

# Selección Óptima de Redundancias para el Diseño de Control Tolerante a Fallas Activo para Plantas Químicas

Patricio A. Luppi<sup>1,2</sup> and Marta S. Basualdo<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>CIFASIS (CONICET-UNR)

Centro Internacional Franco Argentino de Ciencias de la Información y de Sistemas.  
27 de Febrero 210 bis (S2000EZP), Rosario, Argentina.

<sup>2</sup>FCEIA-UNR, Univ. Nac. de Rosario, Pellegrini 250 (S2000EZP), Rosario, Argentina.

<sup>3</sup>UTN-FRRO, Univ. Tecnológica Nacional, Zeballos 1341 (S2000BQA), Rosario, Argentina. luppi@cifasis-conicet.gov.ar  
mbasualdo@frro.utn.edu.ar

**Abstract.** Este trabajo presenta un procedimiento preliminar para la selección óptima de redundancias de hardware en el marco de control tolerante a fallas reconfigurable. Suponiendo que se dispone de un controlador nominal de dimensión reducida, el objetivo es manejar un conjunto preestablecido de fallas parciales en actuadores, preservando la estabilidad y el desempeño dinámico del sistema. La metodología se basa en un procedimiento de optimización multi-objetivo para lograr un balance entre criterios de diseño conflictivos como controlabilidad y desempeño. La selección de hardware adicional (no incluido en la estructura nominal) es penalizada para lograr una baja inversión en redundancias. Las estructuras de control propuestas pueden sintetizarse mediante controladores convencionales tipo PI (proporcional-integral). La eficacia del procedimiento es evaluada utilizando el caso de estudio Tennessee Eastman.

**Keywords:** diseño asistido por computadora, control tolerante a fallas, algoritmo genético, simulación dinámica, evaluación de desempeño

## 1 Introducción

En los procesos industriales, la ocurrencia de fallas puede provocar un mal funcionamiento del sistema de control, poniendo en riesgo la seguridad de las personas, ocasionando daños físicos en los equipos e incrementando el tiempo de inactividad de la planta, lo que implica importantes pérdidas económicas [1]. Esto genera una fuerte motivación para el desarrollo de estructuras de control tolerante a fallas (CTF), siendo el objetivo preservar la estabilidad del sistema manteniendo un aceptable desempeño dinámico de modo de evitar una parada del proceso, aumentando su disponibilidad [1]. Como es bien sabido, existen básicamente dos formas de manejar las fallas. Una de ellas se basa en una estructura rígida del controlador, que se diseña para ser robusto frente a un conjunto predeterminado de fallas. La otra alternativa se caracteriza por su capacidad

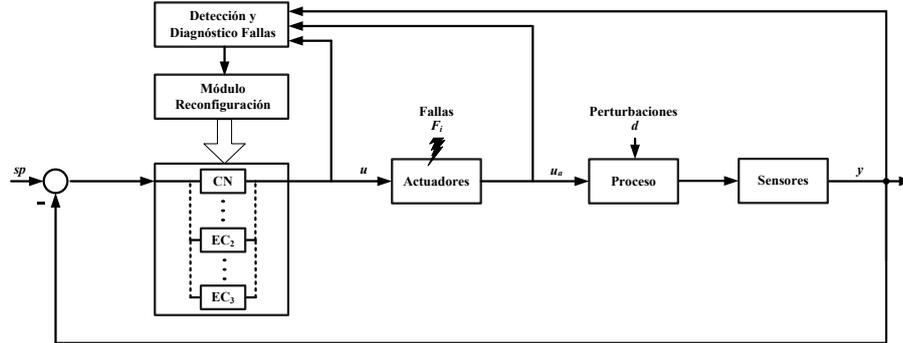


Fig. 1. Arquitectura de un sistema CTF reconfigurable

para reconfigurar en tiempo real un controlador nominal (CN). El primero de los enfoques comentados se denomina *CTF Pasivo*, mientras que el segundo corresponde al *CTF activo o reconfigurable* [2]. A pesar de sus diferencias, ambas estrategias dependen fuertemente de las redundancias para poder lograr la tolerancia a fallas [3].

