

Ajuste automático de controladores en QFT mediante estructuras fraccionales – TESIS DOCTORAL –

Joaquín Cervera López

Director: Alfonso Baños Torrico

Departamento de Informática y Sistemas
Universidad de Murcia

28/09/2006

Esquema de la presentación

- 1 **Introducción**
 - Motivación
 - Antecedentes: ALS en QFT
 - Solución propuesta
 - Antecedentes: control con fraccionales
- 2 **Definición de óptimo**
 - Definición clásica en QFT
 - Maximización de área de realimentación negativa
 - Integración de ambas definiciones
 - Definición de óptimo utilizada
- 3 **Propuesta**
 - Ajuste para sistemas de fase mínima
 - Ajuste para sistemas de fase no mínima
 - Caso práctico
 - Herramienta software desarrollada

Esquema de la presentación

1 Introducción

- Motivación
- Antecedentes: ALS en QFT
- Solución propuesta
- Antecedentes: control con fraccionales

2 Definición de óptimo

- Definición clásica en QFT
- Maximización de área de realimentación negativa
- Integración de ambas definiciones
- Definición de óptimo utilizada

3 Propuesta

- Ajuste para sistemas de fase mínima
- Ajuste para sistemas de fase no mínima
- Caso práctico
- Herramienta software desarrollada

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
 - Ajuste del lazo:
- El problema de ajuste de lazo en QFT es el siguiente:
- Se desea encontrar un controlador $G_c(s)$ que satisfaga los requisitos de robustez en el dominio de la frecuencia:
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

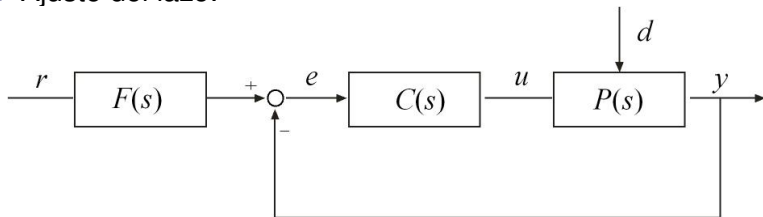
- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - $\min_{\theta} \|e(\theta)\|$
 - $\theta = \{K, \tau, \dots\}$
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

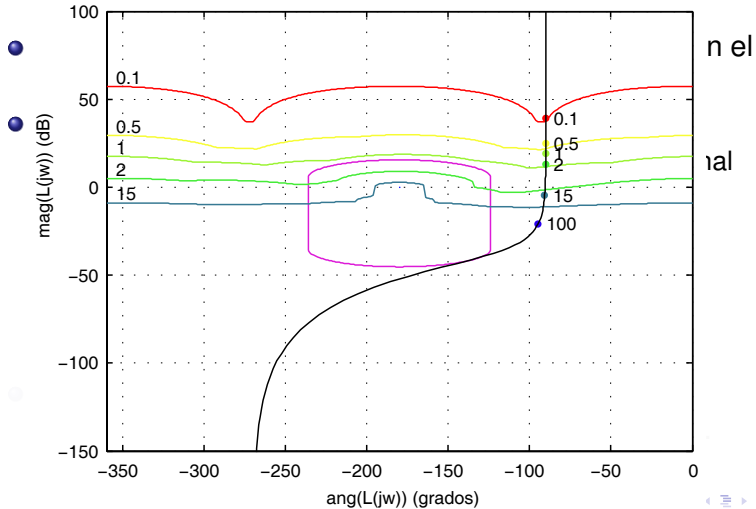
El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:



- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado



El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

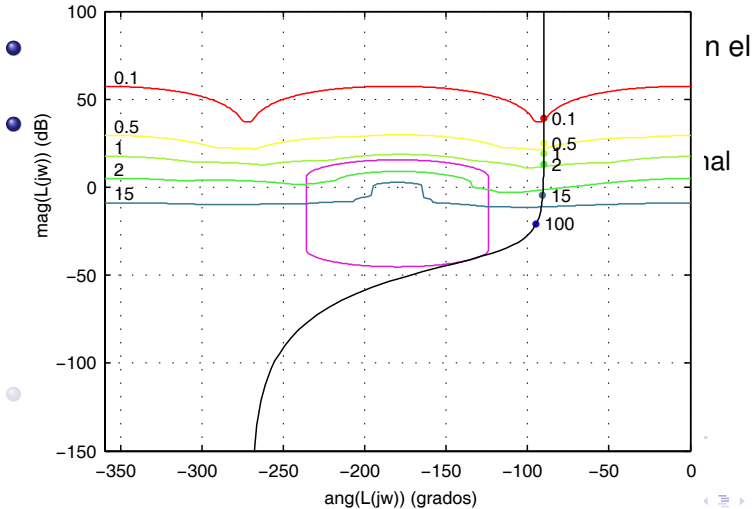
El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado



El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO:** conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

El problema planteado

- QFT: técnica de diseño de controladores robustos en el dominio de la frecuencia.
- Ajuste del lazo:
 - consiste en moldeo de $L_0 = CP_0$, lazo abierto nominal
 - es un paso fundamental
 - tradicionalmente, a mano
 - ajuste manual no trivial → deseable automatizar
 - PERO es un problema de optimización:
 - No lineal
 - No convexo ...
- **OBJETIVO**: conseguir procedimiento (rápido) que solucione el problema de ajuste automático del lazo.

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema → nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura → simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema → nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura → simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:
 - No garantizan óptimo global, menos cuanto más parámetros.
 - Tiempo de ejecución elevado, más cuanto más parámetros.

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:
 - No garantizan óptimo global, menos cuanto más parámetros.
 - Tiempo de ejecución elevado, más cuanto más parámetros.

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema → nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura → simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:
 - No garantizan óptimo global, menos cuanto más parámetros.
 - Tiempo de ejecución elevado, más cuanto más parámetros.

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:
 - No garantizan óptimo global, menos cuanto más parámetros.
 - Tiempo de ejecución elevado, más cuanto más parámetros.

Aproximaciones previas: posibilidades

- Simplificar problema \rightarrow nuevo problema de optimización:
 - Inconveniente: conservador
 - Necesario balance solubilidad vs. grado simplificación
- Usar estructuras (racionales) particulares:
 - Ventaja: aporta estructura \rightarrow simplifica la resolución, más cuanto menos parámetros tenga la estructura
 - Inconveniente: conservador, más cuanto menos moldeable sea la estructura
- Usar algoritmos capaces de optimización NL-NC, como evolucionarios, con estructuras racionales:
 - Ventaja: resuelven problema original, sol. no conservadora.
 - Inconvenientes:
 - No garantizan óptimo global, menos cuanto más parámetros.
 - Tiempo de ejecución elevado, más cuanto más parámetros.

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2^o orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2^o orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2º orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

Aproximaciones previas: ejemplos

- Problema simplificado:
 - Gera y Horowitz: linealización - fronteras lineales
 - Thomsom y Nwokah: convexificación - plantillas rectangulares o circulares
- Estructuras particulares:
 - Nandakumar y otros: PID, red adelanto/atraso y 2^o orden
 - Fransson y otros: PID
- Algoritmos NL-NC con estructuras racionales:
 - Chen y otros: algoritmos genéticos
 - Raimúndez, Baños y Barreiro: estrategias evolutivas

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy «plásticas» (flexibles, maleables...)
 - pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con pocos parámetros
 - soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy «**plásticas**» (flexibles, maleables...)
 - pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con **pocos parámetros**
 - soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy **«plásticas»** (flexibles, maleables...)
 - pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con **pocos parámetros**
 - soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy **«plásticas»** (flexibles, maleables...)
 - pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con **pocos parámetros**
 - soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy «**plásticas**» (flexibles, maleables...)
→ pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con **pocos parámetros**
→ soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

La solución propuesta

- Utilizar **optimización evolucionaria**
- Sobre estructuras que sean simultáneamente:
 - muy «**plásticas**» (flexibles, maleables...)
 - pueden aproximarse suficientemente al óptimo
 - con **pocos parámetros**
 - soluble con evolucionarios
- Propuesta de estructuras que cumplen simultáneamente ambos requisitos:

ESTRUCTURAS FRACCIONALES

(estructuras que contienen potencias no enteras de s)

- Adicionalmente, heurísticas que ayuden evolucionarios.

Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):
$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{eT}} + \frac{I}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$

- $PI^\lambda D^\mu$ ([Podlubny]):
$$E(s)_{PI^\lambda D^\mu} = K_P + \frac{1}{T_I} s^{-\lambda} + T_D s^\mu$$

- CRONE 2 ([Oustaloup *et al.*):

$$E_{CR2}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$

- CRONE 3 ([Oustaloup *et al.*):

$$E_{CR3}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a \cos \left[b \operatorname{Log} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right) \right] \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$

Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):

$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{e_T}} + \frac{I}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$

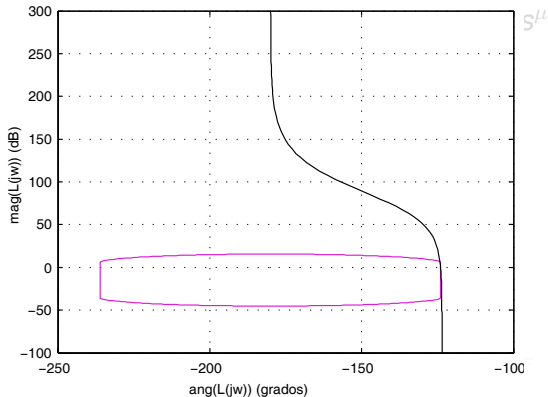
- $PI^\lambda D^\mu$ ([Podl...])

