

# CONTROL PID CONMUTABLE TOLERANTE A FALLAS

Marino Sánchez-Parra\* Cristina Verde\*\* Dionisio A. Suárez-Cerda\*

\*Instituto de Investigaciones Eléctricas A.P. 1-475 Cuernavaca, Morelos, 062001 México  
[msanchez@iie.org.mx](mailto:msanchez@iie.org.mx), Tel. +52-777-3623811 ext. 7721/ Fax: ext.2100

\*\*Instituto de Ingeniería, UNAM, 04510, DF México

*Resumen*— Se presenta un esquema conmutable de control tolerante a fallas basado en controladores PID que contiene un sistema de detección y aislamiento de fallas. Se adopta como caso de estudio una falla mecánica crítica de un turbogenerador a gas. Seleccionándose controladores PID por ser los más utilizados en la industria y que resultan ser adecuados. Por lo que se describe la metodología propuesta por Keel & Bhattacharyya para la sintonización de PIDs que utiliza modelos LTI. Considerándose una falla específica se obtiene un PID definido con la metodología propuesta obteniéndose respuesta oscilatoria. Después se presenta y aplica una técnica para realizar el ajuste fino del controlador que satisface requerimientos de desempeño, verificándose primero con la respuesta a escalón y después evaluando mediante simulación realizada con el modelo de comportamiento. Finalmente se analiza la estabilidad de las plantas falladas, en el contexto de sistemas conmutados, o sistemas híbridos según Liberzon & Morse, mostrándose que la conmutación entre las plantas es estable.

Palabras clave: Control tolerante a fallas, controlador PID, conmutación, modelos múltiple, estabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos físicos automatizados son vulnerables a fallas en actuadores, lecturas erróneas de sensores, desgastes mecánicos originados por uso continuo y en algunos casos fatigas térmicas de sus componentes. Particularmente, en procesos críticos como los turbogeneradores a gas y vapor, que funcionan sometidos a condiciones extremas y rigurosas de operación, la eventual aparición de alguna falla de origen mecánico puede originar desde la disminución de eficiencia y falta de confiabilidad, hasta suspensión de la operación por daños severos o un completo desastre. Por lo que el diseñar sistemas de control tolerantes a fallas (SCTF) para operar procesos físicos críticos caracterizados por ambientes estrictos, expuestos a fallas significativas, es una tarea imperativa para operar con seguridad y eficiencia, manteniendo al mismo tiempo los índices de operación requeridos: rentabilidad, confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (Fruttschi, 1999).

Un controlador tolerante a fallas debe tener la capacidad de ser sintonizado fuera de línea considerando el tipo de falla para la que fue diseñado, garantizando estabilidad y desempeño adecuado, con capacidad de mejorar la respuesta transitoria posterior a la falla. A fin de lograr lo anterior, en el trabajo se considera que el estudio de los sistemas lineales provee los fundamentos teóricos necesarios para este enfoque. También se considera la manera en la que estos conceptos son aplicables al control de sistemas no lineales usando controladores industriales PID.

Se considera que para lograr un sistema de control robusto, este debe realizar el seguimiento de referencias y rechazo a determinadas clases de perturbaciones en presencia de varias clases de incertidumbres y cambios en las características dinámicas de la planta (Keel & Bhattacharyya, 2005), (Datta et al., 2000), mientras que para lograr que el sistema sea

tolerante a fallas estas deberán ser detectadas e identificadas oportunamente (Blanke et al., 2003), (Isermann, 2006), (Ding, 2008). Para lograr lo anterior es necesario activar un mecanismo de reconfiguración capaz de actualizar referencias y sintonizar al controlador como lo señalan (Zhang & Jiang, 2006).

En relación al tipo de control, (Knospe, 2006) menciona que los tres términos del PID son suficientes para parametrizar una estructura que permite el control exitoso de muchos procesos industriales y otros expertos en el tema de control PID, como (Li et al, 2006a) y (Quevedo y Escobet, 2000) opinan que la funcionalidad de tres términos del control PID permite manejar adecuadamente comportamientos transitorios y en estado estacionario, proporcionando solución eficiente a problemas prácticos. También es necesario considerar que, a pesar de existir numerosos procedimientos para ajustar controladores industriales (IEEE, 2006), “se ha identificado la carencia de una técnica de ajuste de controladores PID en el contexto de tolerancia a fallas”. *Este hecho abre una oportunidad para desarrollar mecanismos de ajuste de los PIDs con capacidad de sintonía ante fallas.* En particular dado que en condiciones de falla la seguridad es la especificación de mayor prioridad, el punto de partida debe ser el diseño de controladores robustos que garanticen la estabilidad del sistema conmutado ante fallas del proceso.

