

# Control PID Robusto de Sistemas de Fase no Mínima Combinando QFT y GSA: Aplicación al Control Carga- Frecuencia

Patricia N. Baldini<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Departamento de Electrónica, Facultad Regional Bahía Blanca,  
Universidad Tecnológica Nacional, 11 de abril 461, Bahía Blanca, Argentina  
pnbaldi@frbb.utn.edu.ar

**Abstract.** En este trabajo se presenta una metodología que automatiza la sintonización de un controlador robusto de estructura fija aplicable a sistemas de fase no mínima con parámetros variables. El diseño se realiza en el dominio de la frecuencia mediante un procedimiento de *loop shaping* que combina el algoritmo de optimización heurística de búsqueda gravitacional con la Teoría de Realimentación Cuantitativa. El procedimiento implica una optimización multiobjetivo, con restricciones, ya que se busca lograr un buen compromiso entre respuesta dinámica, estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones con mínimo esfuerzo de control. El controlador adoptado es del tipo proporcional-integrativo-derivativo (PID) por su difundido uso industrial. El algoritmo seleccionado resulta de fácil comprensión e implementación, con buena eficiencia computacional y características de convergencia estable. La eficacia del método propuesto se comprueba mediante simulación para la regulación de frecuencia de un área de sistema de generación de potencia hidroeléctrica.

**Keywords:** Optimización Heurística, GSA, Control PID, Sistemas de fase no-mínima, control robusto, QFT.

## 1 Introduction

Los sistemas denominados de fase no mínima (FNM) por la característica dominante de su respuesta en frecuencia, se modelan en el dominio de Laplace mediante Funciones Tránsito que presentan ceros en el semiplano derecho. Estos ceros originan limitaciones en las características de la dinámica alcanzable con el control de la planta e imponen compromisos de diseño que son independientes del tipo de controlador de orden entero adoptado. La complejidad se incrementa cuando los parámetros del sistema son no estacionarios o inciertos. Como consecuencia, resulta un desafío lograr un diseño que consiga el mejor desempeño teniendo en cuenta las restricciones estructurales.

El objetivo del control es el de cumplir en forma simultánea con un conjunto de especificaciones de comportamiento temporal, cualquiera sea el valor de los parámetros inciertos variables dentro de un rango finito que se incluyen en el modelo como incertidumbre paramétrica.

En estos casos, por la complejidad del problema que resulta altamente no lineal con un espacio factible de soluciones no convexo, las técnicas de optimización tradicionales no resultan aplicables para la sintonización eficiente de un controlador predeterminado. Una alternativa que ha demostrado ser efectiva y de uso cada vez más frecuente, la representan los métodos heurísticos de optimización, de búsqueda inteligente.

En este trabajo se propone la utilización del algoritmo estocástico, inspirado en la física, conocido como búsqueda gravitacional (GSA) para la determinación automática de los parámetros del controlador para SFNM. La función objetivo a minimizar y las restricciones de estabilidad se plantean de acuerdo a la Teoría de Realimentación Cuantitativa (QFT) para garantizar un diseño robusto [1],[2]. El objetivo que propone QFT es la síntesis de un controlador lo más simple posible, que satisfaga las especificaciones con el menor costo de realimentación y teniendo en cuenta la incertidumbre del modelo. Mediante el algoritmo de GSA se automatiza la etapa denominada *loop shaping*, es decir, la determinación sin sobrediseño de los parámetros del controlador en el dominio de la frecuencia. Esto permite lograr las mayores prestaciones del controlador sin aumentar su complejidad.