- CRONE 2 ([C...])

$$E_{CR2}(s) = k$$

- CRONE 3 ([C...])

$$E_{CR3}(s) = k$$



Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):
$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{eT}} + \frac{I}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$
- $PI^\lambda D^\mu$ ([Podlubny]):
$$E(s)_{PI^\lambda D^\mu} = K_P + \frac{1}{T_i} s^{-\lambda} + T_d s^\mu$$
- CRONE 2 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR2}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$
- CRONE 3 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR3}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a \cos \left[b \operatorname{Log} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right) \right] \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$

Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):
$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{e_T}} + \frac{I}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$
- $PI^\lambda D^\mu$ ([Podlubny]):
$$E(s)_{PI^\lambda D^\mu} = K_P + \frac{1}{T_i} s^{-\lambda} + T_d s^\mu$$
- CRONE 2 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR2}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$
- CRONE 3 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR3}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a \cos \left[b \operatorname{Log} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right) \right] \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$

Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):

$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{e_T}} + \frac{l}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$

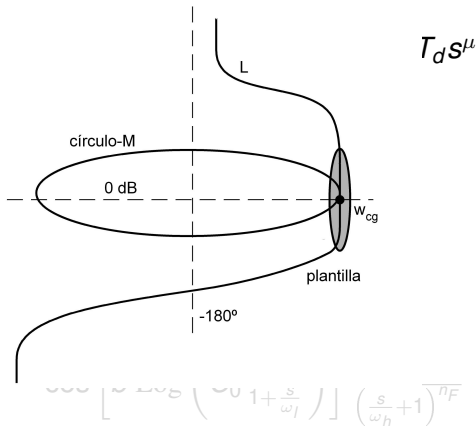
- PI^λD^μ ([Po

- CRONE 2

$$E_{CR2}(s) =$$

- CRONE 3

$$E_{CR3}(s) =$$



Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):
$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{e_T}} + \frac{I}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$
- $PI^\lambda D^\mu$ ([Podlubny]):
$$E(s)_{PI^\lambda D^\mu} = K_P + \frac{1}{T_i} s^{-\lambda} + T_d s^\mu$$
- CRONE 2 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR2}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$
- CRONE 3 ([Oustaloup *et al.*):
$$E_{CR3}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a \cos \left[b \operatorname{Log} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right) \right] \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_h} + 1 \right)^{n_F}}$$

Cronología de estructuras fraccionales en control

- TID ([Lurie]):

$$E_{TID}(s) = \left(\frac{T}{s^{eT}} + \frac{l}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$

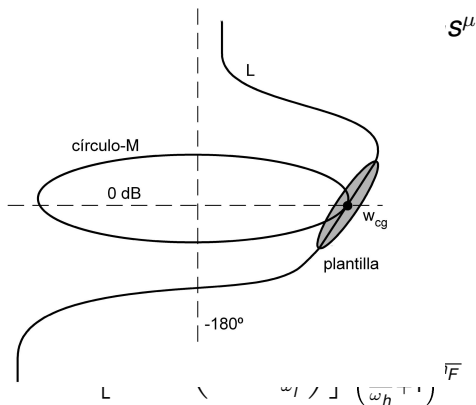
- PI^λD^μ ([Podlubn

- CRONE 2 ([Ous

$$E_{CR2}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} \right)$$

- CRONE 3 ([Ous

$$E_{CR3}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} \right)$$



Esquema de la presentación

1 Introducción

- Motivación
- Antecedentes: ALS en QFT
- Solución propuesta
- Antecedentes: control con fraccionales

2 Definición de óptimo

- Definición clásica en QFT
- Maximización de área de realimentación negativa
- Integración de ambas definiciones
- Definición de óptimo utilizada

3 Propuesta

- Ajuste para sistemas de fase mínima
- Ajuste para sistemas de fase no mínima
- Caso práctico
- Herramienta software desarrollada

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:

$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (implícitamente) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:
$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (implícitamente) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:

$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (implícitamente) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:

$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (**implícitamente**) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:

$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (**implícitamente**) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

Definición clásica de óptimo en QFT

- Lazo óptimo = L_0 que:
 - respeta fronteras y
 - MINIMIZA la ganancia de alta frecuencia:
$$k_{hf} := \lim_{s \rightarrow \infty} s^{n_{pe}} L_0(s)$$
- Se asume (**implícitamente**) especificación de frecuencia de cruce (ω_{cg}) mínima, dada por:
 - ω_R : $\omega_{cg} > \omega_R$ - fronteras (especificaciones)
 - ω_P : $\omega_{cg} > \omega_P$ - planta

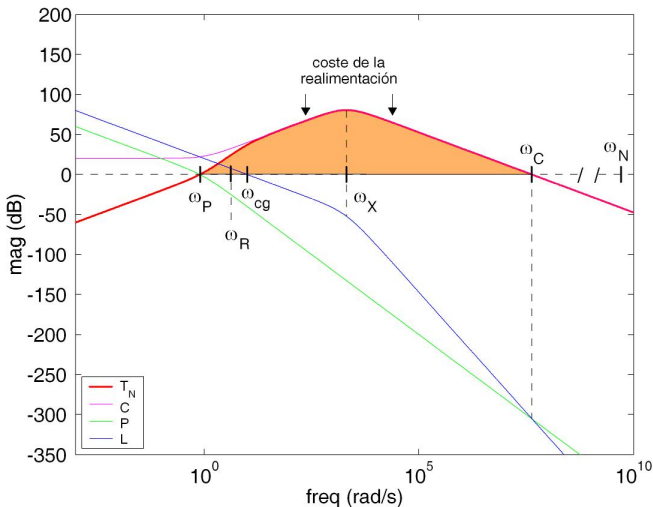
Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer caer $|L_0|$ cuanto antes
- Objetivo: minimizar **coste de la realimentación (COF)**, efecto del ruido del sensor...
- Interpretación:
 - Minimizar COF \Rightarrow minimizar $\frac{1}{|L_0|}$
 - $\frac{1}{|L_0|} \Rightarrow$ $\frac{1}{|L_0|} = \frac{1}{|L_0|} \frac{1}{\omega} \omega$
 - $\frac{1}{|L_0|} \Rightarrow$ $\frac{1}{|L_0|} = \frac{1}{|L_0|} \frac{1}{\omega} \omega$
 - $\frac{1}{|L_0|} \Rightarrow$ $\frac{1}{|L_0|} = \frac{1}{|L_0|} \frac{1}{\omega} \omega$

Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer caer $|L_0|$ cuanto antes
- Objetivo: minimizar **coste de la realimentación (COF)**, efecto del ruido del sensor...
- Interpretación:

Interpretación del óptimo de QFT



Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer caer $|L_0|$ cuanto antes
- Objetivo: minimizar **coste de la realimentación (COF)**, efecto del ruido del sensor...
- **Interpretación:**
 - minimizar COF (alta frecuencia)
 - para beneficio fijado por especificaciones (baja frecuencia)

Interpretación del óptimo de QFT

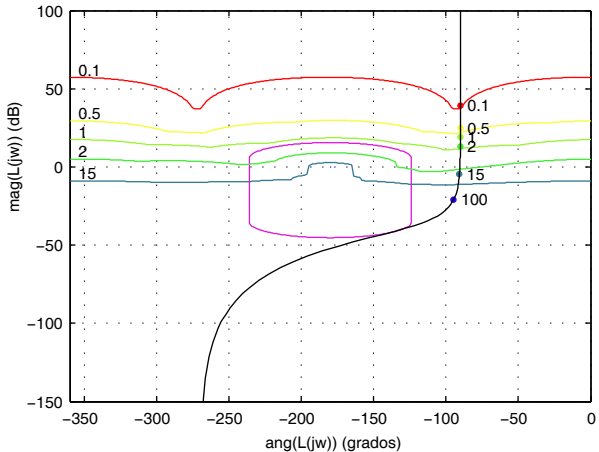
- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer caer $|L_0|$ cuanto antes
- Objetivo: minimizar **coste de la realimentación (COF)**, efecto del ruido del sensor...
- **Interpretación:**
 - minimizar COF (alta frecuencia)
 - para beneficio prefijado por especificaciones (baja frecuencia)

Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer caer $|L_0|$ cuanto antes
- Objetivo: minimizar **coste de la realimentación (COF)**, efecto del ruido del sensor...
- **Interpretación:**
 - minimizar COF (alta frecuencia)
 - para beneficio prefijado por especificaciones (baja frecuencia)

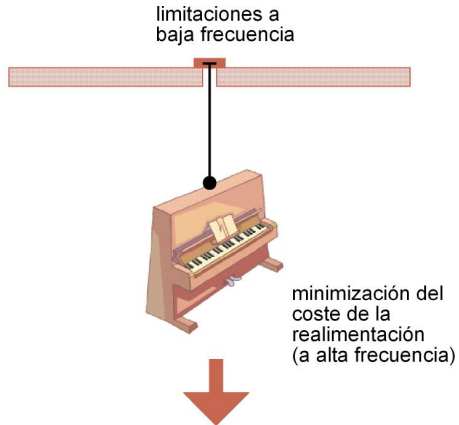
Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar k_{hf}
- Objetivo: min efecto del ruido
- Interpretación
 - minimizar
 - para beneficio de la frecuencia



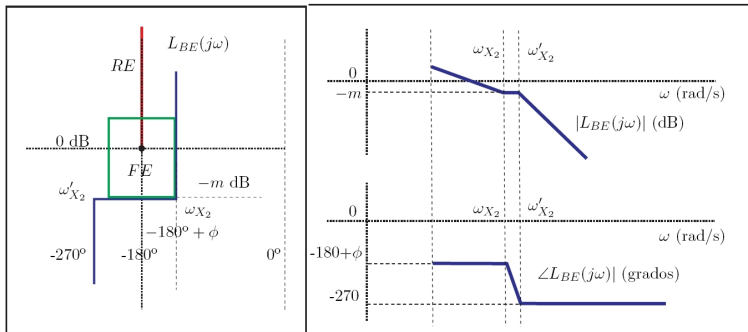
Interpretación del óptimo de QFT

- Minimizar $k_{hf} \equiv$ hacer
- Objetivo: minimizar **CO**: efecto del ruido del ser
- **Interpretación:**
 - minimizar COF (alta
 - para beneficio prefij frecuencia)