## 2. CONTROL TOLERANTE A FALLAS

Durante la evolución del CTF han sido propuestos algunos esquemas relevantes que involucran múltiples modelos de plantas falladas y controladores múltiples, como los realizados por (Narendra et al, 1995) y (Rauch, 1995). El primero es un esquema adaptable de identificación de N plantas aparejadas con N controladores, donde la conmutación para seleccionar un controlador es coordinada

por modelos de error. Mientras que el concepto de *modelos múltiples* de (Rauch,1995) es equivalente al de “plantas falladas” (plantas diferentes) ó familia de  $n+1$  plantas: en donde la planta 1 corresponde al caso nominal (sin falla) y  $n$  plantas restantes son los casos de falla con diferentes intensidades. En este enfoque, un modelo representa la planta en carga-base (sin falla) ó *planta nominal*, y cada uno de los otros modelos representa a una falla particular. El modelo inicial se basa en información primaria basada en la estructura del sistema y parámetros. En los dos enfoques, el CTF también debe incluir un elemento de decisión que reconoce cuando ha ocurrido una falla y active la reconfiguración.

Otro esquema de CTF desarrollado por (Zhang & Jiang, 2006) define al elemento de decisión como un sistema de detección y diagnóstico (SDD) que comanda acciones adaptables de control reconfigurable capaces de responder en tiempo-real a la ocurrencia de fallas del sistema en línea en un intento de mantener la estabilidad y el desempeño.

En este trabajo se emplean modelos múltiples de plantas SISO linealizadas en torno al punto de equilibrio deseado en el cual el proceso es más eficiente, llamado estado estacionario de carga-base EE-CB. Por lo que primero se debe obtener el modelo lineal del punto de equilibrio, o *planta nominal*  $P_0$ ; a partir de este estado de equilibrio se considera la ocurrencia de una falla específica  $f^k$ , donde  $k$  es el tipo de falla del proceso, que modifica a  $P_0$  afectando a la variable de salida, conmutando la planta nominal a un estado fallado dado por  $P_{f_i}^k$ , donde  $i = 1, \dots, n$  indica diferentes intensidades de la falla  $k$ .

### 3. ESQUEMA DE CONTROL TOLERANTE A FALLAS

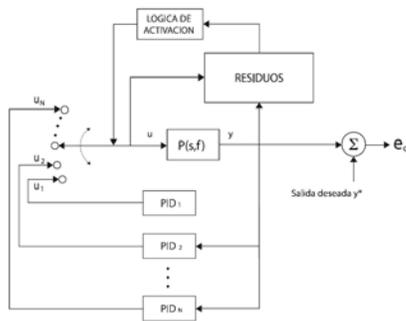


Fig. 1 Esquema de CTF con PIDs.

En este artículo se propone el esquema de la Fig. 1 para diseñar un sistema de CTF para ciertas clases de fallas parametrizadas, asumiéndose que las plantas falladas son descritas por modelos lineales LTI. Otros elementos que aparecen en la estructura propuesta son: el generador de residuos del subsistema de detección y aislamiento de fallas FDI, la lógica de activación/reconfiguración y familias de controladores PID estabilizantes. Resumiendo, el subsistema FDI realiza la detección y aislamiento de la falla mediante la firma de residuos, e identifica el modelo de la planta fallada, activando una lógica de reconfiguración que selecciona el

PID-i adecuado. Los PIDs son sintonizados fuera de línea aplicando una técnica del estado del arte de control robusto que garantiza la estabilidad del lazo después del acomodamiento de la falla. En las siguientes subsecciones se describe con mayor detalle como son ajustados el PID y el esquema de CTF.

#### 3.1 Diseño de PIDs estabilizantes

Para obtener controladores que establezcan una planta se utiliza la técnica mostrada en (Datta et al, 2000) que usa sistemas LTI. En esta línea de investigación (Keel y Bhattacharyya, 2008) desarrollaron un método para calcular la familia completa de controladores PID que estabilizan un proceso físico basado en modelos de respuesta en frecuencia  $P(j\omega), \omega \in [0, \infty)$ .

