarrollaron un algoritmo para calcular los contornos a partir de las inecuaciones de la Tabla II, simplificando así el trabajo grafico manual que se hacía previamente.

Posteriormente, los contornos calculados y dibujados sobre el diagrama de Nichols, para cada especificación y cada frecuencia (Figura 4), son agrupados de modo que finalmente exista una sola curva para cada frecuencia (Figura 5): la más restrictiva.

Zhao y Jayasuriya (1994) proponen un método general de cálculo de contornos; Moreno *et al.* (1997)

lo extienden al caso multi-valorado; y Nataraj y Sardar (2000b) y Nataraj (2002) lo generan desde la óptica intervalar.

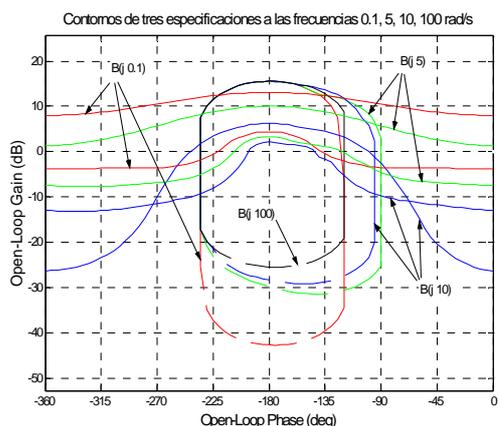


Fig. 4. Contornos de 3 especificaciones: estabilidad, Ec. (4), en círculos centrales; y rechazo de perturbaciones, Ec.(5,6), en líneas entre 0° y -360°.

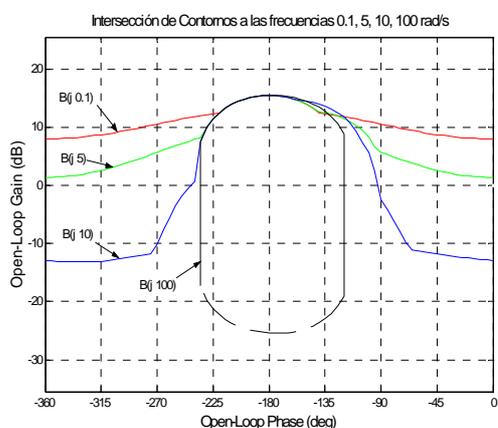


Fig. 5. Intersección de los contornos.

2.4. Síntesis del controlador $G(j\omega)$, (loop-shaping)

Una vez dibujados los contornos en el diagrama de Nichols, y superpuesta la función $L_o = P_o G$ ($G = 1$ inicialmente), el controlador $G(j\omega)$ se diseña añadiendo polos y ceros al mismo -Ecuación (16)- hasta que la función L_o se encuentre a cada frecuencia en las áreas superiores a las líneas continuas, e inferiores a las líneas discontinuas (véase Figura 6).

$$G(s) = k_G \frac{\prod_{i=1}^{n_{rz}} \left(\frac{s}{z_i} + 1 \right) \prod_{i=1}^{n_{cz}/2} \left(\frac{s^2}{|z_i|^2} + \frac{2\text{Re}(z_i)}{|z_i|^2} s + 1 \right) \dots}{s^r \prod_{j=1}^{m_{rp}} \left(\frac{s}{p_j} + 1 \right) \prod_{j=1}^{m_{cp}/2} \left(\frac{s^2}{|p_j|^2} + \frac{2\text{Re}(p_j)}{|p_j|^2} s + 1 \right) \dots} \quad (16)$$

El controlador óptimo será, según demostraron Gera y Horowitz (1980), aquel que teniendo mínima ganancia consiga que L_o descansa sobre los contornos a cada frecuencia de interés. En ese caso se podrá afirmar que el sistema de control cumple las especificaciones deseadas para todas las posibles plantas de la incertidumbre.

Las condiciones de existencia del controlador QFT han sido estudiadas rigurosamente por Horowitz (1979a), Nwokah *et al.* (1990), Jayasuriya y Zhao (1994), y Gil-Martínez y García-Sanz (2003). Por otro lado, diversos autores han propuesto técnicas varias de diseño o *loop-shaping*: véanse por ejemplo los métodos analíticos propuestos por Thompson y Nwokah (1994), o los algoritmos de *loop-shaping* automático propuestos por Chait *et al.* (1997) según métodos de programación lineal, y por García-Sanz y Guillén (2000) mediante algoritmos genéticos.

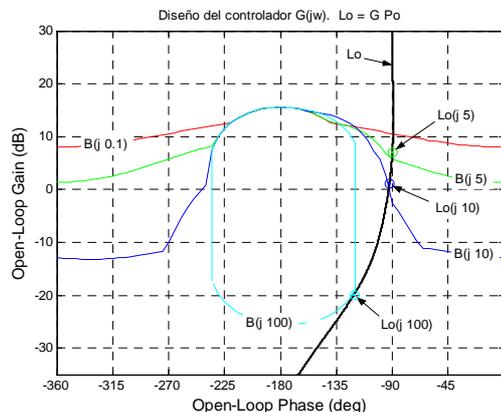


Fig. 6. Diseño del controlador $G(j\omega)$.

2.5. Síntesis del pre-filtro $F(j\omega)$

Si el sistema de control requiere especificaciones de seguimiento de referencia (tracking), entonces será necesario también el diseño de un pre-filtro $F(j\omega)$. Así, mientras que el objetivo básico de $G(j\omega)$ es reducir la incertidumbre y alcanzar objetivos de estabilidad y rechazo de perturbaciones, etc., el objetivo del pre-filtro es el cumplimiento de las especificaciones de tracking.

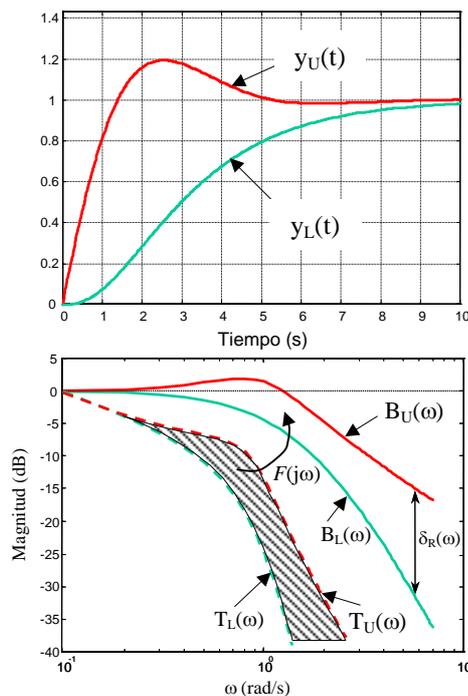


Fig. 7. Especificaciones de tracking.