Heurísticas de aproximación al óptimo en QFT

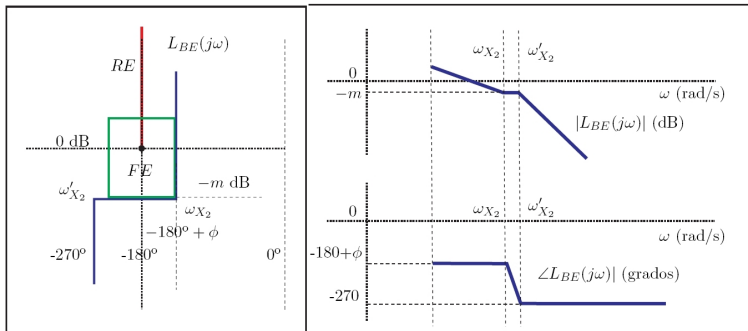
- L_0 debe tener esta forma:



- Elemento clave: **Bode Step.**

Heurísticas de aproximación al óptimo en QFT

- L_0 debe tener esta forma:



- Elemento clave: **Bode Step.**

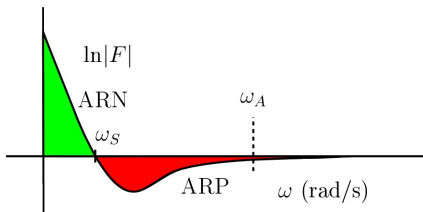
Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$

- Limitaciones:

Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$

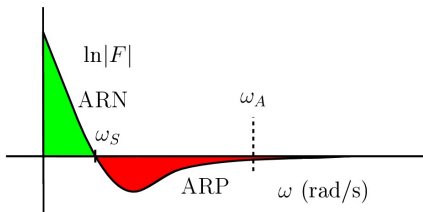


- Limitaciones:

- Integral de Bode (para fase mínima): $\int_{-\infty}^{\infty} \ln|F| d\omega = 0$
 $\Rightarrow \text{ARN} = \text{ARP}$
- Limitación ARP: ω_A , «ancho de banda disponible»

Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$

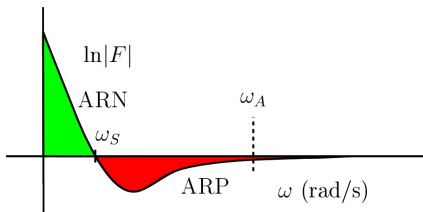


- Limitaciones:

- Integral de Bode (para fase mínima): $\int_{-\infty}^{\infty} \ln|F| d\omega = 0$
 $\Rightarrow \text{ARN} = \text{ARP}$
- Limitación ARP: ω_A , «ancho de banda disponible»

Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$

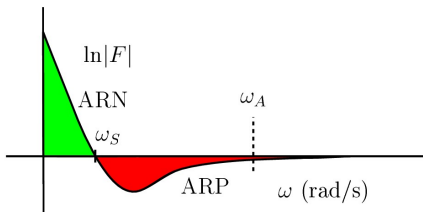


- Limitaciones:

- Integral de Bode (para fase mínima): $\int_{-\infty}^{\infty} \ln|F| d\omega = 0$
 $\Rightarrow \text{ARN} = \text{ARP}$
- Limitación ARP: ω_A , «ancho de banda disponible»

Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$

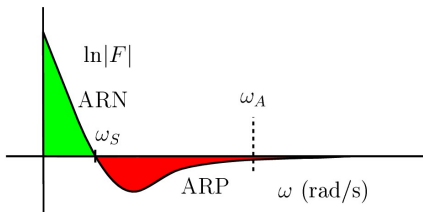


- Limitaciones:

- Integral de Bode (para fase mínima): $\int_{-\infty}^{\infty} \ln|F| d\omega = 0$
 \Rightarrow **ARN = ARP**
- Limitación ARP: ω_A , «ancho de banda disponible»

Definición basada en áreas de realimentación

- Realimentación (feedback): magnitud de $F := 1 + L$



- Limitaciones:

- Integral de Bode (para fase mínima): $\int_{-\infty}^{\infty} \ln|F| d\omega = 0$
 \Rightarrow **ARN = ARP**
- Limitación ARP: ω_A , «ancho de banda disponible»

Interpretación del óptimo basado en ARN

- Interpretación:

- Maximizar beneficio realimentación (ARN) (baja frec.)
- para COF prefijado por ω_A (alta frec.)

Interpretación del óptimo basado en ARN

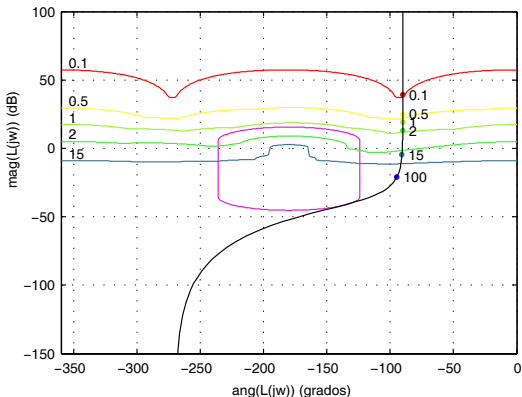
- Interpretación:
 - Maximizar beneficio realimentación (ARN) (baja frec.)
 - para COF prefijado por ω_A (alta frec.)

Interpretación del óptimo basado en ARN

- Interpretación:
 - Maximizar beneficio realimentación (ARN) (baja frec.)
 - para COF prefijado por ω_A (alta frec.)

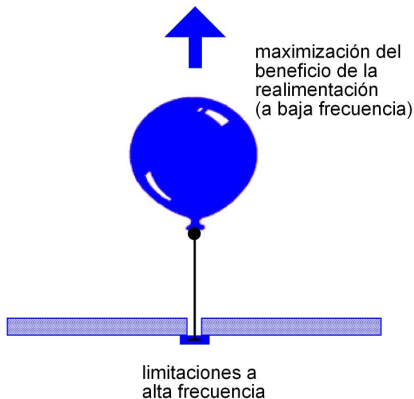
Interpretación del óptimo basado en ARN

- Interpretación:
 - Maximizar beneficio realimentación (ARN) (baja frec.)
 - para COF prefijado por ω_A (alta frec.)



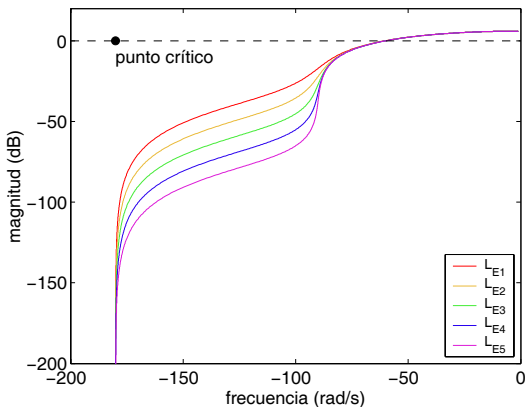
Interpretación del óptimo basado en ARN

- Interpretación:
 - Maximizar beneficio realimentación (ARN) (baja frec.)
 - para COF prefijado por ω_A (alta frec.)



Heurísticas con óptimo basado en ARN

- Aproximar punto crítico ($-180^\circ, 0$ dB) (\equiv *minimizar* k_{hf}) (Bode, Horowitz, Lurie y Enright)

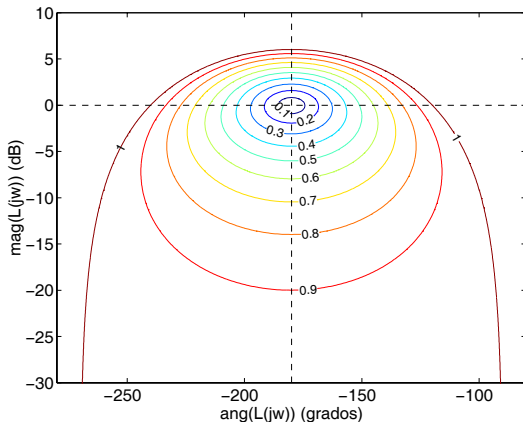


Heurísticas con óptimo basado en ARN

lazo	ARN
L_{E_1}	12
L_{E_2}	12.6
L_{E_3}	13
L_{E_4}	13.3
L_{E_5}	13.4

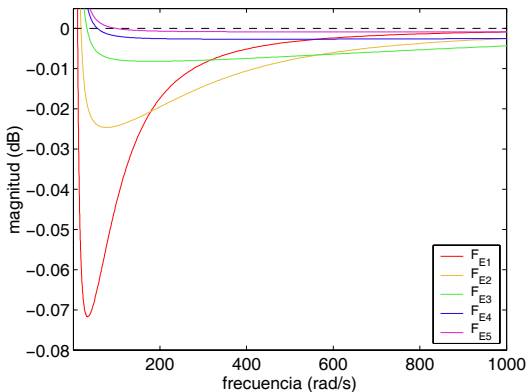
Heurísticas con óptimo basado en ARN

curvas de nivel de $|F|$ en Nichols (escala lineal)