Considérese que ambos, el controlador PID y la planta están caracterizados por conjuntos de funciones de transferencia. Entonces sea  $P$  el conjunto de  $m$  plantas LTI falladas

$$P = \{P_{f_1}, P_{f_2}, \dots, P_{f_m}\} \quad (1)$$

Donde  $P_{f_i} = P(s, f_i), i = 1, \dots, m$ , denota la función de transferencia de la planta con falla  $f_i$ . Sea

$$C_i(s) := PID_i(k_p, k_i, k_d) = k_p + k_i/s + k_d s \quad (2)$$

La función de transferencia de la familia de controladores PIDs estabilizantes para la planta  $P_{f_i}$ , donde  $k_p$  corresponde al intervalo de la ganancia proporcional,  $k_i$  es el intervalo de ganancia integral, y  $k_d$  es el intervalo de ganancia derivativa. Esta estructura permite asociar una familia de controladores estabilizantes  $C_i$  a cada planta fallada  $P_{f_i}$ :

$$C_1 \rightarrow P_{f_1}, C_2 \rightarrow P_{f_2}, \dots, C_m \rightarrow P_{f_m}$$

En este emparejamiento se tiene libertad para seleccionar el controlador  $C_i^*$  de la familia  $C_i$  de acuerdo al desempeño específico de cada  $P_{f_i}$ . Como la asociación de plantas y PIDs genera una gran cantidad de controladores para múltiples fallas, es necesario reducir el número de PIDs. Entonces se considera que cada familia  $C_i$  define una región en el espacio de parámetros  $\mathbb{R}^3$ , por lo que una intersección de regiones representa una familia de controladores capaz de estabilizar a más de una planta fallada. Es decir, si

$$C_i \cap C_j \neq \emptyset \exists C_{ij} \quad (3)$$

Donde  $C_{ij}$  es una familia de traslape que estabiliza a  $P_{f_i}$  y  $P_{f_j}$  simultáneamente. Entonces cualquier selección de un controlador  $C_i^* = C_j^*$  en la región de traslape garantiza la estabilidad de ambas plantas. Además si del intervalo estabilizante de la ganancia proporcional se selecciona un valor para  $k_p$ , entonces es posible obtener una superficie de traslape definida por  $k_d$  vs  $k_i$  para  $k_p = c$ . El uso recursivo de la condición (3) reduce el número de controladores en el esquema de CTF. El caso límite puede darse si existe una región de traslape de todo el conjunto de plantas falladas  $P$ . Usando la condición (3) se puede encontrar la familia de PIDs denotada por  $C_{\hat{P}_i}$  capaz de estabilizar simultáneamente a todo el subconjunto de plantas falladas

$$\hat{P}_i = \{P_{f_i}, P_{f_j}, \dots\} \subset P$$

Entonces el conjunto  $\{C_{\hat{P}_1}, C_{\hat{P}_2}, \dots, C_{\hat{P}_k}\}$  caracteriza el mínimo número de controladores  $k$  que estabilizan todas  $P$ . Es posible seleccionar arbitrariamente cualquier  $C_{\hat{P}_i}^a \subset C_{\hat{P}_i}$  sin cualquier condición adicional de estabilidad para el subconjunto de plantas  $\hat{P}_i$ .

### 3.2 Ajuste del desempeño

Si el PID seleccionado  $C_{\hat{P}_i}^a$  tiene un desempeño pobre para algunas plantas  $\hat{P}_i$ , significa que  $C_{\hat{P}_i}^a$  requiere un ajuste. Como el diseño de PID's estabilizantes para plantas LTI de dimensión finita es calculado usando datos de la respuesta en frecuencia, primero se sugiere utilizar los márgenes de ganancia y de fase ( $MG, MF$ ) como parámetros iniciales del desempeño. Entonces la región traslapada con estas especificaciones se representa:

$$S^{GM,PM}(k_i, k_d)|_{k_p} \subset S(k_i, k_d)|_{k_p} \quad (4)$$

Para una  $k_p$  dada. Enseguida el conjunto  $\{M_p, t_r, t_s\}$ , donde  $M_p$  representa el sobrepaso,  $t_r$  el tiempo de levantamiento y  $t_s$  el tiempo de asentamiento, determinan la calidad de desempeño del sistema de lazo cerrado del par  $(C_{\hat{P}_i}^a, P_{f_j})$  para cada  $P_{f_j} \in \hat{P}_i$ .

Sobre la base de estos índices se proponen los siguientes pasos de ajuste para obtener un controlador  $C_{\hat{P}_i}^*$  con

1. Para minimizar el intervalo de frecuencia en que el controlador tiene baja ganancia, se modifica la función de transferencia del PID añadiendo dos ceros reales negativos  $Re < 0$  y un polo en el origen  $p = 0$ . Con la aplicación de este criterio es posible obtener tiempo de asentamiento pequeño (Datta et al, 2000).
2. Ajustar la respuesta a escalón variando la ganancia del controlador para obtener el mejor desempeño de la variable controlada, evaluando el sobrepaso y los tiempos de levantamiento y de asentamiento. En esta etapa se pueden utilizar herramientas gráficas de Matlab (2008).