Dada una especificación de tracking -Ec. (8), (9) y (14)- que exija a la salida del sistema $y(t)$ que su respuesta ante una entrada escalón $r(t)$ esté entre las señales $y_U(t)$ e $y_L(t)$, es decir, que su respuesta frecuencial -área comprendida entre $T_U(\omega)$ y $T_L(\omega)$ debido a la incertidumbre- esté entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$, el controlador $G(j\omega)$ reducirá el área entre $T_U(\omega)$ y $T_L(\omega)$ debido a la incertidumbre para que sea menor que $\delta_R(\omega)$, y el prefiltro moverá el área entre $T_U(\omega)$ y $T_L(\omega)$ para situarla entre $B_U(\omega)$ y $B_L(\omega)$. (Figura 7).

2.6. Validación del diseño

Una vez que se ha finalizado el diseño del controlador $-G(j\omega)$ y $F(j\omega)$ -, es necesario analizar su comportamiento frente a las especificaciones deseadas, tanto en el dominio de la frecuencia como sobre todo en el dominio del tiempo, y ante los casos más desfavorables de la incertidumbre de la planta. Nótese que, como todo método en el dominio de la frecuencia, QFT es riguroso en sentido estricto sólo ante las especificaciones frecuenciales. Las especificaciones temporales (por ejemplo las de tracking) han de ser previamente trasladadas al dominio de la frecuencia. Poco trabajo se ha realizado hasta el momento en la relación de ambos dominios, frecuencial y temporal. Sin embargo, en la práctica pocas veces aparece la paradoja de cumplirse las especificaciones frecuenciales asociadas y no las temporales. En esos casos se requerirá simplemente una redefinición de las especificaciones frecuenciales asociadas (Horowitz, 1991).

3. CONTROL QFT DE SISTEMAS COMPLEJOS

En el presente apartado se enuncian algunas de las principales líneas de investigación de QFT en el control de sistemas complejos de diversa naturaleza.

3.1. Sistemas de fase no-mínima

Es bien conocido el hecho de que las plantas de fase no-mínima (nmp) limitan los potenciales beneficios de la realimentación. En el caso SISO, un cero de la planta en el semiplano real positivo (RHP) impone a la función de transferencia del sistema de control un cero RHP en la misma posición. Esto conlleva una limitación física del sistema, que reduce sus márgenes de estabilidad, restringe su ancho de banda y produce una respuesta temporal inicialmente inversa (Horowitz y Liao, 1984).

En este contexto, Horowitz propuso una metodología cuantitativa QFT para diseñar el controlador óptimo, tanto en plantas de fase no-mínima con incertidumbre (Horowitz y Sidi, 1978), como en plantas de fase no-mínima inestables (Horowitz, 1979b, 1986). Debido al incumplimiento del teorema de Bode (1945) que relaciona la magnitud y la fase a cada frecuencia -Eq. (17)-, la metodología QFT requiere de un desplazamiento de los contornos en el diagrama de Nichols, según el incremento de fase que la planta de

fase no-mínima tiene respecto a la planta de fase mínima equivalente.

$$\arg[G(j\omega)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d \log_{10}|G(j\omega)|}{d \log_{10} \omega} \ln \coth \left(\frac{u}{2} \right) du$$

donde $u = \ln \frac{\omega}{\omega_1}$ (para sistemas de fase mínima)

(17)

En el caso MIMO, Horowitz *et al.* (1986) hicieron también un importante hallazgo: no todas las $n \times n$ funciones de transferencia deben sufrir necesariamente las limitaciones impuestas por la fase no-mínima. El sistema MIMO tiene la capacidad de reubicar los ceros RHP en las salidas menos importantes, manteniendo las salidas más críticas como de fase mínima.

El estudio del avión X-29 (Figura 8), MIMO, inestable y de características fuertemente de fase no-mínima, llevó a Horowitz a proponer un compensador G singular ($\det G = 0$), es decir, con al menos una salida dependiente de las demás (Walke *et al.*, 1984). Este nuevo método (*singular G-method*) permitió atenuar el problema de la fase no-mínima e inestabilidad en los sistemas multivariables, alcanzando buenas prestaciones (Horowitz, 1986).



Fig. 8. Avión X-29. Cortesía NASA-Dryden.

Últimamente Chen y Ballance (1998) han analizado en profundidad las propuestas de Horowitz para los sistemas de fase no-mínima, introduciendo interesantes ideas complementarias.

3.2. Sistemas discretos

Casi todos los sistemas de control son hoy en día implementados digitalmente. Sin embargo QFT fue inicialmente desarrollado en el dominio continuo. En 1986 Horowitz presentó un desarrollo paralelo de QFT en el dominio discreto (plano w), donde se sustituye la s de Laplace por $w \approx j(2/T) \tan(\omega_{sp} T/2)$, donde T es el periodo de muestreo y ω_{sp} la parte imaginaria de s . Debido al muestreo, todos los sistemas de control digital son de fase no-mínima, limitando sus posibilidades respecto al caso continuo. Sin embargo, mediante un correcto diseño, dichos efectos limitativos pueden ser minimizados. Horowitz y Liao (1986a), y Houppis y Lamont (1992)

presentan dos detallados trabajos donde aplican el diseño QFT discreto.

3.3. Sistemas no-lineales

Una característica especialmente importante del QFT es el modo natural como aborda el control de plantas no-lineales (NL) y de plantas variables en el tiempo (LTV). Ambas son reducidas de forma rigurosa a un conjunto de problemas lineales, invariantes en el tiempo (LTI) equivalentes.