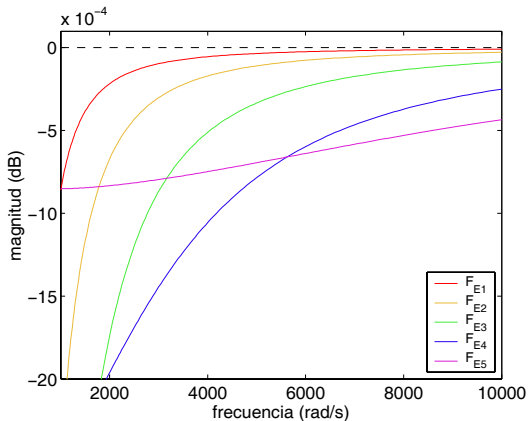
Heurísticas con óptimo basado en ARN

ARP, frecuencias iniciales tras ω_S



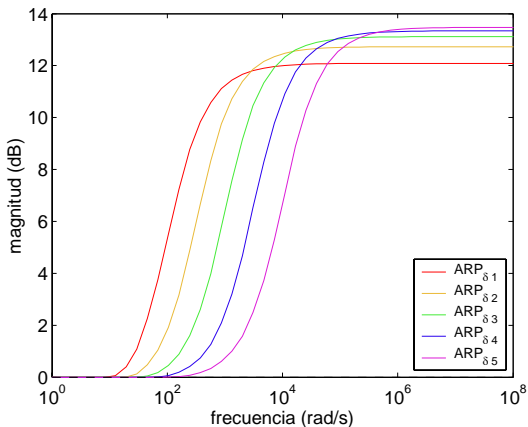
Heurísticas con óptimo basado en ARN

ARP, frecuencias finales



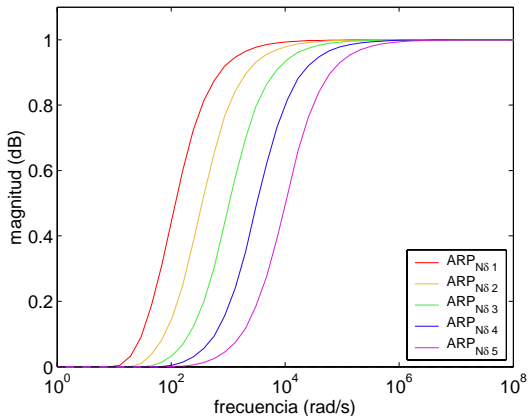
Heurísticas con óptimo basado en ARN

ARP_{δ} : ARP hasta frecuencia ω_{δ}



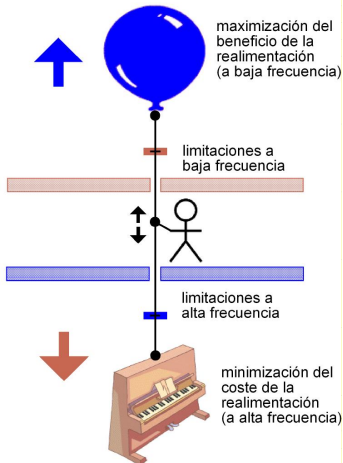
Heurísticas con óptimo basado en ARN

$$ARP_{N\delta}: \frac{ARP_{\delta}}{ARP}$$



Integración de ambas definiciones

Propuesta:



Definición de óptimo utilizada

- Óptimo de QFT, con ligeros matices.
- Función objetivo:

$$O(L(j\omega)) = k_{hf-dB} + B \sum_{\omega \in \Theta} (FC_{UHFB}(L(j\omega)) + RE(L(j\omega))) \\ + B \sum_{\omega \in \Omega} (FA(L(j\omega)) + FC(L(j\omega)))$$

Definición de óptimo utilizada

- Óptimo de QFT, con ligeros matices.
- Función objetivo:

$$\begin{aligned}
 O(L(j\omega)) = & k_{hf-dB} + B \sum_{\omega \in \Theta} (FC_{UHFB}(L(j\omega)) + RE(L(j\omega))) \\
 & + B \sum_{\omega \in \Omega} (FA(L(j\omega)) + FC(L(j\omega)))
 \end{aligned}$$

Esquema de la presentación

1 Introducción

- Motivación
- Antecedentes: ALS en QFT
- Solución propuesta
- Antecedentes: control con fraccionales

2 Definición de óptimo

- Definición clásica en QFT
- Maximización de área de realimentación negativa
- Integración de ambas definiciones
- Definición de óptimo utilizada

3 Propuesta

- Ajuste para sistemas de fase mínima
- Ajuste para sistemas de fase no mínima
- Caso práctico
- Herramienta software desarrollada

Por qué estructuras fraccionales aproximan óptimo

Para conseguir óptimo necesario:

- Seguir lado derecho del UHFB (fase no múltiplo de 90)
- Transición rápida hacia parte inferior

Por qué estructuras fraccionales aproximan óptimo

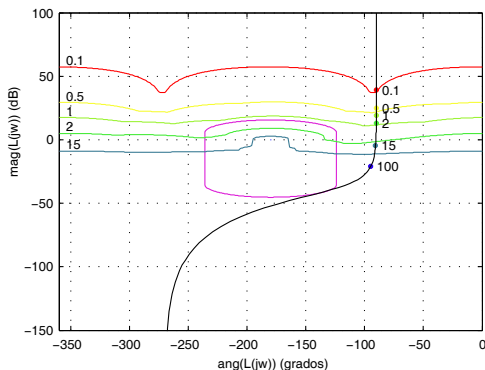
Para conseguir óptimo necesario:

- Seguir lado derecho del UHFB (fase no múltiplo de 90)
- Transición rápida hacia parte inferior

Por qué estructuras fraccionales aproximan óptimo

Para conseguir óptimo necesario:

- Seguir lado derecho del UHFB (fase no múltiplo de 90)
- Transición rápida hacia parte inferior



Problema ejemplo

Benchmark Example # 2 del Matlab QFT toolbox:

$$\mathbf{P} = \left\{ P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}, k \in [1, 10], a \in [1, 10] \right\}$$

- Especificaciones:

- estabilidad robusta:

$$\left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \gamma = 1.2, \forall P \in \mathbf{P}, \omega \geq 0$$

- seguimiento robusto:

$$|T_{min}|(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq |T_{max}|(\omega)$$

- ω_{cg} : no se especifica \rightarrow dada por ω_R

Problema ejemplo

Benchmark Example # 2 del Matlab QFT toolbox:

$$\mathbf{P} = \left\{ P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}, k \in [1, 10], a \in [1, 10] \right\}$$

- Especificaciones:

- estabilidad robusta:

$$\left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \gamma = 1.2, \forall P \in \mathbf{P}, \omega \geq 0$$

- seguimiento robusto:

$$|T_{min}|(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq |T_{max}|(\omega)$$

- ω_{cg} : no se especifica \rightarrow dada por ω_R

Problema ejemplo

Benchmark Example # 2 del Matlab QFT toolbox:

$$\mathbf{P} = \left\{ P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}, k \in [1, 10], a \in [1, 10] \right\}$$

- Especificaciones:

- estabilidad robusta:

$$\left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \gamma = 1.2, \forall P \in \mathbf{P}, \omega \geq 0$$

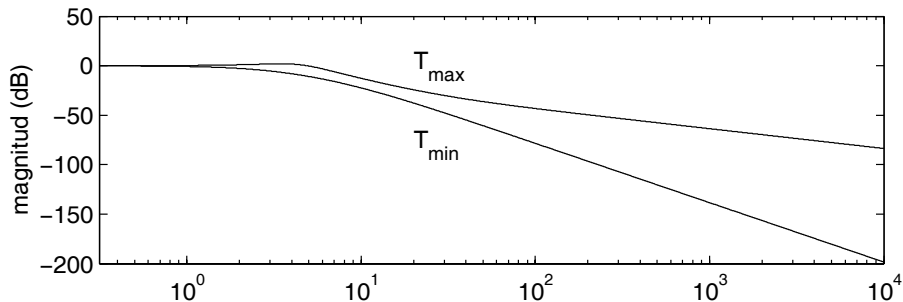
- seguimiento robusto:

$$|T_{min}|(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq |T_{max}|(\omega)$$

- ω_{cg} : no se especifica \rightarrow dada por ω_R

Problema ejemplo

Benchmark Example # 2 del Matlab QFT toolbox:



$$|I_{\min}|(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{\text{frecuencia (rad/s)}}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq |I_{\max}|(\omega)$$

● ω_{cg} : no se especifica → dada por ω_R

Problema ejemplo

Benchmark Example # 2 del Matlab QFT toolbox:

$$\mathbf{P} = \left\{ P(s) = \frac{ka}{s(s+a)}, k \in [1, 10], a \in [1, 10] \right\}$$

- Especificaciones:

- estabilidad robusta:

$$\left| \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \gamma = 1.2, \forall P \in \mathbf{P}, \omega \geq 0$$

- seguimiento robusto:

$$|T_{min}|(\omega) \leq \left| F(j\omega) \frac{P(j\omega)C(j\omega)}{1 + P(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq |T_{max}|(\omega)$$

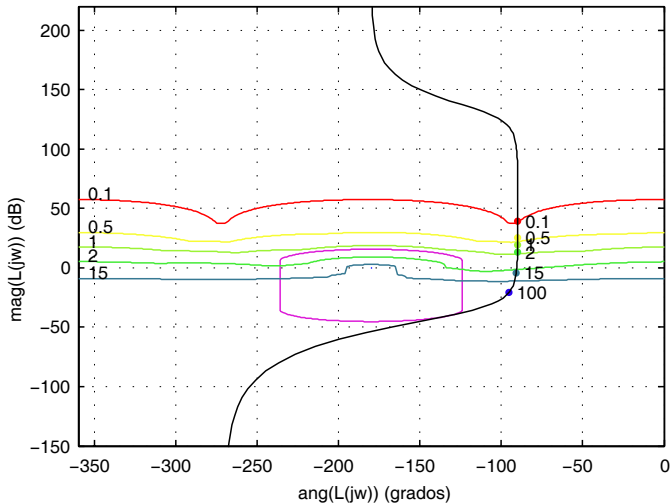
- ω_{cg} : no se especifica \rightarrow dada por ω_R