Una vez garantizadas la estabilidad y desempeño con el modelo lineal, es posible analizar la evolución del proceso con el modelo no lineal, es decir en simulación.

### 4. ESTABILIDAD DE PID's CONMUTADOS

De acuerdo con (Vagia et al, 2008) la naturaleza de la conmutación del controlador PID se basa en el siguiente principio. Asumiendo la existencia de  $m$  plantas LTI y  $n$  controladores PID disponibles ( $n \leq m$ ), el objetivo del  $j$ th PID:  $C_j$  es el estabilizar la  $j$ th planta:  $P_j, j \in \{1, \dots, n\}$  y los subsistemas próximos afectados  $j \pm \Delta_j^k$ .

Como la estabilidad es el tópico más importante, se requiere que:

i) El PID de traslape  $C_j$  garantice la estabilidad de cada sistema de lazo cerrado formado por parejas  $(C_j, P_{j \pm \Delta})$ .

ii) Sin embargo, resulta esencial probar la estabilidad de lazo cerrado del PID de traslape  $C_j$ , con cada  $P_{j \pm \Delta}$ ; primero en el punto de equilibrio de carga base y después de ser conmutado por la falla, en el nuevo punto de equilibrio.

Es decir, se debe realizar una prueba de estabilidad de lazo cerrado conmutando la planta en carga-base a una planta fallada:  $P_0(s) \rightarrow P_{f_i}(s, f_i)$ .

Entonces se considera el sistema LTI descrito por un modelo en espacio de estado  $\{A, B, C, D\}$ , donde la matriz  $A$  conmuta entre matrices estables  $A_1, A_2, \dots, A_N$  pertenecientes al sistema conmutado  $\mathbf{A} \triangleq \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$ .

La pregunta es: ¿cuando el sistema LTI será asintóticamente estable para cualquier secuencia de conmutación entre los elementos de  $\mathbf{A}$  ?

### 4.1 Prueba de reconfiguración y estabilidad

La conmutación entre controladores y plantas es una acción clave del esquema de CTF. La tarea de reconfiguración lógica debe seleccionar al controlador particular  $C_{\hat{P}_i}^*$  de

acuerdo al conjunto de plantas falladas  $\hat{P}_i$  a partir del caso nominal manteniendo la estabilidad interna del sistema de lazo cerrado durante el transitorio de la conmutación. Esto significa que el sistema de lazo cerrado conmutado de la pareja  $(C_0^*, P_0)$  a la pareja  $(C_{\hat{P}_i}^*, P_{f_k})$  para toda  $P_{f_k} \in \hat{P}_i$  y cualquier  $i$  debe ser estable. Además como el conjunto de controladores estabilizantes son conocidos, la prueba de estabilidad se puede realizar fuera de línea. Entonces para probar la estabilidad después de la conmutación se puede usar la siguiente condición estructurada de (Liberzon & Morse, 1999), (Liberzon, 2003).

**Condición de estabilidad.** Dadas las matrices  $A_i$  y  $A_j$ , asociadas a la descripción de espacio de estado de los sistemas lineales  $(A_k, B_k, C_k, D_k)$ , con  $k = i, j$ , el sistema conmutado de  $A_i$  a  $A_j$ , o viceversa, es asintóticamente estable si todos los autovalores  $\lambda(A_k), k = i, j$  tienen parte real estrictamente negativa, y si la desigualdad matricial lineal

$$A_k^T P_L + P_L A_k < 0 \quad (5)$$

Se satisface para  $k = i, j$  donde  $P_L$  es una *matriz común simétrica positiva definida*.

Esta condición se puede verificar fácilmente asumiendo estabilidad interna del sistema retroalimentado del esquema de CTF, generando las matrices  $A_i$  y  $A_j$  a partir de las funciones de transferencia de los conjuntos de sistemas de lazo cerrado:

$$T_i = C_{\hat{P}_i}^* P_{f_k} / (1 + C_{\hat{P}_i}^* P_{f_k}) \text{ para cada } P_{f_k} \in \hat{P}_i \text{ y}$$

$$T_j = C_{\hat{P}_j}^* P_{f_k} / (1 + C_{\hat{P}_j}^* P_{f_k}) \text{ para cada } P_{f_k} \in \hat{P}_j$$

y generando la desigualdad (5) con la herramienta de LMI-PLM de Matlab (2008). Se advierte que esta condición no

garantiza la estabilidad de la acción de conmutación para las plantas no lineales asociadas al caso lineal.