El algoritmo GSA [3] ha sido elegido debido a la simplicidad para su comprensión e implementación y la característica de crecimiento lineal del tiempo de procesamiento con respecto a las dimensiones del problema. Por otro lado, la convergencia ha sido comprobada teóricamente [4]-[6] y se ha verificado una buena capacidad de exploración del espacio de búsqueda y de encontrar soluciones óptimas [7],[8] contando con la ventaja adicional de un reducido número de parámetros de ajuste. Por otra parte, numerosos estudios experimentales sugieren que permite conseguir iguales o mejores resultados en términos de tiempo de procesamiento, calidad de la solución, recursos de cómputo y convergencia, que otros algoritmos de igual filosofía [9]-[11].

La metodología QFT fue seleccionada siguiendo el criterio de mantener la claridad, simplicidad y versatilidad del procedimiento de diseño. El método de diseño reportado por algunos autores, basado en la resolución de un problema equivalente de fase mínima [12], [13], se considera una complicación de cálculo actualmente innecesaria debido a que las restricciones impuestas por los sistemas de FNM son estructurales y a la efectividad de los algoritmos heurísticos disponibles.

Los controladores con acción proporcional-integrativa-derivativa (PID) son los de mayor aplicación industrial. Esto se debe a que, a pesar de su simplicidad, permiten resolver satisfactoriamente una gran variedad de problemas complejos cuando está sintonizado apropiadamente [14].

El método presentado se aplica al diseño del regulador de frecuencia para un área de un sistema de generación de potencia hidroeléctrica. El comportamiento de estos sistemas es inherentemente de FNM por efecto de la inercia del agua. El objetivo final, desde el punto de vista de la teoría de control, es lograr en cada área el balance entre la potencia generada y la demanda, de modo de mantener la frecuencia y el intercambio de potencia entre áreas en sus valores nominales. La dinámica no-lineal, no-estacionaria y las variaciones permanentes y aleatorias características de la carga hacen que el desarrollo de técnicas de control eficientes sea todavía un problema de interés para garantizar la calidad del servicio y la protección del sistema. Los resultados obtenidos y la robustez se comprueban mediante simulación.

## 2 Descripción del Problema

El diseño de sistemas de fase no mínima es siempre una tarea compleja debido a que este tipo de plantas imponen limitaciones estructurales en el diseño. Las características dinámicas alcanzables quedan restringidas por la naturaleza de la planta, independientemente del tipo de controlador a usar. Estas restricciones estructurales se manifiestan en la respuesta temporal a entradas de tipo escalón por un comportamiento inicial típico en sentido opuesto al de la entrada. El consecuente *undershoot* se caracteriza por una amplitud que varía en forma inversa al tiempo de respuesta. Para reducir el *undershoot* la acción de control deberá ser tanto más lenta cuanto más significativo sea el comportamiento de fase no mínima (ceros positivos de menor valor). Por otro lado, en el dominio de la frecuencia se ven reducidos tanto el margen de ganancia como el ancho de banda posibles para el sistema. De modo que resulta un desafío lograr un diseño que permita el mejor comportamiento dinámico sobre todo cuando se añade la complejidad de parámetros variables con las condiciones de operación [12].

Estas variaciones son incorporadas en el modelo como incertidumbre paramétrica, de modo que determinan una familia de FTs. El diseño se resuelve automatizando el procedimiento de *loop shaping* sobre la FT nominal, como un problema de optimización basado en GSA, donde la función objetivo y las restricciones de estabilidad se plantean en el marco de QFT para garantizar robustez.

### 2.1 Conceptos Básicos sobre GSA

El algoritmo de búsqueda gravitacional es un método estocástico de búsqueda inteligente basado en las leyes físicas de gravedad y movimiento de Newton, introducido por Rashedi *et al.* [3]. Se trata de realizar una búsqueda eficiente en el espacio  $D$ -dimensional de soluciones factibles, mediante partículas de masa variable cuyas posiciones representan un conjunto posible de parámetros del controlador que se desea sintonizar. Las partículas se mueven por efecto de fuerzas de atracción de tipo gravitacionales. Los desplazamientos se producen en direcciones que tienen en cuenta la mejor y la peor solución global en cada iteración, en el intento de encontrar la óptima. La masa de cada agente varía según el grado de éxito obtenido en la búsqueda, de modo que las fuerzas provocan un movimiento del conjunto hacia las partículas con mayor suceso y, por lo tanto, de mayores masas. Para lograr un buen balance entre exploración y explotación solo el subgrupo de  $N_{best}$  agentes con mayor masa ejercen fuerzas sobre los otros. Las masas inerciales y gravitacionales se presuponen iguales.