PID

$$k_{hf} = 151.9 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 9$$

PID



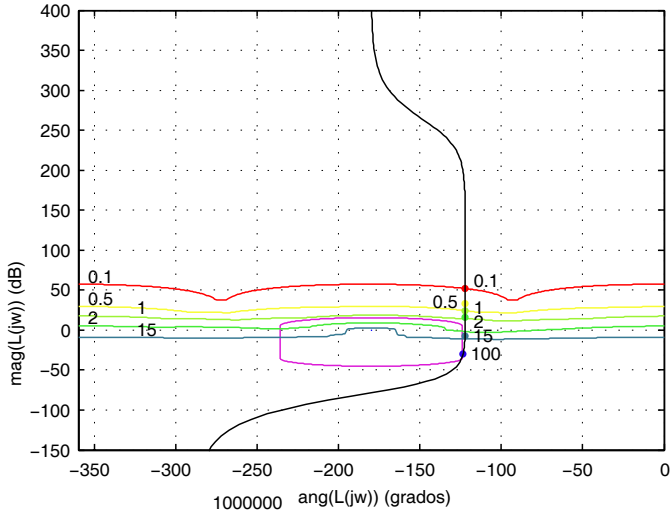
TID

$$E_{TID}(s) = K \left(\frac{T}{s^{e_T}} + \frac{1}{s} + \frac{qDs}{q+s} \right) \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{w_h}\right)^{n_h}}$$

$$k_{hf} = 139.86 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 8 \text{ rad/s}$$

TID

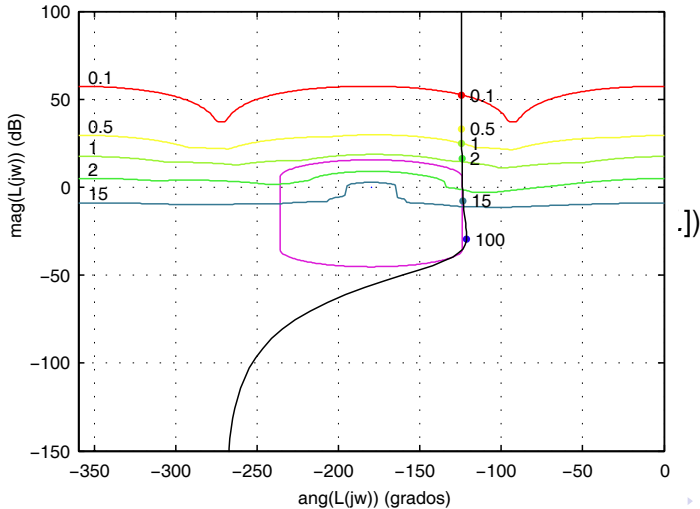


$$E_{PI^{\lambda}D^{\mu}}(s) = k_c X^{\mu} \left(\frac{\lambda_1 s + 1}{s} \right)^{\lambda} \left(\frac{\lambda_2 s + 1}{s \lambda_2 s + 1} \right)^{\mu}$$

(estructura multiplicativa: [Monje, Vinagre *et al.*])

$$k_{hf} = 128 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 7.9 \text{ rad/s}$$



CRONE 2

- Término central,

$$T_2(s) = \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n$$

pierde su semántica para buscar mejor ajuste QFT posible

- NOTA: es como $PI^\lambda D^\mu$, pero con un parámetro ligado.

$$k_{hf} = 133.5 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 8 \text{ rad/s}$$

CRONE 2

- Término central,

$$T_2(s) = \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n$$

pierde su semántica para buscar mejor ajuste QFT posible

- NOTA: es como $PI^\lambda D^\mu$, pero con un parámetro ligado.

$$k_{hf} = 133.5 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 8 \text{ rad/s}$$

CRONE 2

- Término central,

$$T_2(s) = \left(\frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^n$$

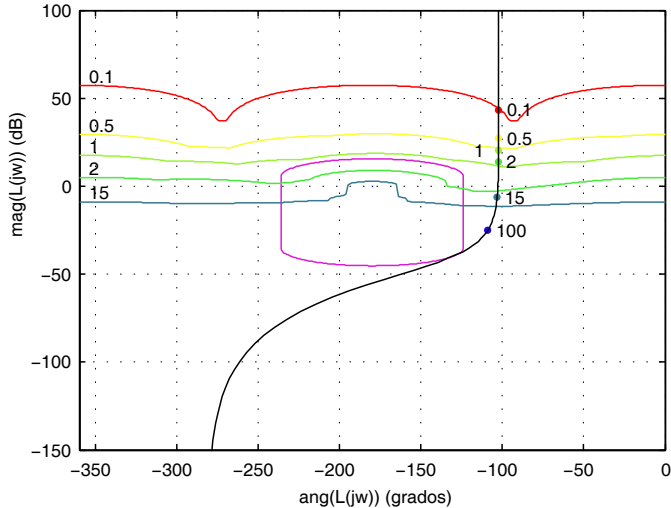
pierde su semántica para buscar mejor ajuste QFT posible

- NOTA: es como $PI^\lambda D^\mu$, pero con un parámetro ligado.

$$k_{hf} = 133.5 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 8 \text{ rad/s}$$

CRONE 2



T posible
ado.

CRONE 3

Término central,

$$T_3(s) = \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a \cos \left[b \operatorname{Log} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right) \right]$$

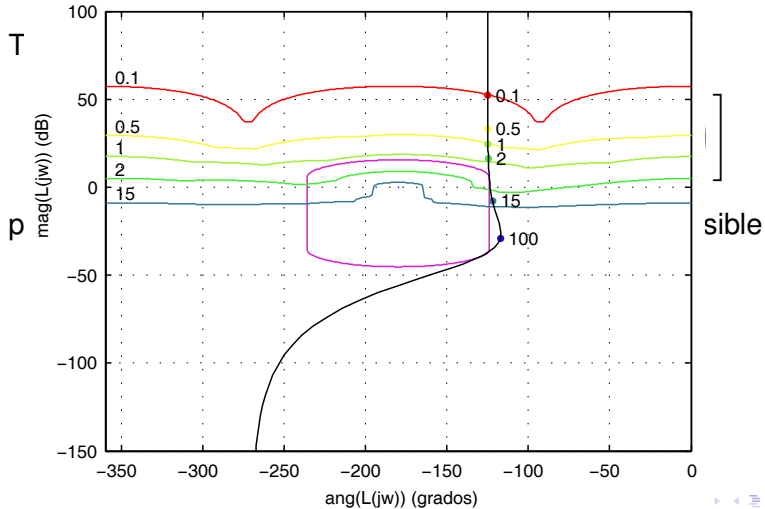
pierde su semántica para buscar mejor ajuste QFT posible

IMPORTANTE: pueden aparecer ceros RHP

$$k_{hf} = 129.6 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 7.7 \text{ rad/s}$$

CRONE 3



CRONE 3 desacoplado

(NUEVA ESTRUCTURA)

$$E_{CR3des}(s) = k \left(\frac{\omega_l}{s} + 1 \right)^{n_l} \left(C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_h}}{1 + \frac{s}{\omega_l}} \right)^a$$

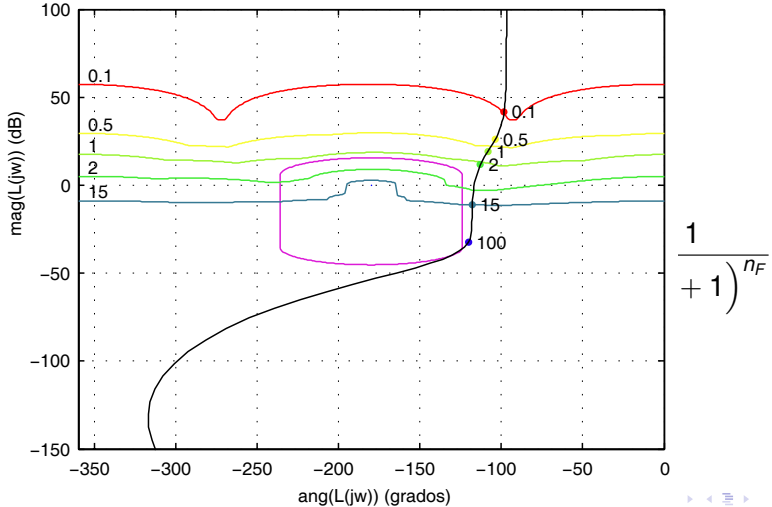
$$\cos \left[b \operatorname{Log} \left(c C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega'_h}}{1 + \frac{s}{\omega'_l}} \right) \right] \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_{h4}} + 1 \right)^{n_F}}$$

IMPORTANTE: pueden aparecer ceros RHP

$$k_{hf} = 103.2 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 5.6 \text{ rad/s}$$

CRONE 3 desacoplado



CRONE 3 desacoplado: análisis de ceros RHP

Condiciones para evitarlos:

- si $b > 0$,

$$\ln C_0 < \frac{\pi}{2b}(2k_{ceil} - 1) - \ln c$$

$$\ln C_0 < -\frac{\pi}{2b}(2k_{floor} - 1) + \ln c$$

- si $b < 0$,

$$\ln C_0 < \frac{\pi}{2b}(2k_{floor} - 1) - \ln c$$

$$\ln C_0 < -\frac{\pi}{2b}(2k_{ceil} - 1) + \ln c$$

donde

$$k_{ceil} = \left\lceil \frac{1}{2} \left(\ln c \frac{2b}{\pi} + 1 \right) \right\rceil, \quad k_{floor} = \left\lfloor \frac{1}{2} \left(\ln c \frac{2b}{\pi} + 1 \right) \right\rfloor$$

Términos complejos de orden fraccional

(NUEVA ESTRUCTURA)