Cuando se analiza el diseño de un sistema CTF reconfigurable, debe considerarse su desempeño en dos modos de operación muy diferentes: (i) modo normal (libre de fallas), donde el objetivo es lograr el mejor desempeño dinámico posible, (ii) modo de falla, para el cual se desea mantener la estabilidad y un desempeño aceptable, típicamente degradado. Para el diseño de estos sistemas resulta crucial el desarrollo de: (a) un controlador nominal (CN) que permita ser reconfigurado fácilmente, (b) un sistema de detección y diagnóstico de fallas (DDF) que sea sensible a los eventos anormales, y (c) un módulo de reconfiguración para la implementación de las estrategias de control alternativas. En la Fig. 1 se muestra una arquitectura típica de un sistema CTF reconfigurable. En [4] se propuso el diseño de la estructura CN, donde la principal contribución consistió en asegurar la estabilidad del sistema durante el periodo de DDF. Esto se logró a través del cumplimiento de una condición suficiente asociada con la propiedad *controlabilidad integral descentralizada*. Tal como en [4], en este trabajo se considera disponible un sistema DDF ideal, y por lo tanto su desarrollo no será abordado aquí. Una completa descripción y clasificación de las técnicas de DDF puede encontrarse en [5].

Generalmente, la aparición de fallas críticas en el sistema demanda la reconfiguración del CN. Estas fallas son capaces de provocar una parada del proceso en la medida que el sistema de control no efectúe acciones correctivas. Para estos casos, se deberá disponer de sensores y actuadores adicionales en correcto estado de funcionamiento (redundancias) que permitan implementar en tiempo real estructuras de control alternativas [1]. Para cada escenario de falla que se considere, el problema de reconfiguración del CN involucra dos tareas fundamentales: (i) la selección de las variables de entrada-salida para control, en particular de las redundancias, (ii) basado en el hardware elegido, el diseño de las estructuras de

**Table 1.** Procedimiento completo

Paso	Descripción
A. Selección de redundancias	
1. <i>Modelado de las fallas:</i>	Especificar la matriz de efectividad
2. <i>Optimización:</i>	Optimizar criterios: a) Controlabilidad, b) Desempeño
3. <i>Obtención soluciones:</i>	Plotear soluciones. Obtener conjunto óptimo de Pareto
4. <i>Calcular costo:</i>	Calcular costo de hardware de las soluciones candidatas
B. Diseño de estructura de control	
5. <i>Definir apareamientos:</i>	Definir los apareamientos entre variables entrada-salida
6. <i>Evaluación dinámica:</i>	Evaluar desempeño a través de simulaciones dinámicas
7. <i>Selección final:</i>	Elegir solución final según relación desempeño-costo

control. El objetivo del presente trabajo consiste en extender la metodología detallada en [4] de modo de obtener un procedimiento completo para la síntesis de CTF activo. La selección de un conjunto reducido de redundancias de hardware se aborda conjuntamente con el diseño de la estructura reconfigurable, de modo de poder acomodar un set preestablecido de fallas. Aquí se formula un problema de optimización multi-objetivo que se resuelve con algoritmo genético (AG) [6], de modo de obtener un adecuado balance entre controlabilidad, desempeño y costo de inversión. En este estudio preliminar, se consideran fallas críticas en los actuadores, en particular la pérdida parcial de su efectividad.

La propuesta es evaluada utilizando el reconocido caso de estudio Tennessee Eastman (TE) [7]. El desempeño dinámico de la estructura CTF presentada es analizado en detalle al realizar diversas simulaciones a lazo cerrado del modelo riguroso del proceso TE, sujeto a la falla crítica de un actuador y también a perturbaciones recomendadas por [7]. Teniendo en cuenta las respuestas temporales del sistema, se calculan varios índices de desempeño con el fin de demostrar la potencialidad de la metodología y para extraer conclusiones. En las próximas secciones se presentan varios criterios que permiten realizar la selección de las redundancias, tratando de minimizar la cantidad necesaria de sensores y actuadores. El procedimiento completo se resume en la Tabla 1.