Las expresiones de actualización de posiciones  $\mathbf{X}_k^i = [x_k^{i1} \ x_k^{i2} \ \dots \ x_k^{in} \ \dots \ x_k^{iD}]^T$ , y velocidades  $\mathbf{V}_k^i = [v_k^{i1} \ v_k^{i2} \ \dots \ v_k^{in} \ \dots \ v_k^{iD}]^T$  de cada partícula  $i$  de las  $N$  de la población, en la  $k$ -ésima iteración, son las siguientes:

$$\mathbf{V}_{k+1}^i = R_l \mathbf{V}_k^i + \mathbf{a}_k^i, \quad (1)$$

$$\mathbf{X}_{k+1}^i = \mathbf{X}_k^i + \mathbf{V}_k^i. \quad (2)$$

Fuerzas  $\mathbf{F}^i$ , masas  $M^i$  y aceleraciones se calculan en cada iteración según :

$$M_k^i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N m_k^j} \left( \frac{f_k^i(\mathbf{X}_k^i) - f_{worst\ k}}{f_{best\ k} - f_{worst\ k}} \right), \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_k^i = \sum_{\substack{j \in N_{best} \\ j \neq i}}^N R_2 G_k M_k^j M_k^i \frac{(\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i)}{\|\mathbf{X}_k^j - \mathbf{X}_k^i\|_2 + \epsilon}, \quad (4)$$

$$\mathbf{d}_k^i = \frac{\mathbf{F}_k^i}{M_k^i}. \quad (5)$$

donde:  $1 \leq i \leq N$ ;  $R_1, R_2$  son factores de peso aleatorios con distribución uniforme en el intervalo  $[0,1]$ ,  $G_k = G_0 e^{-(\beta k/k_{max})}$  es la gravedad,  $G_0$  y  $\beta$  son parámetros de ajuste del método,  $\epsilon \ll 1$  es un factor de seguridad,  $f$  es el valor de la función objetivo correspondiente,  $f_{best\ k} = \min_{1 \leq j \leq N} f(\mathbf{X}_k^j)$  y  $f_{worst\ k} = \max_{1 \leq j \leq N} f(\mathbf{X}_k^j)$  representan el mejor y el peor valor de la función objetivo del conjunto.

### 3 Optimización Multiobjetivo Mediante GSA en el Marco de QFT

La estructura del control adoptada es la de realimentación con dos posibles grados de libertad, según la figura.

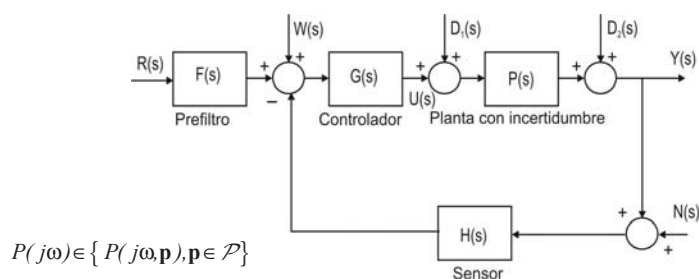


Fig. 1: Esquemas del sistema de control

En esta configuración, basada en el modelo complejo de FT,  $R$  es la señal de referencia,  $Y$  es la variable controlada,  $P(s)$  y  $H(s)$  representan la planta y la dinámica del sensor, respectivamente. Los procesos dinámicos  $W$ ,  $D_1$  y  $D_2$  modelan perturbaciones y  $N$  representa el ruido de sensor.