Para ello Horowitz propuso dos técnicas distintas. En la primera (Horowitz, 1976, 1981a), el conjunto de plantas no-lineales y/o variables en el tiempo con incertidumbre es reemplazado por un conjunto de plantas LTI, equivalente con respecto al conjunto de salidas deseadas de la planta. Así, dado un conjunto de n vectores de salida $y_i = \{y\}$ y su conjunto de vectores de entrada asociados $u_i = \{u\}$, el problema se reduce a encontrar el conjunto $P_{ij} = \{P\}$ de matrices $n \times n$ LTI tal que $y_i = P_{ij} u_i$. El teorema de Shauder del punto fijo es utilizado para validar los resultados.

Esta primera técnica tiene un evidente problema de aplicación: para cada planta no-lineal P_{NL} original se han de generar un gran número de plantas lineales P_{ij} , incluso aunque P_{NL} no tenga incertidumbre. Esto conlleva un elevado coste computacional, sobre todo si las plantas no-lineales y/o variables en el tiempo tienen incertidumbre. Por ello Horowitz (1981b) propuso una mejora de la técnica mediante el llamado método de cancelación del comportamiento no-lineal de la planta nominal. En esta nueva propuesta se plantea una pre-multiplicación del sistema P_{NL} por la inversa V de la parte no-lineal de la planta nominal P_{NLO} , de modo que $y = P_{NLO} V u$, siendo P_{NLO} no-lineal y $P_{NLO} V$ lineal. Seguidamente se aplica la primera técnica (Horowitz, 1976, 1981a) anteriormente explicada.

En la segunda técnica Horowitz (1982c) propone la modelación de los componentes no-lineales y/o variables en el tiempo de la planta como perturbaciones equivalentes. Entonces el control se diseña para gobernar la parte lineal de la planta, con especificaciones de rechazo de las perturbaciones equivalentes (la parte no-lineal). Más adelante Horowitz (1983), y Horowitz y Liao (1986b), propusieron también un tratamiento especial para los sistemas con no linealidades tipo saturación, y Oldak *et al.* (1994) para no linealidades tipo backlash. Recientemente Baños y Barreiro (2000) y Baños *et al.* (2002) han estudiado el problema de la estabilidad en QFT para sistemas no-lineales.

3.4. Sistemas con grandes retardos

García-Sanz y Guillén (1999) desarrollaron uno de los pocos trabajos aparecidos hasta la fecha sobre control QFT para procesos con grandes retardos variables e incertidumbre. Para ello plantean una

estructura tipo predictor de Smith y la sintonizan mediante técnicas QFT. El método es aplicable ante la presencia de incertidumbre en el retardo y en el modelo de la planta simultáneamente.

3.5. Sistemas MIMO

El control de sistemas multivariables MIMO (*multiple-input-multiple-output*) con presencia de incertidumbre en el modelo de la planta es todavía uno de los más complejos problemas en gran número de aplicaciones de control. Dos de las principales características que definen un sistema MIMO, y lo distinguen de un sistema monovariable (SISO), son la direccionalidad y el acoplamiento.

La direccionalidad en la entrada y en la salida del sistema MIMO expresa la diferente capacidad de actuación y de medición que se puede tener según se ponderen los elementos del vector de entradas U y de salidas Y respectivamente –direcciones-.

Por otro lado el acoplamiento entre los lazos de control del sistema MIMO es el hecho característico de que varias salidas y_i del sistema pueden estar influidas por varias entradas u_i del mismo, y/o varias entradas u_i pueden influir en varias salidas y_i .

En las últimas décadas se han presentado un elevado número de trabajos sobre análisis y control de sistemas MIMO desde muy distintas perspectivas. En el ámbito del QFT, los primeros trabajos fueron propuestos por Horowitz en el periodo 1979 a 1982. Su propuesta principal fue trasladar el problema MIMO original, de dimensión $n \times n$ y con incertidumbre, a n sencillos problemas QFT monovariables MISO (*multiple-input-single-output*), con incertidumbre, perturbaciones y especificaciones derivadas del problema original. Su resolución se plantea según un método secuencial de diseño de los elementos de la matriz diagonal de control G (Horowitz, 1979a; Horowitz y Sidi, 1980; Horowitz y Loecher, 1981).

Tres años después de proponer el primer método, el mismo Horowitz (1982b) introdujo una importante mejora, considerando en los sucesivos pasos iterativos una planta equivalente que tenga en cuenta también los controladores diseñados en los pasos previos. Con ello se consigue una importante disminución del sobre-diseño producido por el primer método, demasiado conservador. Nwokah (1984), Yaniv y Horowitz (1986), y Nwokah (1988) perfeccionaron los dos métodos en varios trabajos posteriores. El libro de Houppis, Rasmussen y García-Sanz (2005) presenta una detallada compilación de ambos métodos.

Sin embargo, aunque los dos métodos originales de Horowitz para sistemas MIMO tienen en cuenta las características del acoplamiento entre los lazos de control, sólo proponen la utilización de un controlador matricial diagonal G para gobernar la

planta. Esto contrasta con el hecho de que un controlador de matriz completa, que incorpora también los elementos no-diagonales, da una mayor flexibilidad de diseño y mejores resultados.

En los últimos años han aparecido algunos nuevos métodos que incorporan controladores multivariables QFT no-diagonales. De nuevo la primera idea sobre el tema fue sugerida por Horowitz *et al.* (1981). Su propuesta fue la inclusión de una matriz completa \mathbf{J} que pre-multiplica a la planta del sistema, de modo que el diseño multivariable diagonal parta de una planta equivalente $\mathbf{P}_e = \mathbf{P}\mathbf{J}$.

Franchek y Nwokah (1995), y Franchek *et al.* (1997) presentaron una aproximación secuencial para diseñar controladores multivariables QFT de matriz completa, buscando el cumplimiento de las especificaciones deseadas e incluyendo también características de integridad del sistema. Yaniv (1995) introdujo paralelamente una aproximación que enfatiza el ancho de banda del pre-controlador no-diagonal. Boje (2002) utilizó la raíz Perron-Frobenius como medida de la interacción del sistema MIMO para diseñar el pre-compensador de matriz completa y reducir el nivel de acoplamiento antes de diseñar un controlador QFT diagonal.