### 5. CASO DE ESTUDIO

Se considera el turbogenerador a gas (TG) de una central de generación de ciclo combinado. Las características del modelo de comportamiento, el modelo estructurado, el análisis de redundancia analítica y la técnica con la que se obtuvo un modelo estructurado completamente monitoreable, detectable y aislable ante fallas mecánicas originadas por la fricción del rotor del TG, están presentadas en (Sánchez & Verde; 2006a,b), (Verde & Sánchez, 2006) y (Sánchez et al, 2008).

Es importante mencionar que el modelo permite estudiar el comportamiento de la TG en todo el rango de operación, desde el arranque hasta el valor de *carga base* en estado estacionario. Consiste de 28 ecuaciones no lineales (19 estáticas y 9 diferenciales), 3 acciones de control y 3 actuadores, calculándose variables de flujo (aire, combustible, gases), presión, temperatura (gases y alabes de turbina), entalpía y densidad de gases, energía, velocidad del rotor y posición de actuadores. En (Sánchez y Verde, 2006a) se describe el modelo de comportamiento por medio del análisis estructural.

#### 5.1 Falla crítica

Se considera como falla crítica la falla mecánica en el acoplamiento del rotor con el turbogenerador, ya que afecta a la variable de salida, Potencia Eléctrica Generada  $k_{13}$ . Este tipo de falla se puede emular usando el parámetro de *fricción en el rotor del turbogenerador*. Por lo que el sistema FDI es capaz de distinguir ante un cambio en la potencia generada, el tipo de fallas que la origina.

Ante la falla por fricción, con el generador eléctrico de la TG acoplado a la red eléctrica externa, la velocidad del rotor es constante. Sin embargo el cambio transitorio en la velocidad angular  $\Delta k_2$  producido por el aumento de la fricción del rotor, aún siendo muy pequeño, es suficiente para alterar el valor del ángulo de potencia del generador  $x_{20}$  y modificar la PEG  $k_{13}$ .

De modo que en el escenario de falla en EE-CB, el valor de la potencia es menor al valor nominal. Además si la falla es de gran intensidad, la potencia tiende al valor mínimo aceptable y se produce el paro de la TG. En las Figura 2 se muestra la disminución de  $k_{13}$  (lazo abierto) debido a la falla mecánica correspondiente al caso de la falla  $f_1(\Delta_{11} \times 2)$  mientras que en la Fig.3 se muestra la firma de fallas en lazo cerrado para el mismo caso.

En la Figura 3 se muestra el residuo generado de acuerdo a las firmas de fallas. El análisis de diagnostico de la falla demuestra así la factibilidad de aislarla. Porque se conocen las relaciones analíticas redundantes para implementar el **g6**.

### 6. AJUSTE DE PARÁMETROS Y SIMULACIÓN

#### 6.1 Familias de PIDs estabilizantes

El análisis PID de plantas falladas se considera el caso nominal y cuatro intensidades diferentes:

$$\theta_{11}^i = \theta_{11} \times \Delta_{11}^i, \Delta_{11}^i = i; i = 1, 2, 5, 8, 10$$

enerador de los residuos.

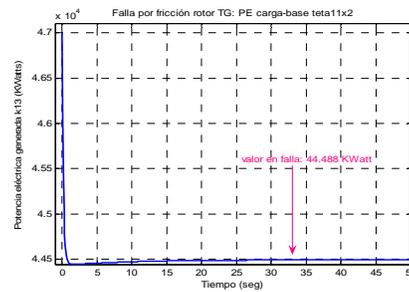


Figura 2. Falla mecánica por fricción  $\Delta_{11} = 2$ .

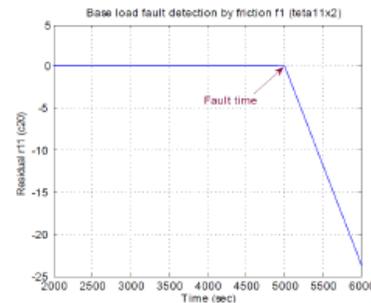


Figura 3. Residuo ARR11 de la falla mecánica en 5000s

Familias de controladores. Se aplicó la técnica descrita, de acuerdo a los siguientes pasos, como se muestra en (verde et al, 2008):

- p1) Descripción de la planta LTI: coeficientes de la función de transferencia de lazo abierto  $P_i(s, \theta_{11}^i)$  para  $\theta_{11} \times 2$ .
- p2) Obtención del rango de la ganancia proporcional  $k_p : R_{k_p} \in [0, 300]$ .
- p3) Primera aproximación de la familia de PIDs, haciendo a  $k_p = c, c \in R_{k_p}$ , se obtiene la superficie S:  $S(k_i, k_d)_{k_p=c}$ .