La estructura general del controlador a considerar incluye términos proporcional, integrativo y derivativo, PID, al que se le incorpora un polo de alta frecuencia para evitar amplificación de ruido. Su FT resulta:

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{s K_d}{s \frac{K_d}{T} + 1} \quad (6)$$

El problema de optimización en el marco de QFT provee una técnica eficiente de diseño robusto con objetivos múltiples en el dominio de la frecuencia. Los parámetros de la planta  $P(s)$  que no pueden determinarse en forma precisa definen, dentro del espacio de incertidumbre, una región que la cuantifica,  $\Theta$ , y una familia de FTs asociada. Para la planta, su *template* es definido como el conjunto de respuestas en frecuencia posibles asociadas al subespacio  $\Theta$ ,  $\{P(j\omega, \theta), \theta \in \Theta\}$ . Una FT de la familia,  $P_\theta(j\omega)$ , se adopta como modelo nominal y se utiliza como base para el diseño. Las especificaciones de comportamiento robusto para el rango de frecuencias de operación, se expresan analíticamente mediante restricciones sobre el módulo de las FTs que relacionan las distintas variables del lazo [1],[2]. Estas restricciones se representan como regiones admisibles para la función de lazo abierto nominal buscada,  $L_\theta(j\omega) = G(j\omega) P_\theta(j\omega) H_\theta(j\omega)$ , en un plano módulo-fase conocido como carta de Nichols. Los límites de estas regiones, cada frecuencia de trabajo ( $\omega \in \Omega$ ), quedan definidos por un conjunto de curvas denominadas *bounds* que incluyen la incertidumbre.

El diseño consiste en determinar un controlador,  $G(j\omega)$ , tal que  $L_\theta(j\omega)$  satisfaga las restricciones establecidas por los *bounds* lo más ajustadamente posible para evitar el sobrediseño, manteniendo la ganancia de alta frecuencia lo menor posible. Si esto se logra, se garantiza que también lo harán todas las funciones correspondientes al *template*. Esto implica un proceso de optimización en un espacio no convexo, con objetivos múltiples y restricciones, con más de una solución posible. En este proceso, los *bounds* se calculan al inicio y se mantienen constantes durante las iteraciones.

**Tabla 1.** Especificaciones en el Diseño Robusto con QFT.

Especificación	Restricción
Estabilidad Robusta	$\left  \frac{L(j\omega+\theta)}{1+L(j\omega+\theta)} \right  \leq \delta_1, \omega \in \Omega_1$
Rechazo de perturbaciones $D_1$	$\left  \frac{P(j\omega+\theta)}{1+L(j\omega+\theta)} \right  \leq \delta_2(\omega), \omega \in \Omega_2$
Restricción sobre el esfuerzo de control	$\left  \frac{G(j\omega)}{1+L(j\omega+\theta)} \right  \leq \delta_M(\omega), \omega \in \Omega_3$

La dimensión del espacio paramétrico es  $D = 4$  y la posición de la partícula  $i$ -ésima,  $\mathbf{X}_i = [K \ T_i \ T_d \ T]^T$ , es un vector de parámetros posibles. La función a minimizar o función objetivo incluye propiedades de estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones y reducción del costo de realimentación, según la Tabla 1. Su expresión resulta:

$$f(\mathbf{X}) = \gamma_1 20 \log(K_{HF}) + \gamma_2 \sum_{k=1}^{n_f} f_{bnd}(\omega_k) + \gamma_3 \sum_{k=n_{LIM}}^{n_f} f_{UHF}(\omega_k) \tag{7}$$

$$f_{bnd}(\omega_k) = d_k \quad , \quad k = 1, 2, \dots, n_f \quad , \quad f_{UHF}(\omega_k) = d_{Lk} \delta \quad ,$$