García-Sanz y Egaña (2002), y García-Sanz *et al.* (2005a) extendieron el método secuencial mejorado de Horowitz (1982) para procesos MIMO con incertidumbre al diseño de controladores QFT no-diagonales. En este nuevo método se estudian simultáneamente el caso de seguimiento de referencia y los de rechazo de perturbaciones a la entrada y a la salida de la planta. Los controladores no-diagonales se diseñan minimizando un nuevo término llamado matriz de acoplamiento. Estudios complementarios de estabilidad de los métodos de diseño de controladores QFT para procesos MIMO fueron planteados por Bedout y Franchek (2002) en el caso secuencial, y por Kerr *et al.* (2005) en el caso no secuencial.

3.6. Sistemas con parámetros distribuidos

Al principio de la década de los ochenta Horowitz y Azor (1983, 1984) plantean los primeros trabajos de diseño de controladores QFT para sistemas con parámetros distribuidos. En ellos proponen una Transformada múltiple de Laplace con respecto al espacio y al tiempo $L(jx, j\omega)$, y un diseño QFT similar al concentrado. Posteriormente Horowitz *et al.* (1989) y Kelemen *et al.* (1989, 1990) estudian la aproximación de la realimentación puntual de sistemas distribuidos lineales con incertidumbre, volviendo a la Transformada simple de Laplace $L(j\omega)$. El mismo año Chait *et al.* (1989) presentan un nuevo criterio de estabilidad de Nyquist para sistemas distribuidos. Más adelante Hegde y Nataraj (1995) proponen un método basado en dos puntos de realimentación. Finalmente García-Sanz *et al.* (2005b) plantean un método de diseño de

controladores QFT para sistemas de parámetros distribuidos con incertidumbre y diferentes topologías de control.

3.7. Sistemas multilazo

El control de lazos en cascada requiere un tratamiento particular. Horowitz *et al.* (1985), y Horowitz y Yaniv (1985) proponen dos métodos para diseño de controladores QFT de sistemas multivariables MIMO, con lazos en cascada e incertidumbre. Posteriormente Eduard Eitelberg (1999) profundiza en el tratamiento y control de sistemas con reparto de cargas, donde varios controladores gobiernan una misma salida, en presencia de diversas perturbaciones.

3.8. Sistemas LTV

Los primeros trabajos sobre diseño de controladores QFT lineales, variables en el tiempo (LTV), para gobernar una planta no-lineal monovariable (SISO) con incertidumbre, fueron también planteados por Horowitz (1975). Recientemente, Yaniv y Boneh (1997) plantean un método en el que la planta es linealizada por tramos, hallándose un conjunto de plantas lineales, invariantes en el tiempo (LTI), una para cada tramo. A partir de dichos modelos diseñan un controlador QFT para cada tramo y conmutan según una estrategia de *Schedulling*. Dos años después, el mismo Yaniv (1999b) amplía su método para abordar también casos multivariables (MIMO).

3.9. Software

Existen varias herramientas software que ayudan en el diseño de controladores QFT. Entre ellas se pueden citar la *Toolbox* de QFT para Matlab desarrollada por Borghesani, Chait y Yaniv en 1994 y 2002; la *Toolbox* Qsyn para uso con Matlab escrita por Gutman (1996, 2001); el Software QFT de las Fuerzas Aéreas Norteamericanas, desarrollado por Sating (1992), y Houppis y Sating (1997), y posteriormente extendido al caso MIMO en el software incluido en el libro de Houppis, Rasmussen y García-Sanz (2001, 2005); las herramientas desarrolladas para Matlab por García-Sanz *et al.* (2001a); y el programa interactivo basado en SysQuake desarrollado por Diaz *et al.* (2004).

4. APLICACIONES

Las primeras aplicaciones reales de QFT fueron en el campo aeronáutico, y vinieron de las manos del propio Horowitz y de Houppis, Rasmussen, Pachter, Osmon, etc. en la base aérea de *Writte-Patterson* (Dayton, Ohio), entre 1982 y 1997. Entre otros trabajos se pueden encontrar controladores de vuelo donde se aplican técnicas de QFT MIMO (Horowitz *et al.*, 1982); sistemas de control para el avión X-29 (Figura 8), inestable y de fase no-mínima (Walke *et al.*, 1984); control de reabastecimiento automático de aviones vuelo (Trosen, 1993); diseño de

controladores para el avión Vista F-16 (Reynolds *et al.*, 1994); control de vehículos aéreos no-tripulados (UAV) (Rasmussen y Houppis, 1994); gobierno de aviones con alas flexibles (Osmon *et al.*, 1996), etc.

Ya fuera del campo aeronáutico, la primera aplicación referenciada del QFT al campo biológico es el control de una depuradora de aguas residuales urbanas por fangos activos llevado a cabo por García-Sanz y Ostolaza (2000) (Figura 9).

En robótica se pueden citar diversas aplicaciones, tanto en estructuras rígidas donde se aplica QFT MIMO (Bossert, 1989; Egaña *et al.*, 2001), como en estructuras flexibles donde se aplica QFT MIMO (Kerr, 2004) y QFT para sistemas de parámetros distribuidos (Kelemen y Bagchi, 1993).



Fig. 9. Depuradora de aguas residuales de Crispijana (Vitoria), de 5000 m³/h. Cortesía de AMVISA.

Asimismo QFT se ha aplicado con éxito al control y experimentación de motores (Franchek y Hamilton, 1997), de actuadores electro-hidráulicos (Pachter *et al.* 1997), de procesos de pasteurización (García-Sanz *et al.*, 2001b), de suspensiones activas de vehículos (Liberzon *et al.*, 2001), de cancelación de ruido en telefonía (Yaniv *et al.*, 2002), de hornos industriales multivariados (García-Sanz y Barreras, 2005), etc.



Fig. 10. Aerogenerador de 1650 kW de potencia gobernado con QFT (Parque de Unzué, Navarra). Cortesía de M.Torres.

En sistemas de potencia destacan los trabajos de Kelemen y Akhrif (2001) en el gobierno de redes eléctricas multi-máquina. Asimismo, la primera aplicación de QFT al control de una central aero-eléctrica de gran potencia fue estudiada por Gutman

et al. (2003), y los primeros aerogeneradores de gran potencia (1500 kW y 1650 kW) controlados mediante QFT fueron diseñados por García-Sanz y Torres (2004) y experimentados con éxito en varios parques eólicos (Figura 10).