- Término base:

$$T = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \right)^e$$

- Estructura elegida para fase mínima:

$$E_{t2o}(s) = KT_1 T_2 T_3$$

- Reglas para *eliminar* parámetros
- Resultado:

$$k_{hf} = 94.2 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 5.4 \text{ rad/s}$$

Términos complejos de orden fraccional

(NUEVA ESTRUCTURA)

- Término base:

$$T = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \right)^e$$

- Estructura elegida para fase mínima:

$$E_{t2o}(s) = KT_1 T_2 T_3$$

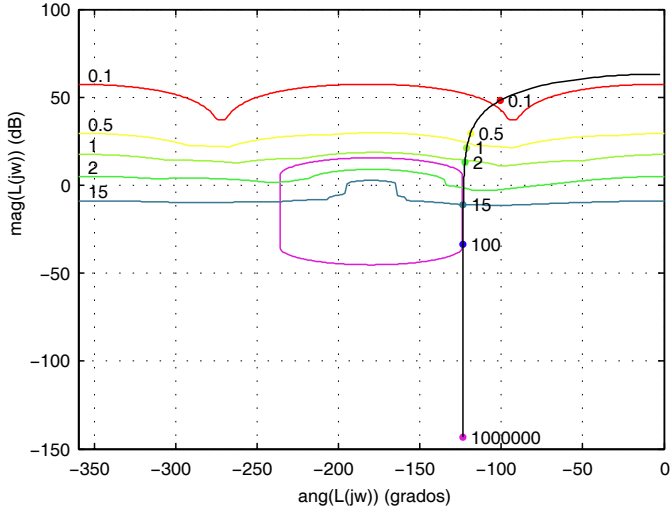
- Reglas para *eliminar* parámetros

- Resultado:

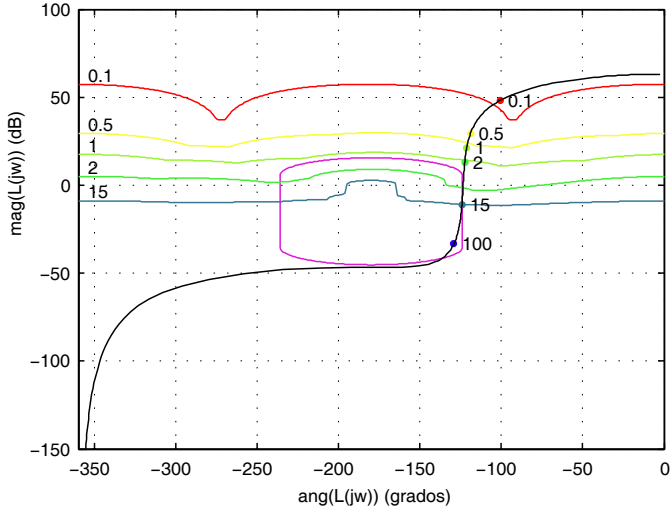
$$k_{hf} = 94.2 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 5.4 \text{ rad/s}$$

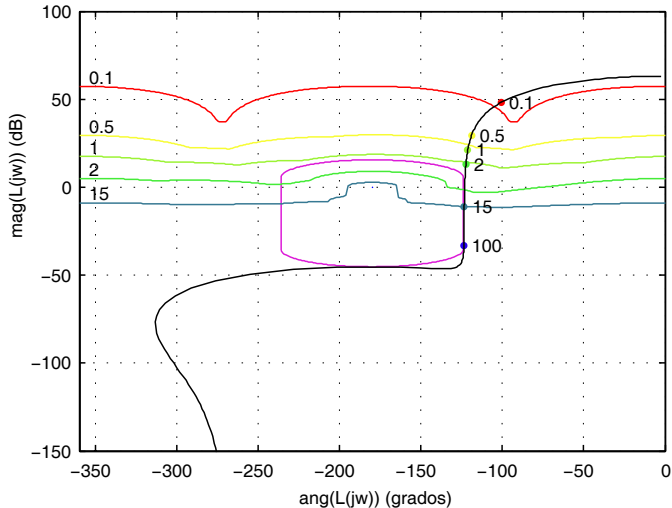
Términos complejos de orden fraccional



Términos complejos de orden fraccional



Términos complejos de orden fraccional



Términos complejos de orden fraccional

(NUEVA ESTRUCTURA)

- Término base:

$$T = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \right)^e$$

- Estructura elegida para fase mínima:

$$E_{t2o}(s) = KT_1 T_2 T_3$$

- Reglas para *eliminar* parámetros
- Resultado:

$$k_{hf} = 94.2 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 5.4 \text{ rad/s}$$

Términos complejos de orden fraccional

(NUEVA ESTRUCTURA)

- Término base:

$$T = \left(\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \right)^e$$

- Estructura elegida para fase mínima:

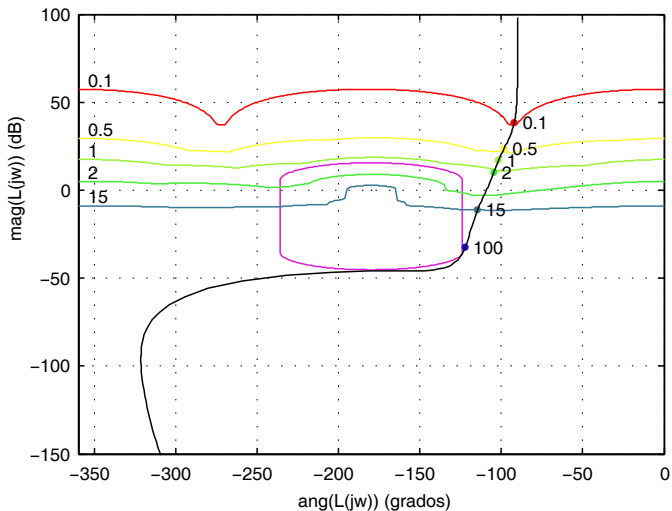
$$E_{t2o}(s) = KT_1 T_2 T_3$$

- Reglas para *eliminar* parámetros
- Resultado:

$$k_{hf} = 94.2 \text{ dB}$$

$$\omega_{cg} = 5.4 \text{ rad/s}$$

Términos complejos de orden fraccional

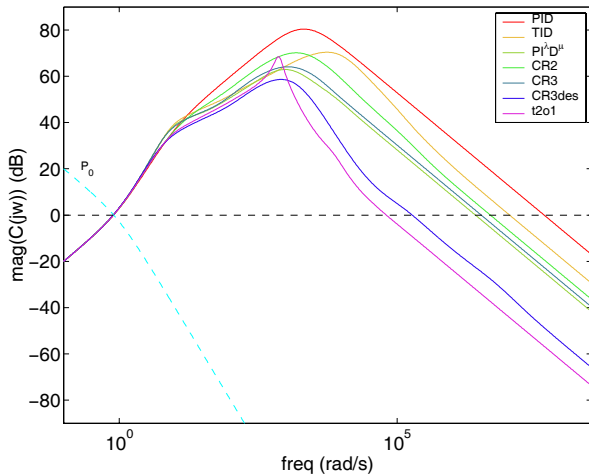


Comparativa

CONTROLADOR	k_{hf} (dB)	ω_{cg} (rad/s)
PID	152	9
TID	140	8
$PI^\lambda D^\mu$	128	7.9
CRONE 2	133.5	8
CRONE 3	129.6	7.7
CRONE 3 desacoplado	103.2	5.6
términos de 2º orden	94.2	5.4

Comparativa

Coste de la realimentación



Comparativa

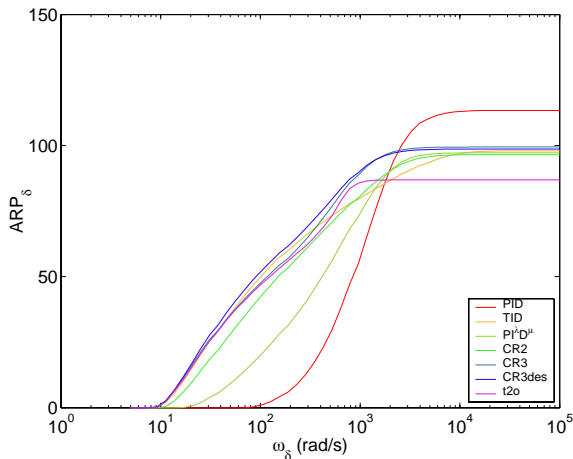
Áreas de realimentación

Nuevos diseños, fijando $\omega_{cg} = 9\text{rad/s}$:

CONTROLADOR	k_{hf} (dB)	ARN
PID	151.5	113.4
TID	143.5	98
$PI^\lambda D^\mu$	123.2	97.2
CRONE 2	128.7	96.6
CRONE 3	132.4	99.4
CRONE 3 desacoplado	130.7	98.7
términos de 2 ^o orden	117.6	86.9