Funcion de transferencia nominal del controlador nominal:

$$C_0(k_p, k_i, k_d) = 0.02 + 0.01/s + 0.$$

Entonces la familia de PIDs es:  $S(k_i, k_d)_{k_p=0.02}$ , con  $k_i = k_d \in [0, 500]$ .

Parámetros de desempeño.

Con valores del margen de ganancia, MG=5 y margen de fase MF=20. La familia de PIDs resulta:

$$S_{k_p=0.02}^{(MG, MF)}(k_i, k_d) \subset S(k_i, k_d)_{k_p=0.02}$$

La Tabla 1 incluye 5 puntos seleccionados de la region obtenida. Enseguida se procede a evaluar cada uno, tomando en cuenta que garanticen estabilidad.

Tabla 1. Familia 1 de PIDs

Punto	PID	$k_p$	$k_i$	$k_d$
A	C <sub>1</sub>	0.02	0.01	230
B	C <sub>2</sub>	0.02	0.01	500
C	C <sub>3</sub>	0.02	300	500
D	C <sub>4</sub>	0.02	125	230
E	C <sub>5</sub>	0.02	110	350

1ª Evaluación. El PID  $C_1$  se conecta con  $P_1(s, \theta_{11}^{f1})$  en lazo cerrado, retroalimentación unitaria. La respuesta a escalón se muestra en la Fig. 4.

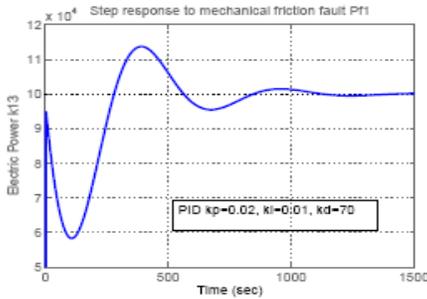


Figura 4. Respuesta a escalón

Respuesta en simulación.

En la Fig. 5 se muestra el resultado de la simulación con el modelo no lineal. Se aprecia la oscilación de la variable controlada. Las pruebas de los controladores  $C_2, C_3, C_4, C_5$  de la Tabla 1 generan resultados similares, magnificados de acuerdo a la intensidad cada vez mayor de la falla.

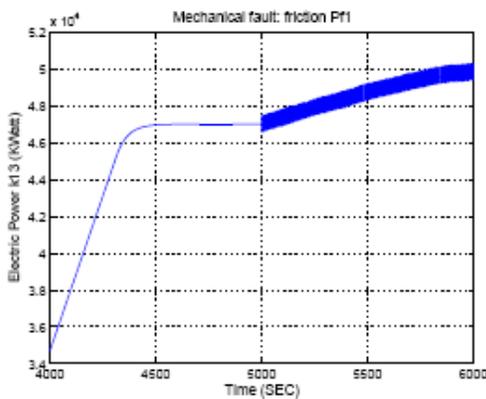


Figura 5. Simulación de falla por fricción  $\theta_{11} \times 2$  at 5000 seg.

Ajuste de la ganancia derivativa. Se proponen valores menores para  $k_d$ , Tabla 2.

Tabla 2. Familia 2 of PIDs

Controlador	PID	$k_p$	$k_i$	$k_d$
$C_1$	pid <sub>1</sub>	0.02	0.01	0.0
$C_2$	pid <sub>2</sub>	0.02	0.01	10
$C_3$	pid <sub>3</sub>	0.02	0.01	25
$C_4$	pid <sub>4</sub>	0.02	0.01	40

Los resultados obtenidos en simulación se muestran en la Fig. 6. Se aprecia que  $C_2$  genera la mayor respuesta de esta familia de PIDs, sin embargo la respuesta transitoria tiene un tiempo de asentamiento muy grande para el caso de estudio.

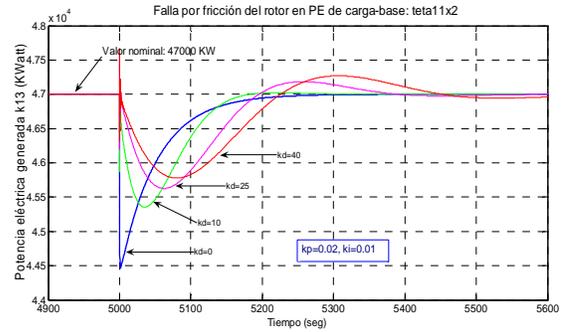


Figura 6. Simulación de falla por fricción:  $\theta_{11} \times 2$ .