En el campo aeroespacial destaca el excelente trabajo de Bentley (2001), del *Sandia National Lab.*, en el posicionamiento de telescopios montados sobre satélites, y las aplicaciones de García-Sanz y Hadaegh (2004) en la *NASA-JPL* al control coordinado de satélites en formación, tanto en espacio profundo como en baja órbita terrestre (Figura 11).



Fig. 11. Control de múltiple satélites en formación. Cortesía de NASA-JPL.

5. CONCLUSIONES

Desde las primeras ideas de Horowitz en 1959 hasta la actualidad, la teoría de realimentación cuantitativa QFT ha sido aplicada con éxito al control de muy diversos y complejos sistemas: lineales y no-lineales, estables e inestables, monovariados (SISO) y multivariados (MIMO), de fase mínima y no-mínima, con retardo, con parámetros concentrados y distribuidos, multi-lazo, etc.

En su planteamiento, el método QFT busca el controlador que asegure el cumplimiento de las especificaciones de comportamiento deseadas para el sistema, cualquiera que sea el modelo dentro de la incertidumbre de la planta. Durante el diseño se pone de manifiesto el compromiso (*cuantificación*) entre la sencillez de la estructura del controlador, la minimización del coste de la realimentación, y el cumplimiento de las especificaciones de comportamiento deseadas a cada frecuencia de trabajo, todo ello dentro de una gran transparencia.

Citando a Horowitz en uno de sus últimos artículos, “*ya está abierta la puerta a la creación de una verdadera teoría de realimentación cuantitativa ... Sin embargo falta todavía por acometer un enorme trabajo de investigación, tanto de naturaleza puramente matemática como de aplicación*”.

Aun siendo ciertos los muy buenos resultados alcanzados en casi 45 años de investigación y

desarrollo del QFT, también en frase de Horowitz, “*el QFT se encuentra todavía en su infancia*”, con grandes retos esperando a ser resueltos en las próximas décadas.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo personal continuo e inestimable recibido de los Prof. Isaac Horowitz y Constantine Houpis durante la última década, así como la ayuda de la *Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología* (CICYT) en el proyecto DPI2003-08580-C02-01.

REFERENCIAS

La presente sección de referencias bibliográficas se ordena por temas, y dentro de cada tema de modo cronológico.

Libros

Bode H.W., (1945), *Network Analysis and Feedback Amplifier Design*. Van Nostrand Company.

Horowitz I., (1963), *Synthesis of Feedback Systems*. New York, Academic Press.

Horowitz I., (1993), *Quantitative Feedback Design Theory (QFT)*. QFT Pub., 660 South Monaco Parkway, Denver, Colorado 80224-1229.

Yaniv O., (1999a), *Quantitative Feedback Design of Linear and Non-linear Control Systems*. Kluwer Academic Pub.

Sidi M., (2002), *Design of Robust Control Systems: From classical to modern practical approaches*. Krieger Publishing.

Houpis C.H., Rasmussen S.J., García-Sanz, M. (2005), *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications*. 2ª Edición. CRC Press, USA.

Números especiales

Houpis, C.H. (Guest Editor). Quantitative Feedback Theory Special Issue. *Int. J. Robust Nonlinear Control*. Vol. 7, No. 6, June 1997. Wiley.

Eitelberg, Eduard (Guest Editor). Isaac Horowitz Special Issue. *Int. J. Robust Nonlinear Control*. Parte 1, Vol. 11, N. 10, August 2001 y Parte 2, Vol. 12, No. 4, April 2002. Wiley.

García-Sanz, Mario (Guest Editor). Robust Frequency Domain Special Issue. *Int. J. Robust Nonlinear Control*. Vol. 13, No. 7, June 2003. Wiley.

Congresos Internacionales de QFT

Houpis C.H., y Chander P. (Editors). *1st Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*,

Wright Patterson Airforce Base, Dayton, Ohio, USA, August 1992.

Nwokah O.D.I., y Chander P. (Editors). *2nd Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, August 1995.

Petropoulakis L., y Leithead W.E.(Editors). *3rd Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, August 1997.

Boje E., y Eitelberg E. (Editors). *4th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, University of Natal, Durban, South Africa, August 1999.

García-Sanz M. (Editor). *5th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, Public University of Navarra, Pamplona, Spain, August 2001a.

Boje E., y Eitelberg E. (Editors). *6th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, University of Cape Town, Cape Town, South Africa, December 2003.

Tutorials

Horowitz, I., (1982a), Quantitative Feedback Theory. *IEE Control Theory and Applications*, Vol. 129, pp. 215-226.

Horowitz, I. (1991), Survey of Quantitative Feedback Theory. *International Journal of Control*, Vol. 53(2), pp. 255-291.

Houpis C.H. (1996), Quantitative Feedback Theory (QFT) Technique. en *The Control Handbook*. CRC Press, IEEE Press. (Editor W.S. Levine), Chapter 44. pp. 701-717.

Comentarios sobre la historia del QFT

Horowitz, I.M (1992). QFT – Past, present and future. Plenary address. *1st Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, Dayton, Ohio, USA, pp. 9-14.

Horowitz, I.M (1999). Frequency response in control. Plenary. *4th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, Durban, South Africa, pp. 233-239.

Horowitz, I.M (2002). It was not easy: a personal view. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 289-293.

Houpis, C.H. (2002). Horowitz: bridging the gap. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 293-302.

García-Sanz, M. (2001b). QFT international symposia: past, present and future. Editorial del *5th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, Pamplona, Spain.

Primeros artículos

Horowitz I.M, (1959), Fundamental theory of automatic linear feedback control systems. *I.R.E. Transactions on Automatic Control*, Vol. 4, December, pp. 5-19.

Horowitz I.M, Sidi M. (1972), Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time-domain tolerances. *Int. J. Control*, Vol. 16, No. 2, pp. 287-309.

Horowitz I.M, (1973), Optimum loop transfer function in single-loop minimum-phase feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 18, No. 1, pp. 97-113.

Artículos sobre Plantillas (templates)

Bartlett, A.C., Tesi, A., Vicino, A. (1993). Frequency response of uncertain systems with interval plants. *IEEE Trans. On Automatic Control*, Vol. 38, No. 6, pp. 929-933.