$$k = n_{lim}, n_{lim} + 1, \dots, n_f \quad \delta = \begin{cases} 0 & \text{si se cumple con la condición} \\ 1 & \text{si no se cumple} \end{cases}$$

donde  $d_k$  y  $d_{Lk}$  denotan las distancias entre la función transferencia de lazo abierto nominal,  $L_0(j\omega_k)$ , y el *bound* correspondiente a  $\omega_k$ , y entre esa función y el denominado *bound* de alta para frecuencia universal (UHB), para  $\omega_k \geq \omega_{Lim}$  ( $k \geq k_{lim}$ ), respectivamente. Esta condición garantiza un buen comportamiento a alta frecuencia.  $K_{HF}$  es la ganancia de alta frecuencia o costo de realimentación. Para una diferencia  $r$  entre polos y ceros de  $L(s)$ , esta ganancia se define como

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} |L(j\omega)| \approx \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{K_{HF}}{\omega^r}. \quad (8)$$

Las constantes  $\gamma_i$  son factores de peso y  $n_f$  es el número de frecuencias consideradas dentro del rango de trabajo obtenido a partir de la respuesta en frecuencia del sistema. Se incluyen una condición de módulo decreciente y una restricción,  $g_1$ , que garantiza la estabilidad durante el proceso. Teniendo en cuenta que un sistema lineal e invariante en el tiempo es estable si las raíces de su polinomio característico ( $L_0(p_i) + 1 = 0$ ), son reales y negativas

$$g_1(\mathbf{X}) = \max_{1 \leq i \leq m+2-r} (Re(p_i), 0) \leq 0 \quad (9)$$

El tratamiento de las restricciones y los límites de búsqueda se realiza mediante el método de penalización y el criterio para la convergencia tiene en cuenta la invarianza del mejor valor de la función objetivo, dentro de la tolerancia considerada, durante un número determinado de iteraciones.

## 4 Regulación de Frecuencia en Sistemas de Potencia

El control de frecuencia es un mecanismo fundamental de los sistemas de generación de potencia eléctrica que contribuye a mantener el balance entre la potencia generada y la demanda en cada área de control. En estos sistemas se debe asegurar que la frecuencia y el intercambio de potencia eléctrica entre áreas se mantengan dentro de límites aceptables, de forma tal que los consumos abastecidos tengan una buena calidad de suministro eléctrico. Esto se ha resuelto normalmente mediante la aplicación de técnicas tradicionales de control, a menudo eficaces, pero no necesariamente eficientes [15]. Considerando el desarrollo de potentes técnicas de control de sistemas y el gran avance de la electrónica de los últimos años, resulta interesante investigar estrategias que maximicen la calidad del control [16]-[19].

En particular, en el caso de potencia hidroeléctrica, el sistema resulta de fase no mínima pues, por efecto de la inercia del agua: una variación en la apertura de la compuerta produce un efecto inicial contrario en la presión a través de la turbina y, en consecuencia, en la potencia mecánica, antes de conseguirse el resultado esperado.

### 4.1 Modelo Dinámico y Especificaciones

El modelo del sistema de potencia para estudios de regulación carga-frecuencia está integrado por el sistema gobernador, la turbina, la carga y el generador, como se

muestra esquemáticamente en la Fig. 2.

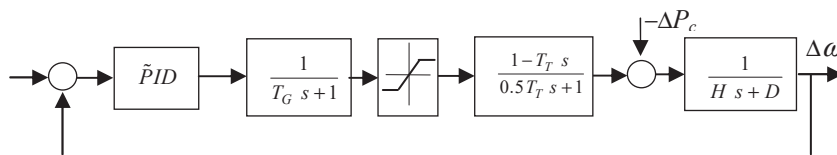


Fig. 2 : Diagrama en bloques con FT de cada componente y controlador

El objetivo desde el punto de vista de control es modificar la posición de la compuerta para regular el flujo de agua a presión a través de la turbina, y por lo tanto controlar la potencia del generador, independientemente de las variaciones de carga que resultan aleatorias e impredecibles. Estas variaciones naturales presentan valores generalmente pequeños en comparación con la capacidad del sistema, de modo que es razonable el uso de modelos linealizados alrededor del punto de operación para diseñar el sistema de control. Las limitaciones físicas tales como restricciones en la tasa de generación (GRC) deben ser tenidas en cuenta para evitar inestabilidad. Los cambios bruscos en la demanda de potencia se incorporan al modelo como perturbaciones de tipo escalón.