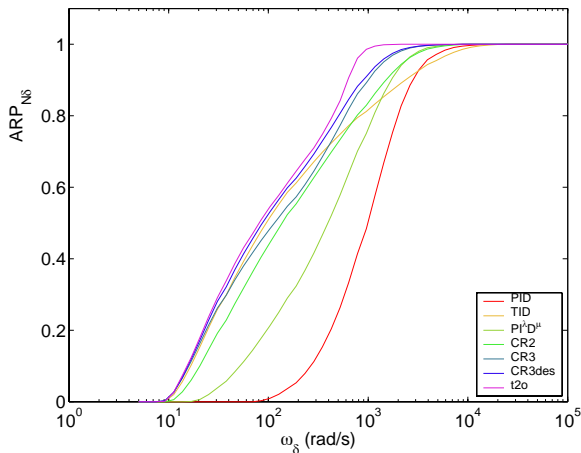
Comparativa

Áreas de realimentación: ARN_{δ}



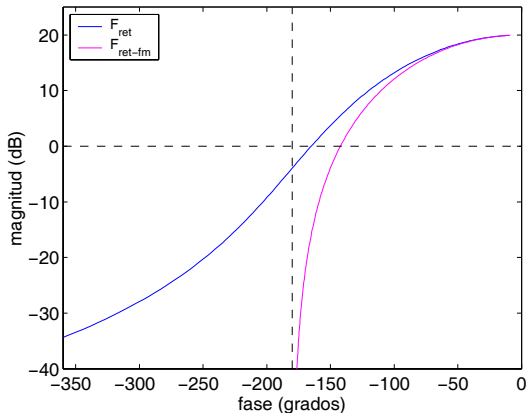
Comparativa

Áreas de realimentación: $ARN_{N\delta}$



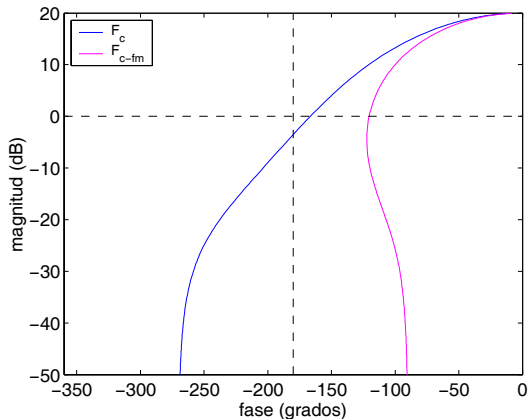
Retardo

- Limitación fundamental; efecto:

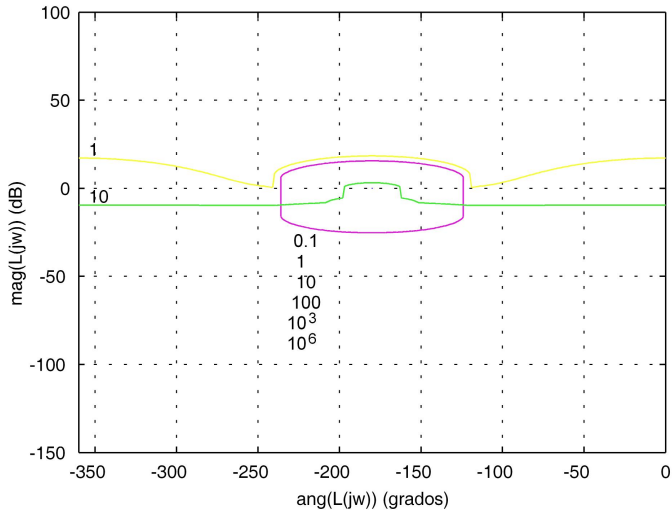


Cero RHP

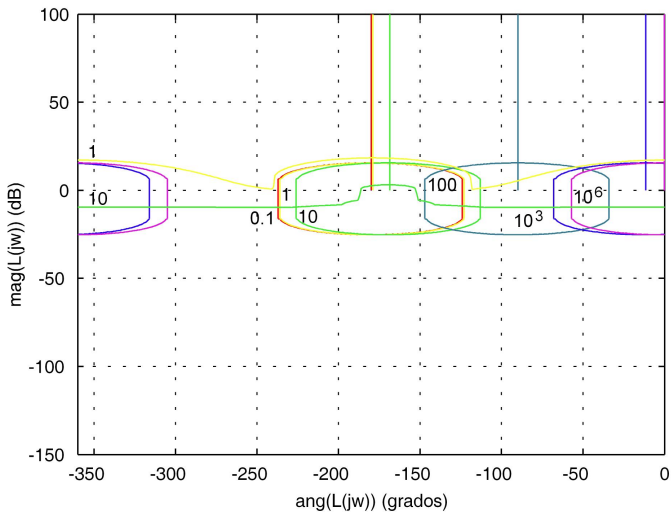
- Limitación fundamental; efecto:



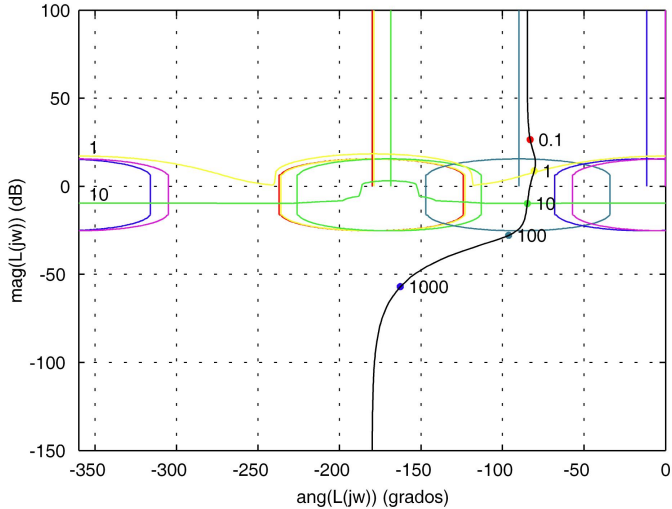
Cero RHP



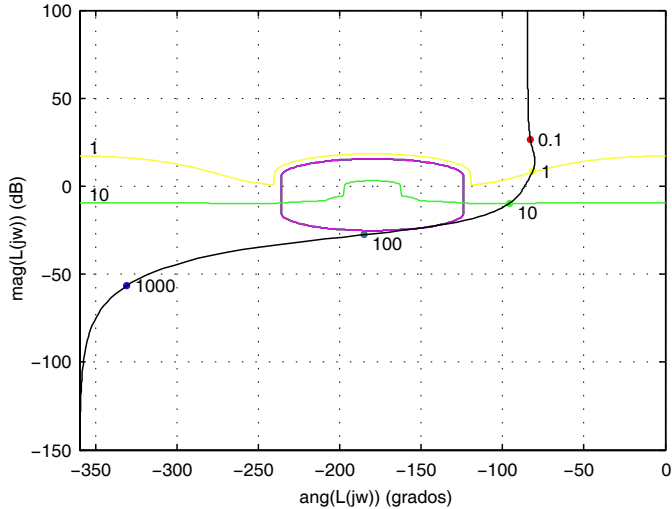
Cero RHP



Cero RHP

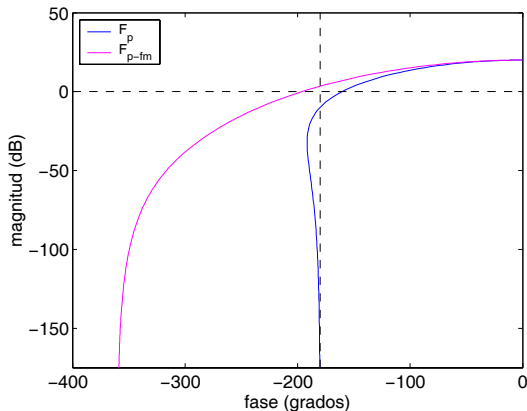


Cero RHP

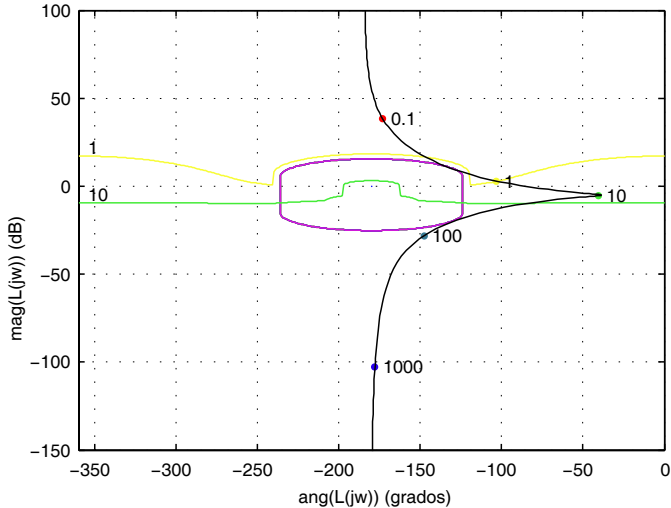


Polo RHP

- Limitación fundamental; efecto:



Polo RHP



Caso práctico: planta del CTNC

Robust Control of Thermal Treatments in Can Industry [Baños *et al.*]

- Planta experimental, tratamiento térmico de alimentos.
- Controlar T^a durante esterilización...
 - para diferentes productos (=control robusto)
 - T^a excesiva = pérdida de propiedades
 - T^a baja = esterilización deficiente

Caso práctico: planta del CTNC

Robust Control of Thermal Treatments in Can Industry [Baños *et al.*]

- Planta experimental, tratamiento térmico de alimentos.
- Controlar T^a durante esterilización...
 - para diferentes productos (=control robusto)
 - T^a excesiva = pérdida de propiedades
 - T^a baja = esterilización deficiente

Caso práctico: planta del CTNC

Robust Control of Thermal Treatments in Can Industry [Baños *et al.*]

- Planta experimental, tratamiento térmico de alimentos.
- Controlar T^a durante esterilización...
 - para diferentes productos (=control robusto)
 - T^a excesiva = pérdida de propiedades
 - T^a baja = esterilización deficiente

Caso práctico: planta del CTNC

Robust Control of Thermal Treatments in Can Industry [Baños *et al.*]

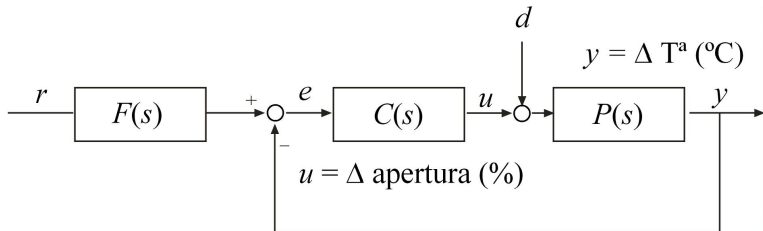
- Planta experimental, tratamiento térmico de alimentos.
- Controlar T^a durante esterilización...
 - para diferentes productos (=control robusto)
 - T^a excesiva = pérdida de propiedades
 - T^a baja = esterilización deficiente