Ajuste del desempeño.

Se usa la metodología propuesta en la Sec. 3.2 con el propósito de obtener mejor respuesta, sin oscilaciones y tiempo de asentamiento pequeño. Siguiendo el procedimiento de prueba y error agregando al PID ceros reales negativos y un polo en cero; finalmente se modifica la ganancia del controlador obteniéndose la respuesta a escalón sin oscilaciones y tiempo de asentamiento de aproximadamente 35 s.

El Nuevo controlador es:

$$C_1^*(s) = 7.14 \times 10^{-2} \times \frac{(1 + 0.5s)(1 + 0.5s)}{s}, M_g : \inf, M_f = 68.2^\circ$$

$$C_1^*(s) = \frac{0.1785s^2 + 0.7140s + 0.7140}{s}$$

Ganancias:  $k_p = k_i = 0.7140, k_d = 0.1785$

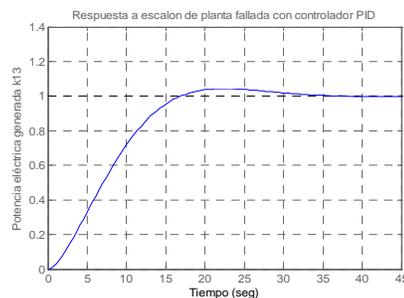


Figura 7. Respuesta a escalón por  $C_1^*(s)$

Validación en simulación.

Igual a los casos anteriores la falla es detectada en el instante  $t_f = 5000 \text{ seg}$ . En simulación se consideraron 4 fallas por fricción  $\theta_{11} \times (2, 5, 8, 10)$ .

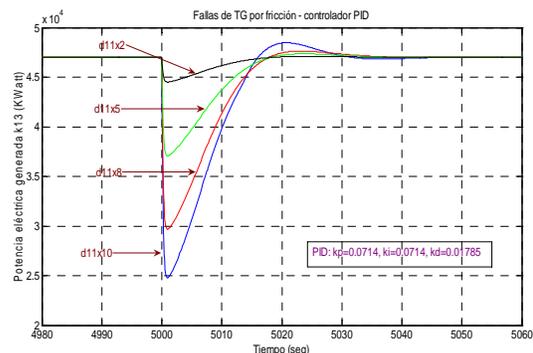


Figura 8. Simulación de falla por fricción con PID único.

## 6.2 Prueba de estabilidad de plantas conmutadas

Se elige el escenario de conmutación de la planta nominal  $P_0$  a la planta fallada  $P_i$  ( $\theta_{1i} \times 2$ ), con el controlador PID  $C_1^*(s)$ :

$$C_1^*(s) = \frac{0.1785s^2 + 0.7140s + 0.7140}{s}$$

Los valores propios de  $\lambda(A_0)$  y  $\lambda(A_1)$  son todos estrictamente negativos.

Para la conmutación entre  $(A_0, A_1)$ :  $P_{01}$

i) se obtiene  $P_{01} = P_{01}^T > 0$ .

ii) Evaluación en punto de equilibrio del estado nominal:

$$Q_{01} = A_0^T P_{12} + P_{12} A_0$$

se tiene:  $\text{Re}[\lambda(Q_{01})] < 0$ . Entonces  $Q_{01} < 0$

iii) Evaluación en el punto de equilibrio de la falla:

$$Q_1 = A_1 P_{12} + P_{12} A_1$$

se tiene:  $\text{Re}[\lambda(Q_2)] < 0$ . Entonces  $Q_2 < 0$

Con lo que se demuestra que el sistema conmutado es estable asintóticamente.

## 7. CONCLUSIONES

Se describió un esquema de control tolerante a fallas con PID's aplicado al caso de fallas mecánicas en la Turbina de Gas de una CGCC. El esquema está basado en un sistema de diagnóstico, la generación de familias de PID's estabilizantes para un sistema lineal y condiciones de estabilidad para sistemas lineales conmutados. En lo que respecta a la parte de control se usó un conjunto de controladores *estabilizantes PID* con alto desempeño, ajustados fuera de línea a partir de modelos LTI de la planta nominal en estado de equilibrio de carga base y de las plantas falladas.