Siguiendo la referencia [17] se adoptó el modelo de turbina linealizado despreciando la fricción hidráulica. Como se trata de un sistema de regulación, se consideraron especificaciones de estabilidad robusta, rechazo de perturbaciones a la entrada del generador, costo de realimentación y características de módulo decreciente. La constante de *droop* o estatismo,  $R=20$ , se incluye en el controlador, de modo que  $K_{p\text{final}} = K_p - 1/R$ .

Según la Tabla 1, con  $H_o(j\omega) = 1$  y  $M(j\omega\theta)$  la FT del grupo generador-carga:

$$\Omega_1 = \{\omega: 0.01 \leq \omega \leq 20\}, \quad \Omega_2 = \{\omega \in \Omega_1 : \omega \geq \omega_{\text{LIM}} = 5\}, \quad (10)$$

$$\left| \frac{L(j\omega\theta)}{1+L(j\omega\theta)} \right| < 1.2, \quad \left| \frac{\Delta\omega}{\Delta P_m} \right| = \left| \frac{M(j\omega\theta)}{1+L(j\omega\theta)} \right| < 0.4 \left| \frac{j\omega}{(j\omega)^2 + 0.4j\omega + 0.035} \right|.$$

Los parámetros del modelo son: la constante de tiempo del agua asociada a la turbina,  $T_T$ , el factor de amortiguamiento y la inercia del conjunto generador-carga,  $D$  y  $H$ , respectivamente, y la constante de tiempo del gobernador,  $T_G$ . Los rangos de variación, en unidades relativas, p.u., fueron:  $2 \leq T_T \leq 4$ ,  $2.5 \leq H \leq 6$ ,  $1 \leq D \leq 1.5$ ,  $T_G = 0.2$ , [17]-[19].

Los parámetros de GSA adoptados fueron [8]: tamaño de la población,  $N=20$ ,  $\alpha=20$ ,  $G_0=100$ . El número de iteraciones promedio para la convergencia resultó de 50 para una tolerancia de  $10^{-5}$ .

Los parámetros del controlador resultantes fueron  $PID = [K_p \ K_i \ K_d \ T]^T = [0.889 \ 0.062 \ 0.989 \ 98.9]^T$ ;  $K_{p\text{final}} = -18.892$  para  $R=0.05$ ; los márgenes de fase y ganancia y la frecuencia de cruce:  $MF=90.6^\circ$ ,  $MG=11.4$  dB,  $\omega_0=0.085$  rad/seg.

En la Fig. 3 (a) los *templates* muestran el grado de dispersión en las respuestas en frecuencia de lazo abierto nominal producto de la incertidumbre, y en (b) la respuesta en frecuencia sin el controlador y después del diseño, sobre el conjunto de *bounds*

mostrando la eficiencia del *loop shaping*.