Bartlett, A.C. (1993). Computation of the frequency response of systems with uncertain parameters: a simplification. *Int. J. of Control*, Vol. 57, No. 6, 1293-1309.

Gutman, P.O., Baril, C. Neuman, L. (1994), An algorithm for computing value sets of uncertain transfer functions in factored real form. *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 39, No. 6.

Ballance, D.J., y Hughes, G. (1996), A survey of template generation methods for Quantitative Feedback Theory. *UKACC International conference on control '96*, pp. 172-174.

Ballance, D.J., y Chen, W. (1998), Symbolic computation in value sets of plants with uncertain parameters, *UKACC International conference on control '98*, pp. 1322-1327.

García-Sanz, M. y Vital P., (1999), Efficient Computation of the Frequency Representation of Uncertain Systems, *4th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, pp. 117-126, Durban, South Africa.

Nataraj, P.S.V., Sardar, G. (2000a). Template generation for continuous transfer functions using interval analysis. *Automatica*, Vol 36, pp. 111-119.

Artículos sobre Contornos (bounds)

Chait Y, y Yaniv O. (1993), Multi-input/single-output computer-aided control design using the Quantitative Feedback Theory. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, 1993, No.3, pp. 47-54.

Zhao, Y., Jayasuriya, S. (1994). On the generation of QFT bounds for general interval plants. *Trans. of the ASME*, Vol. 116, pp. 618-627.

Rodrigues, J.M., Chait, Y., Yaniv, O. (1997). An efficient algorithm for computing QFT bounds. *Trans. of the ASME*, Vol. 119, pp. 548-552.

Moreno, J.C., Baños, A. y Montoya, J.F. (1997). An algorithm for computing QFT multiple-valued performance bounds. *Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, pp. 29-34, Scotland.

Nataraj, P.S.V., Sardar, G. (2000b). Computation of QFT bounds for robust sensitivity and gain-phase margin specifications. *Trans. of the ASME*, Vol. 122, pp. 528-534.

Nataraj, P.S.V. (2002). Interval QFT: a mathematical and computational enhancement of QFT. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 385-402.

Artículos sobre Síntesis del controlador (Loop-shaping)

Gera, A., Horowitz I.M, (1980), Optimisation of the loop transfer function. *Int. J. Control*, Vol. 31, No. 2, pp. 389-398.

Thompson, D.F. y Nwokah, O.D.I. (1994). Analytic loop shaping methods in quantitative feedback theory. *ASME, Journal of dynamic systems, measurement and control*, Vol. 116, No. 2, pp. 169-177.

Chait Y., Chen Q., y Holot C.V. (1997), Automatic loop-shaping of QFT controllers via linear programming, *3rd Int. Symp. on QFT and other Robust Frequency Domain Methods*, Glasgow, UK, pp. 13-28.

García-Sanz, M. y Guillen J.C., (2000), Automatic loop-shaping of QFT robust controllers via genetic algorithms, *3rd IFAC Symposium on Robust Control Design*, Praha, Czech Republic.

Artículos sobre existencia de controladores

Nwokah, O.D.I., Thompson, D.F., y Pérez, R.A. (1990). On some existence conditions for QFT controllers, *DSC*, Vol. 24, pp.1-10.

Jayasuriya, S. and Y. Zhao, (1994), Stability of Quantitative Feedback Designs and the Existence of Robust QFT Controllers, *Int. J. Robust Nonlinear Control*. Vol. 4, No. 1, pp. 21-46.

Gil-Martinez, M. and García-Sanz M., (2003) Simultaneous Meeting of Robust Control Specifications in QFT, *Int. J. Robust Nonlinear Control*. Vol. 13, No. 7, pp. 643-656.

Artículos sobre Sistemas Multivariables (MIMO)

Horowitz I.M, (1979a), Quantitative synthesis of uncertain multiple input-output feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 30, No. 1, pp. 81-106.