## 2 Criterios para la selección de redundancias

Dado un proceso estabilizado que posee  $n$  entradas y  $m$  salidas, representado como:

$$y(s) = G(s)u_a(s) \quad (1)$$

donde:

$$u_a(s) = Lu(s) \quad (2)$$

En las ecs. 1 y 2,  $y(s)$  representa el vector de salidas de dimensión  $m \times 1$ ,  $G(s)$  la matriz  $m \times n$  de funciones transferencia del proceso,  $u_a(s)$  corresponde al vector de salida de los actuadores con dimensión  $n \times 1$ , y  $u(s)$  el vector de salida de los controladores (variables manipuladas) de dimensión  $n \times 1$ . Además, la matriz

4 Patricio A. Luppi<sup>1,2</sup> and Marta S. Basualdo<sup>1,3</sup>

$L = \text{diag}(l_1, l_2, \dots, l_n)$  de dimensión  $n \times n$  denominada *matriz de efectividad* permite modelar fallas parciales en los actuadores. Aquí, cada componente  $l_i$  de la diagonal representa la efectividad de cada actuador, donde  $0 \leq l_i \leq 1$ . Así,  $l_i = 1$  significa que el actuador  $i$  se encuentra totalmente libre de fallas, mientras que  $l_i = 0$  implica el caso contrario. Nótese que la matriz  $L$  puede ser especificada a partir del conocimiento de la estructura CN y de los escenarios de falla considerados para su tratamiento. De las ecs. 1 y 2 resulta:

$$y(s) = \hat{G}(s)u(s) \quad (3)$$

donde  $\hat{G}(s) = G(s)L$  tiene en cuenta las fallas presentes en los actuadores.

A partir de  $\hat{G}(s)$ , considere la selección de  $r$  entradas y  $r$  salidas expresada como  $\hat{G}_{(I,J)}(s)$ , donde  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_r\} \subset \{1, 2, \dots, m\}$  y  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_r\} \subset \{1, 2, \dots, n\}$  representan índices que parametrizan la selección de las variables controladas y manipuladas, respectivamente. En teoría, para poder asegurar el control independiente de las  $r$  salidas mediante las  $r$  entradas debe cumplirse:

$$\text{rank}[\hat{G}_{(I,J)}(s)] = r \quad (4)$$

Es decir, el subproceso seleccionado  $\hat{G}_{(I,J)}(s)$  debe satisfacer la condición de *controlabilidad funcional* [12]. Sin embargo, el cumplimiento de dicho criterio no garantiza en la práctica un buen desempeño del sistema de control [12]. Por lo tanto, en este trabajo se propone calcular el mínimo valor singular de estado estacionario  $\underline{\sigma}[\hat{G}_{(I,J)}]$  [8]. Este índice cuantitativo representa una medida de la controlabilidad que presenta una determinada selección  $\hat{G}_{(I,J)}$ , y por lo tanto puede utilizarse para evaluar diferentes conjuntos candidatos de variables de entrada-salida. Mientras mayor sea el valor de  $\underline{\sigma}[\hat{G}_{(I,J)}]$ , mejores resultan las condiciones de controlabilidad [8]. En este contexto, la óptima selección de  $r$  entradas y  $r$  salidas basada en la maximización del mínimo valor singular puede formularse como:

$$\min_{(I,J)} -\underline{\sigma}[\hat{G}_{(I,J)}] \quad (5)$$

sujeto a:

$$\det[\hat{G}_{(I,J)}] \neq 0 \quad (6)$$

donde la restricción de la ec. 6 permite descartar aquellas soluciones que no satisfacen el criterio de la ec. 4.