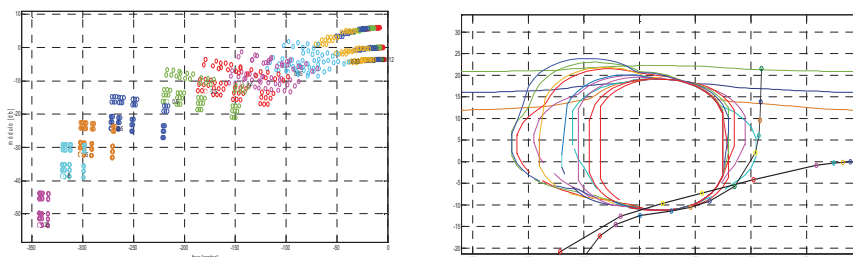


Fig. 3: a) *Templates* b) *Bounds y Respuesta en frecuencia nominal*

En las Fig. 4 y 5 se observan las respuestas temporales producida por una variación de la carga  $\Delta P_C = 0.02$  en p.u. de la frecuencia  $\Delta\omega$ , de la salida del gobernador y de la señal de control  $u$ . Se muestran los resultados para los peores casos de operación o casos extremos, y para el considerado como nominal.

Puede verse que se cumplen las especificaciones, manteniendo valores bajos de la energía de control y evitando problemas con la tasa de generación (GRC).

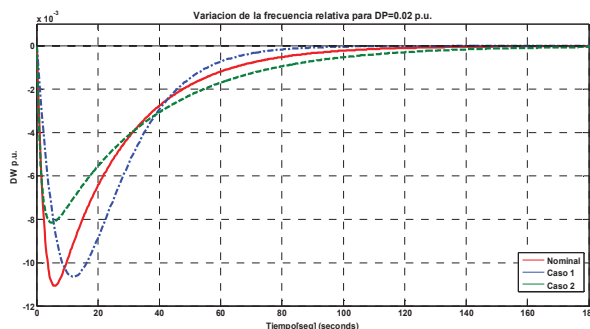


Fig. 4: Variación temporal de la frecuencia angular relativa para los peores casos y el nominal

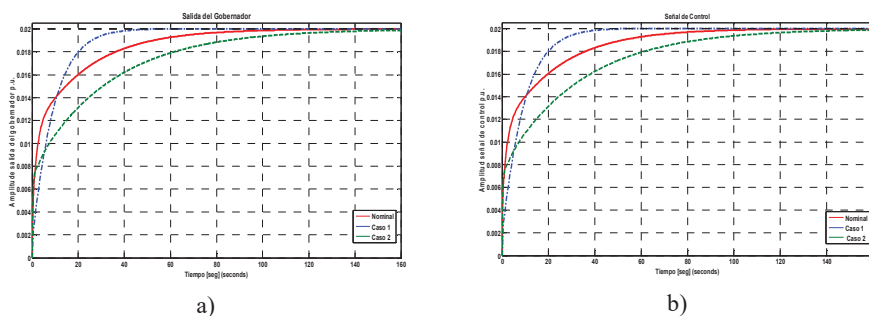


Fig. 5: Variaciones temporales para los peores casos y el nominal de a) la salida del gobernador b) la señal de control.



## 5 Conclusiones

En este trabajo se propuso una metodología robusta de diseño de controladores PID para sistemas de fase no mínima con parámetros inciertos. Se integran la Teoría de Realimentación Cuantitativa con el algoritmo de optimización heurística GSA para automatizar la sintonización del controlador. Esta combinación permite obtener las mejores prestaciones del controlador adoptado, cumpliendo las especificaciones de diseño aún en los peores casos determinados por la incertidumbre, sin necesidad de modificar la estructura *online*. El algoritmo de optimización heurística converge a una de las posibles soluciones óptimas con una dispersión aceptable medida por la varianza del valor de convergencia del vector de parámetros. La aplicación a un esquema de regulación carga-frecuencia de sistemas de potencia hidroeléctrica condujo a buenos resultados frente a las variaciones de carga y los consecuentes cambios de las condiciones de operación. Se verifica la flexibilidad de los controladores PID para cumplir especificaciones múltiples en sistemas complejos. El comportamiento fue verificado por simulación. La comparación con resultados publicados [17]-[19] permite confirmar la efectividad de la metodología propuesta que puede fácilmente ser extendida a otro tipo de controladores o de especificaciones. Actualmente se está trabajando en la aplicación de esta metodología para el control descentralizado de áreas interconectadas de sistemas de generación de potencia.