Se evaluaron varios PID's de una familia, con diferentes valores de  $k_d$ . Para minimizar el intervalo de frecuencia en el que el controlador tiene baja ganancia, la ganancia derivativa  $k_d$  se fue reduciendo; finalmente se utilizó el esquema estructural de reubicar los ceros del PID sobre el eje real negativo del plano complejo, desplazándolos hasta obtener la respuesta deseada. El resultado es un PID con excelente desempeño PID\* que mediante la prueba lineal de respuesta a escalón y la prueba no-lineal en simulación, garantiza la respuesta transitoria deseada, de bajo sobretiro y tiempo de asentamiento  $t_s$  muy pequeño. También se evaluó la estabilidad asintótica de los sistemas LTI conmutados por falla, de la planta nominal  $P_0$  a cada planta fallada  $P_i$ , con  $i = 1, 2, 3, 4$ . En cada caso se demostró la estabilidad asintótica.

## REFERENCIAS

Blanke M., M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswircki (2003), *Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Spriger-Berlag Berlin.

Datta, A., M. Ho and S.P. Bhattacharyya (2000), *Structure and Synthesis of PID Controllers*, Springer-Verlag, London.

Ding, S. X.. (2008), *Model-based Fault Diagnosis Techniques*, Springer-Verlag Berlin.

Fruttschi, Hans U.(1999), *Highest efficiencies for electrical power generation with combined cycle plants*, ABB Power

Generation Ltd., Baden Switz. ABB Review, n3, pp. 12-18.

Giampaolo, T (2003), *The gas turbine handbook: principles and practices*, 2<sup>nd</sup> Ed, The Fairmont Press, Chapter 11: *detectable problems*, 395 pp.

IEEE (2006), Special Issue on PID, IEEE Control Systems Magazine. February.

Isermann, R. (2006), *Fault Diagnosis Systems*. Springer-Verlag Berlín.

Keel L.H. and Bhattacharyya, S.P. (2005), PID Controller synthesis free of analytical models, *Proceedings of the 16<sup>th</sup> IFAC World Congress*.

Keel L.H. and Bhattacharyya, S.P. (2008), Controller synthesis free of analytical models: three term controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 53, no. 6, pp. 1341-1352.

Knospe, C. (2006), *PID Control*, IEEE Control System Magazine, February, pp. 30-31.

Li, Y., K.H. Ang, C. Gcy (2006), *PID Control system analysis and design*, IEEE Control System Magazine, February, pp. 32-41.

Liberzon, D. and A. Morse (1999), Basic problems in stability and design of switched systems, *IEEE Control System Magazine*, vol. 19, n5, pp. 59-70.

Liberzon, D. (2003), *Switching in systems and control*, Birkhäuser, Boston.

MATLAB R2008, Toolbopx Control System. Natick, Massachusetts: Math-Works, Inc., 2008.

Narendra, K.S., J Balakrishnan & M Kemal (1995), Adaptation and Learning Using Multiple Models, Switching and Tuning, *IEEE Control Systems*, June, 37-51.

Quevedo, J. and T. Escobet Eds.(2000), Digital control: past, present and future of PID control, Proc. IFAC Workshop, Terrassa, Spain.

Rauch, HE, (1995), Autonomous Control Reconfiguration, *IEEE Control Systems*, December, 37-48.

Sánchez, M., C. Verde y D. Suárez (2008), Análisis Estructural para la Generación de Residuos. *Advances in Automatic Control and Engineering*, Part 1, V36, pp. 23-32. Serie Research in Computer Science, IPN.

Sánchez, M. & C. Verde (2006a), Analytical Redundancy for a Gas Turbine of a Combined Cycle Power Plant, *American Control Conference ACC'06*, Minneapolis, MN, USA, June14-16, pp. 4442-4447.

Sánchez, M & C. Verde (2006b), Structural analysis for sensor fault detection in combined cycle power plant units, 2<sup>nd</sup> *International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control*. México.

Verde, C. & M. Sánchez (2006), Monitorability analysis for a gas turbine using structural analysis, *6<sup>th</sup> IFAC Symposium in Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS'06*, Beijing, China, 13(), 721-726.

Verde, C., R. Carrera y S. Bhattacharyya (2008), Diseño asistido por computadora de PID's estabilizantes. *Advances in Automatic Control and Engineering*, Part 1, V36, pp. 137-146. Serie Research in Computer Science, IPN.

Vagia, M., Nikolakopoulos, G. and Tzes, A. (2008), Design of a robust PID-control switching scheme for an electrostatic micro-actuator, *Control Engineering Practice*, 16 (11), 1321-1328.

Zhang, Y. and J. Jiang (2006), Issues on integration of fault diagnosis and reconfigurable control in active fault tolerant control Systems, in *Safeprocess'06*, Beijing, China, pp. 1513-1524.