- Horowitz I.M, y Sidi M., (1980), Practical Design of feedback systems with uncertain multivariable plants. *Int. J. Control*, Vol. 11, No. 7, pp. 851-875.
- Horowitz, I. M. y C. Loecher, (1981). Design 3x3 Multivariable Feedback System with Large Plant Uncertainty. *Int. J. Control*. Vol. 33, pp. 677-699.
- Horowitz, I., Neumann, L. y Yaniv, O., (1981). A synthesis technique for highly uncertain interacting multivariable flight control system (TYF16CCV). *Proc. Naecon Conf.* Dayton, Oh, pp. 1276-1283.
- Horowitz I. (1982b). Improved design technique for uncertain multiple input-output feedback systems. *Int. J. Control*. Vol. 36, pp. 977-988.
- Nwokah, O.D.I., (1984), Synthesis of Controllers for Uncertain Multivariable Plants for Described Time Domain Tolerances, *Int. J. of Control*, Vol. 40, pp. 1189-1206.
- Yaniv, O., y Horowitz, I.M. (1986). A Quantitative Design Method for MIMO Linear Feedback Systems Having Uncertain Plants, *Int. J. of Control*, Vol. 43, pp. 401-421.
- Nwokah, O.D.I., (1988), Strong Robustness in Uncertain Multivariable Systems, *IEEE Conf. on Decision and Control*, Austin, TX.
- Franchek, M.A. and Nwokah O.D.I., (1995), Robust multivariable control of distillation columns using non-diagonal controller matrix, *DSC-Vol. 57-1, IMECE, ASME Dynamics systems and control division*, pp. 257-264.
- Yaniv, O., (1995), MIMO QFT using non-diagonal controllers, *Int. J. of Control*, Vol.61, No. 1, pp. 245-253.
- Franchek, M.A, Herman, P. y Nwokah, O.D.I. (1997). Robust nondiagonal controller design for uncertain multivariable regulating systems, *ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 119, pp. 80-85.
- Boje, E. (2002). Non-diagonal controllers in MIMO quantitative feedback design. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 303-320.
- García-Sanz M. y Egaña I. (2002). Quantitative Non-diagonal Controller Design for Multivariable Systems with Uncertainty. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 321-333.
- De Bedout, J.M. and Franchek M.A., (2002), Stability conditions for the sequential design of non-diagonal multivariable feedback controllers, *Int. J. of Control*, Vol. 75, N. 12, pp. 910-922.
- García-Sanz M., Egaña I., Barreras M. (2005a). Design of quantitative feedback theory non-diagonal controllers for use in uncertain multiple-input multiple-output systems. *IEE Control Theory and Applications*. Vol. 152, N. 02, pp. 177-187.
- Kerr, M.L., Jayasuriya S. y Asokanthan S.F, (2005), On stability in non-sequential MIMO QFT designs, accepted for publication, *ASME J. Dynamic Systems, Measured and Control*.
- Artículos sobre Sistemas con grandes retardos
- García-Sanz, M. y Guillen, J.C. (1999) Smith Predictor For Uncertain Systems In The QFT Framework. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Ed. Springer Verlag. Vol 243. *Progress in System and Robot Analysis and Control Design*. Chapter 20, pp. 243-250.
- Artículos sobre QFT digital
- Horowitz, I.M. y Liao, Y. (1986a). Quantitative feedback design for sampled-data systems. *Int. J. Control*, Vol. 44, pp. 665-675.
- Houpis, C.H., y Lamont, B.G. (1992). Discrete quantitative feedback technique, Capítulo 16 en el libro: *Digital Control Systems: theory, hardware, software*, 2ª edición. McGraw Hill.
- Artículos sobre Sistemas con parámetros distribuidos
- Horowitz, I., Azor, R.. (1983). Quantitative synthesis of feedback systems with distributed uncertain plants. *Int. J. Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 381-400.
- Horowitz, I., Azor, R.. (1984). Uncertain partially non-casual distributed feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 40, No. 5, pp. 989-1002.
- Horowitz, I., Kannai, Y. and Kelemen, M. (1989). QFT approach to distributed systems Control and Applications. Proceedings *ICCON '89. IEEE Int. Conf.*, pp. 516-519.
- Kelemen M, Kanai Y. and Horowitz I.M. (1989). One-point Feedback Approach to Distributed Linear Systems. *Int. Journal of Control*, Vol. 49, No. 3, pp. 969-980
- Chait Y, Maccluer C.R. and Radcliffe C.J. (1989). A Nyquist Stability Criterion for Distributed Parameter Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 1, pp. 90-92.
- Kelemen M, Kanai Y. and Horowitz I.M. (1990). Improved method for designing linear distributed feedback systems. *Int. Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 4, pp. 249-257.
- Hegde, M.D., Nataraj, P.S.V. (1995). The two-point feedback approach to linear distributed systems. *Proc. Int. Conf. On Automatic Control*, Indore, India, December 1995.
- García-Sanz, M., Huarte, A. y Asenjo, A. (2005b) One-point feedback robust control for distributed

parameter systems. *16th IFAC World Congress, Praga.*

Artículos sobre Sistemas de fase no-mínima

Horowitz I.M, Sidi M., (1978), Optimum synthesis of non-minimum phase systems with plant uncertainty. *Int. J. Control*, Vol. 27, No. 3, pp. 361-386.

Horowitz I.M, (1979b), Design of feedback systems with non-minimum phase unstable plants. *Int. J. Systems Science*, Vo. 10, pp. 1025-1040.

Horowitz, I.M. y Liao, Y. (1984). Limitations on non-minimum phase feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 40, No. 5, pp. 1003-1015.

Horowitz, I.M., Oldak, S., y Yaniv, O. (1986). An important property of non-minimum phase multi-inputs multi-outputs feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 44, No. 3, pp. 677-688.

Horowitz, I.M. (1986). The singular-G method for unstable non-minimum phase plants. *Int. J. Control*, Vol. 44, No. 2, pp. 533-541.

Chen, W., Ballance, D. (1998). QFT design for uncertain non-minimum phase and unstable plants. *American Control Conference*, pp. 2486-2490. Philadelphia, Pennsylvania.

Artículos sobre Sistemas multilazo

Horowitz, I.M., Neumann, L. y Yaniv, O. (1985). Quantitative synthesis of uncertain cascade multi-input multi-output feedback systems. *Int. J. Control*, Vol. 42, No. 2, pp. 273-303.

Horowitz, I.M., y Yaniv, O. (1985). Quantitative cascade multi-input multi-output synthesis by an improved method. *Int. J. Control*, Vol. 42, No. 2, pp. 305-331.

Eitelberg, E. (1999). *Load Sharing Control*. NOYB Press. Durban, South Africa.

Artículos sobre Sistemas no-lineales

Horowitz I.M, (1976), Synthesis of feedback systems with non-linear time-varying uncertain plants to satisfy quantitative performance specifications. *IEEE Proc.*, Vol.64, pp.123-130.

Horowitz I.M, (1981a), Quantitative synthesis of uncertain non-linear feedback systems with non-minimum phase inputs. *Int. J. Systems Science*, Vol. 1, No. 12, pp. 55-76.

Horowitz,I.M, (1981b). Improvements in quantitative non-linear feedback design by cancellation. *Int. J. Control*, Vol. 34, No. 3, pp. 547-560.

Horowitz, I.M., (1982c). Feedback systems with non-linear uncertain plants. *Int. J. Control*, Vol. 36, pp. 155-171.

Horowitz, I.M., (1983). A synthesis theory for a class of saturating systems. *Int. J. Control*, Vol. 38, No. 1, pp. 169-187.

Horowitz, I.M., y Liao, Y., (1986b). Quantitative non-linear compensation design for saturating unstable uncertain plants. *Int. J. Control*, Vol. 44, pp. 1137-1146.

Oldak S., Baril C. y Gutman P.O., (1994). Quantitative design of a class of nonlinear systems with parameter uncertainty. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 4, pp. 101-117.

Baños, A. y Barreiro, A. (2000). Stability of nonlinear QFT designs based on robust absolute stability criteria. *Int. Journal of Control*, Vol. 73, No. 1, pp. 74-88.

Baños, A., Barreiro, A., Gordillo, F. y Aracil, J. (2002). A QFT framework for nonlinear robust stability. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 357-372.

Artículos sobre Sistemas LTV

Horowitz, I.M. (1975). A synthesis theory for linear time-varying feedback systems with plant uncertainty. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-20, pp. 454-463.

Yaniv, O., Boneh, R. (1997). Robust LTV feedback synthesis for SISO nonlinear plants. *Int. J. Robust Nonl. Control*, Vol. 7, pp. 11-28.