## References

1. Houpis, H., Rasmussen, S., García Sanz, M.: Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications. 2da. Ed, CRC Press, Florida (2006)
2. García Sanz, M.: Quantitative Robust Control Engineering: Theory and Applications. RTO-En-SCI- vol.166, pp. 1-44 (2006)
3. Rashedi, E.; Nezamabadi-pour, H.; Saryazdi, S.: GSA: A Gravitational Search Algorithm. Information Sciences, vol. 179, pp. 2232-2248 (2009)
4. Ghorbani F., Nezamabadi, H., On the Convergence Analysis of Gravitational Search Algorithm, Journal of Advances in Computer Research, vol.3, no.2, pp. 45-51,(2012)
5. Tian, D.P.: A Review of Convergence Analysis of Particle Swarm Optimization. Int. Jou. Grid and Distributed Computing, vol.6, no.6, pp.117-128 (2013)
6. Sabir, N.M.; Puteh, M.; Mahmood, M. R.: A Review of Gravitational Search Algorithm. Int. J. Advance. Soft Comput. Appl., vol. 5, no. 3, pp. 1-38 (2013).
7. Kumar, Y., Sahoo, G.: A Review on Gravitational Search Algorithm and its Applications to Data Clustering & Classification, Int. Jou. on Intelligent Systems and Applications, vol. 6, pp.79-93, (2014)
8. Eldos, T., Al Qasim, R.: On The Performance of the Gravitational Search Algorithm (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 4, No. 8, (2013)
9. Wang, J-S., Song, J-D.: Function Optimization and Parameter Performance Analysis Based on Gravitation Search Algorithm, Algorithms, vol. 9, 3 (2016)
10. Can, U., Alatas, B.: Physics Based Metaheuristic Algorithms for Global Optimization American Journal of Information Science and Computer Engineering, vol. 1, No. 3, pp. 94-106, (2015)

- 11.Chen, W.H.y Balance, D.J.: QFT Design for Uncertain Non-minimum Phase and Unstable Plants Revisited. *Int. Journal on Control*, vol. 4, no. 9 (2001)
- 12.Khodabakhshian, A., Rahimi, H., Golbon, N.: QFT for Load Frequency Control of Non-Minimum Phase Hydro Power Plant. En: *proceeding of Int. Conference on Control Applications*, Munich, IEEE Press. (2006)
- 13.Ämtrom, K.; Hågglund, T.: *Control PID Avanzado*. Prentice Hall, Madrid (2009)
- 14.Kundur, P.: *Power Systems Stability and Control*. Cap. 9.1 y 11.1, McGraw Hill, NY(1994)
- 15.Hussein, T.: A Genetic Algorithm for Optimum Design of PID Controller in Load Frequency Control. *W. Academy of Science, Eng. and Tech.*, vol.70, pp. 956-960 (2012)
- 16.Kishor, N., Singh, S.P. y Raghuvanshi, A.S.: Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control. En: *Conversion and Manag.*, vol.47, pp.3119-3137,(2006)
- 17.Khodabakhshian, A., Golbon, N.: Robust Load Frequency Controller Design for Hydro Power Systems. En: *Proc. Int. Conf. on Control Application*, Toronto, Canada, IEEE Press (2005)
- 18.Meng, L., Diao, F.: QFT Fractional Order Controller for Non-minimum Phase Hydro Power Plant. En: *Proc. of the 31<sup>st</sup> Chinese Control Conference*, Hefei, China, pp.2743-2748 (2012)
- 19.Satpati, B., Bandyopadhyay, I., Das, G., Koley, C.: Robust controller design for load frequency control of non-minimum phase Hydro power plant using PSO enabled automated Quantitative Feedback Theory. En: *Proc. India Conference. INDICON 2008*. IEEE Press, Kanpur, pp. 349 - 354 (2008)