Caso práctico: planta del CTNC

Robust Control of Thermal Treatments in Can Industry [Baños *et al.*]

- Planta experimental, tratamiento térmico de alimentos.
- Controlar T^a durante esterilización...
 - para diferentes productos (=control robusto)
 - T^a excesiva = pérdida de propiedades
 - T^a baja = esterilización deficiente

Caso práctico: planta del CTNC



Caso práctico: planta del CTNC

$$P_{\theta}(s) = k \frac{e^{-sT_0}}{1 + T_p s}$$

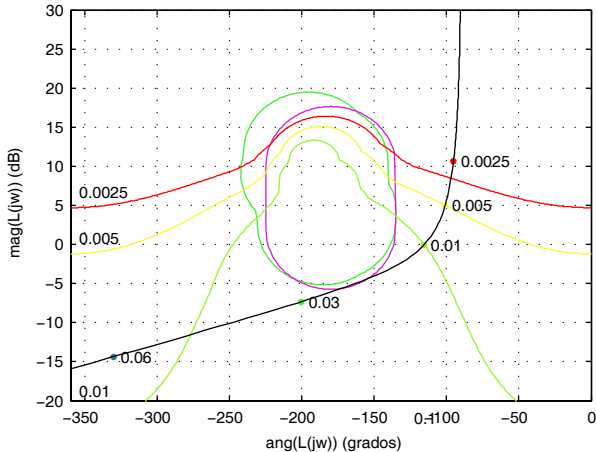
k	T_p	T_0
0.11	55.6	31.7
0.06	43.5	15.0
0.10	58.8	15.0
0.04	30.3	20.0
0.10	45.5	15.0
0.10	52.6	41.5
0.03	33.3	49.0
0.08	43.5	53.2
0.04	47.6	16.8

Caso práctico: planta del CTNC

- Especificaciones:
 - Rechazo de perturbaciones a la entrada de la planta: el mejor conseguible hasta $\omega = 0.01$ rad/s
→ elegidas satisficibles por todos los controladores
 - Margen de fase: 45°
 - Atenuación ruido sensor a la salida: -40 dB desde 100 rad/s

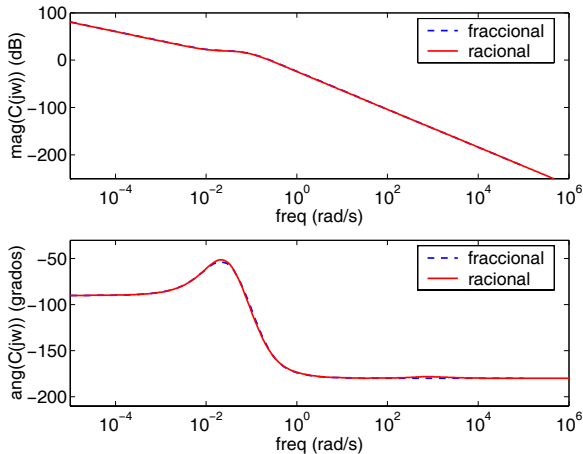
Caso práctico: planta del CTNC

Ejemplo de diseño (CRONE 3)



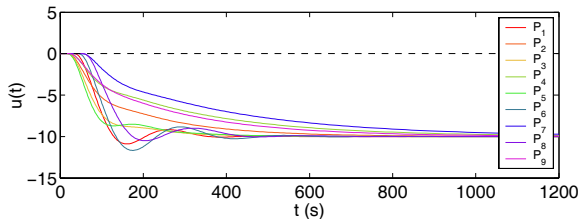
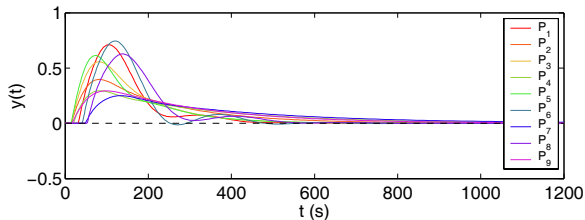
Caso práctico: planta del CTNC

Implementación para simulación



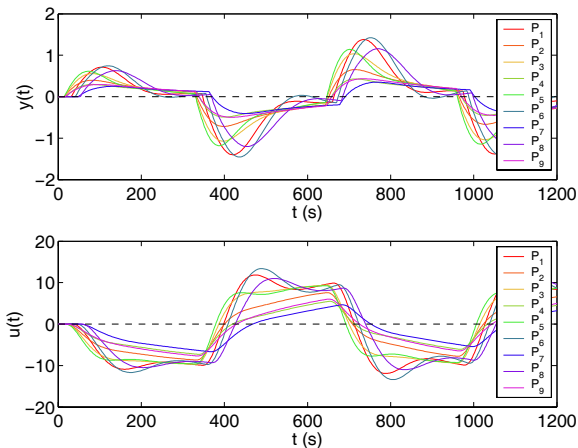
Caso práctico: planta del CTNC

Respuesta escalón



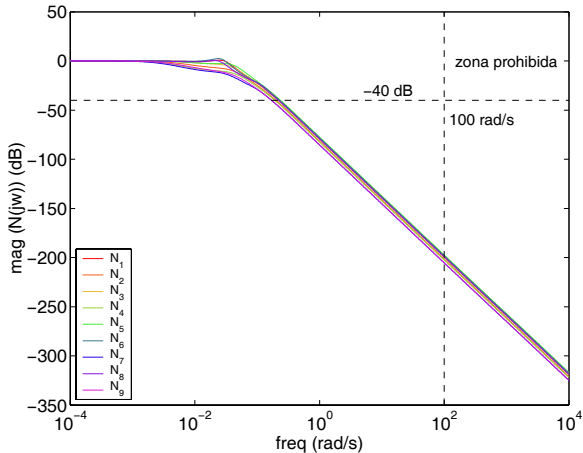
Caso práctico: planta del CTNC

Respuesta ante onda cuadrada



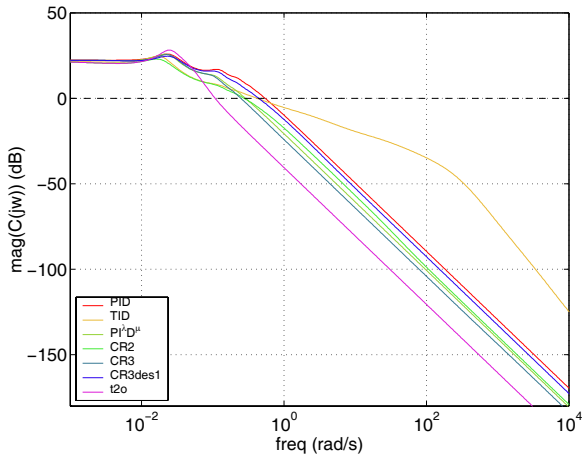
Caso práctico: planta del CTNC

Ruido del sensor a la salida



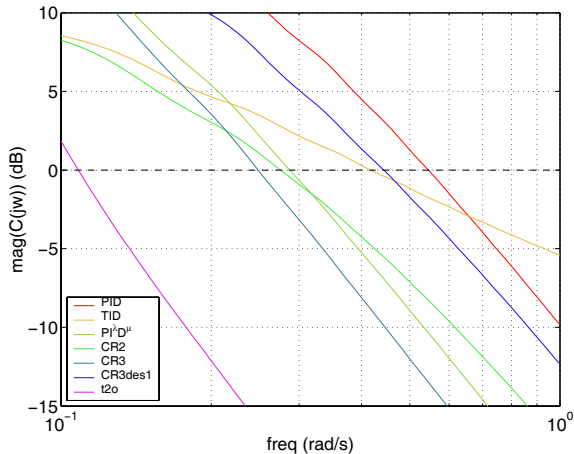
Caso práctico: planta del CTNC

Ruido del sensor a la entrada de la planta (T_N) (COF)



Caso práctico: planta del CTNC

Ruido del sensor a la entrada de la planta (T_N) (COF) (ampliado)



Caso práctico: planta del CTNC

Comparación de resultados:

CONTROLADOR	k_{hf} (dB)	ω_{cg} (rad/s)
PID	-9.5	0.0108
$PI^{\lambda}D^{\mu}$	-20.6	0.0098
TID	25.5	0.0102
CRONE 2	-15.8	0.0091
CRONE 3	-23.7	0.0098
CRONE 3 desacoplado	-31.2	0.0087
controlador 2 ^o orden	-40.47	0.0089

Herramienta software desarrollada

⇒ Demostración...

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Conclusiones

- Revisión de concepto de óptimo en términos de maximización ARN y minimización COF; posible integración.
- Planteamiento del problema como problema de optimización sobre estructuras fraccionales.
- Adaptación a QFT de estas estructuras fraccionales: TID, $PI^\lambda D^\mu$, CRONE 2 y CRONE 3.
- Definición de condiciones en CRONE 3 (desacoplado/NO), para evitar ceros RHP.
- Propuesta de nuevas estructuras fraccionales: CRONE 3 desacoplado y términos complejos fraccionales.
- Desarrollo de herramienta software.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.

Vías futuras

- Profundizar estudio implementación de fraccionales; en particular, implementación digital directa, ¿multimuestreo?
- Integrar balance alta/baja frecuencias en problema optimización QFT; investigar heurísticas para maximizar ARN.
- Elaboración de toolbox completo de diseño en QFT.
- Profundizar estudio criterios guía de función objetivo evolucionaria; función objetivo adaptativa.
- Desarrollar heurísticas, concretables en reglas de reparametrización, para fase no mínima.
- Investigar nuevas técnicas de optimización (no evolucionarias) para diseño con estructuras fraccionales.