Yaniv, O. (1999b). Robust LTV feedback synthesis for nonlinear MIMO plants. *Trans. of the ASME* Vol. 121, pp. 226-232.

Software

Sating, R.R., (1992). *Development of an Analog MIMO Quantitative Feedback Theory (QFT) CAD Package*, MS Thesis, AFIT/GE/ENG/92J-04, Air Force Institute of Technology, Wright Patterson AFB, OH.

Houpis, C.H., Sating, R.R., (1997). MIMO QFT CAD Package (Ver.3), *Int. J. Control*, Vol. 7, No. 6, pp. 533-549.

Borghesani, C., Chait, Y. y Yaniv, O., (1994, 2002). *Quantitative Feedback Theory Toolbox – For use with MATLAB*. Terasoft.

Gutman P-O., (1996, 2001). *Qsyn - the Toolbox for Robust Control Systems Design for use with Matlab, User's manual*, NovoSyn AB, Jonstortpsvagen 61, Jonstorp, Sweden.

Houpis C.H., Rasmussen S.J., García-Sanz, M. (2001, 2005), Software de diseño del libro *Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications*. Edición 2ª. CRCPress, USA.

García-Sanz, M., Vital, P., Barreras, M., y Huarte, A. (2001a). *InterQFT*. Public University of Navarra. También presentado como Interactive

Tool for Easy Robust Control Design, *IFAC Int. Workshop on Internet Based Control Education*, pp. 83-88, Madrid, Spain.

Diaz J.M., Dormido S., y Aranda J. (2004), *SISO-QFTIT, una herramienta software interactiva para diseño de controladores robustos usando QFT*. UNED, Madrid, Spain.

Aplicaciones

Horowitz, I.M. *et al*, (1982). *Multivariable Flight Control Design with Uncertain Parameters (YF16CCV)*, AFWAL-TR-83-3036, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson AFB, OH.

Walke, J., Horowitz, I. y Houppis, C. (1984). Quantitative synthesis of highly uncertain MIMO flight control system for the forward swept wing X-29 aircraft. *Proc. IEEE Naecon Conf.*, pp. 576-583.

Bossert, D.E., (1989). *Design of Pseudo-Continuous-Time Quantitative Feedback Theory Robot Controllers*, AFIT/GE/ENG/ 89D-2, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH.

Trosen, D.W., (1993). *Development of an Prototype Refueling Automatic Flight Control System Using Quantitative Feedback Theory*, AFIT/GE/ENG/93-J-03, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH.

Kelemen, M., y Bagchi, A. (1993). Modeling and feedback control of a flexible arm of a robot for prescribed frequency domain tolerances. *Automatica*, Vol. 29, pp. 899-909.

Reynolds, O.R., Pachter, M. y Houppis, C.H. (1994). Design of a Subsonic Flight Control System for the Vista F-16 Using Quantitative Feedback Theory, *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 350-354.

Rasmussen, S.J. y Houppis, C.H. (1994). Development Implementation and Flight of a MIMO Digital Flight Control System for an Unmanned Research Vehicle Using Quantitative Feedback Theory, *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control*, Winter Annual Meeting of ASME, Chicago, IL.

Osmon, C., Pachter, M. y Houppis, C.H. (1996). Active Flexible Wing Control Using QFT, *IFAC 13th World Congress*, Vol. H, pp. 315-320, San Francisco, CA.

Franchek, M. y Hamilton, G.K. (1997). Robust Controller Design and Experimental Verification of I.C. Engine Speed Control, *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 7, pp. 609-628.

Pachter, M., Houppis, C.H. y Kang, K. (1997). Modelling and Control of an Electro-hydrostatic Actuator, *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, vol. 7, pp. 591-608.

García-Sanz, M. y Ostolaza, J.X., (2000). QFT-Control of a Biological Reactor for Simultaneous Ammonia and Nitrates Removal. *Int. J. on Systems, Analysis, Modelling, Simulation, SAMS*, No. 36, pp. 353-370.

Egaña, I., Villanueva, J., y García-Sanz, M. (2001). Quantitative Multivariable Feedback Design for a SCARA Robot Arm, *5th Int. Symp. on QFT and Robust Frequency Domain Methods*, pp. 67-72, Pamplona, Spain.

Kelemen M. y Akhrif O. (2001) Linear QFT control of a highly nonlinear multi-machine power system. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 11, No. 10, pp. 961-976.

Bentley A.E. (2001). Pointing control design for high precision flight telescope using quantitative feedback theory. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 11, No. 10, pp. 923-960.

Liberzon, A., Rubinstein, D, y Gutman, P.O. (2001). Active suspension for single wheel statin of on-road track vehicle. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 11, No. 10, pp. 977-999.

García-Sanz, M., Guillen, J.C., e Ibarrola, J.J. (2001b). Robust controller design for time delay systems with application to a pasteurisation process. *Control Engineering Practice*, No. 9, pp. 961-972.

Yaniv O., Fried O., y Furst-Yust M. (2002). QFT application for headphone's active noise cancellation. *Int. J. Robust Nonlinear Control*, Vol. 12, No. 4, pp. 373-383.

Gutman, P.O., Horesh, E., Guetta, R., y Borshevsky, M. (2003). Control of the Aero-Electric Power Station – an exciting QFT application for the 21st century. *Int. J. of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 13, No. 7, pp. 619-636.

García-Sanz, M. y Torres E., (2004), Control y experimentación del aerogenerador síncrono multipolar de velocidad variable TWT1650, *RIAI*, Vol. 1, No. 3, pp. 53-62.

García-Sanz, M. y Hadaegh, FY. (2004). *Coordinated Load Sharing QFT Control of Formation Flying Spacecrafts. 3D Deep Space and Low Earth Keplerian Orbit problems with model uncertainty*, NASA-JPL, JPL Document, D-30052, Pasadena, California, USA.

Kerr, M., (2004). *Robust Control of an Articulating Flexible Structure Using MIMO QFT*, PhD. Dissertation, The University of Queensland, Australia.

García-Sanz, M. y Barreras, M. (2005). Non-diagonal QFT controller design for a 3-input 3-output industrial Furnace. *Int. J. of Dynamic Systems, Measurement & Control*, ASME, USA.