Por otra parte, teniendo en cuenta la ec. 3 y considerando perturbaciones, puede expresarse:

$$y(s) = G(s)Lu(s) + D(s)d(s) \quad (7)$$

donde  $D(s)$  representa la matriz  $m \times p$  de funciones transferencia de las perturbaciones, y  $d(s)$  corresponde al vector de perturbaciones de dimensión  $p \times 1$ . De manera similar a lo propuesto en [9], la ec. 7 puede particionarse como:

$$\begin{bmatrix} y_s(s) \\ y_r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_s(s) & G_s^*(s) \\ G_r(s) & G_r^*(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s(s) \\ u_r(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_s(s) \\ D_r(s) \end{bmatrix} d(s) \quad (8)$$

donde  $G_s(s)$  corresponde al subproceso cuadrado  $r \times r$  seleccionado para ser controlado, y  $G_s^*(s)$ ,  $G_r(s)$ ,  $G_r^*(s)$ ,  $D_s(s)$  y  $D_r(s)$  representan matrices de funciones transferencia de dimensiones adecuadas. Tal como puede observarse, la matriz  $L$  ha sido particionada siendo  $L_s = \text{diag}(l_{s_1}, l_{s_2}, \dots, l_{s_r})$ . Nótese que los elementos de  $L_s$  están vinculados a los  $r$  actuadores seleccionados para control. Teniendo en cuenta la teoría de Control basado en Modelo Interno [9], y asumiendo control perfecto en estado estacionario, puede demostrarse que:

$$y_r = [G_r L_s G_s^{-1}] y_s^{set} + [D_r - G_r L_s G_s^{-1} D_s] d + [G_r^* L_r - G_r L_s G_s^{-1} G_s^* L_r] u_r \quad (9)$$

Esta expresión describe los desvíos de estado estacionario de las variables no controladas respecto de sus puntos de operación, cuando se producen cambios de setpoint y perturbaciones. En este marco, la óptima selección de  $r$  entradas y  $r$  salidas basada en la minimización de la suma de los desvíos cuadráticos (SDC) [9] puede formularse como:

$$\min_{(I,J)} \|G_{r(I,J)} L_{s(I,J)} G_{s(I,J)}^{-1}\|_F^2 + \|D_{r(I,J)} - G_{r(I,J)} L_{s(I,J)} G_{s(I,J)}^{-1} D_{s(I,J)}\|_F^2 \quad (10)$$

sujeto a:

$$\det[G_{s(I,J)}] \neq 0 \quad (11)$$

donde  $\|\cdot\|_F$  corresponde a la norma de Frobenius.

### 3 Implementación

Las funciones objetivo presentes en las ecs. 5 y 10 deben optimizarse simultáneamente. Como se muestra en la sección 4, dichas funciones objetivo son conflictivas ya que generalmente no existe una única solución que optimice ambos criterios. El problema de optimización multi-objetivo a resolver es:

$$\min_{(I,J)} \{-\underline{\sigma}[\hat{G}_{(I,J)}], SDC_{(I,J)}\} \quad (12)$$

sujeto a las restricciones de las ecs. 6 y 11, donde  $SDC_{(I,J)}$  hace referencia a la función objetivo a minimizar incluida en la ec. 10. Si bien existen metodologías que permiten transformar el problema de la ec. 12 a uno mono-objetivo, resulta muy complicado combinar distintas funciones objetivo en el marco de diseño de estructuras de control [10]. En este trabajo se propone obtener una aproximación del conjunto óptimo de Pareto correspondiente al problema de la ec. 12 utilizando el siguiente procedimiento: (i) resolver individualmente los problemas de ecs. 5 y 10 empleando algoritmo genético (AG). Este paso puede repetirse (entre 5 y 10 veces) de modo de obtener un conjunto con diversas soluciones subóptimas. (ii) plotear las soluciones obtenidas en el plano  $SDC$  vs.  $-\underline{\sigma}$ . En el marco de AG, estas soluciones corresponden a los mejores cromosomas de cada generación. (iii) Obtener gráficamente el conjunto óptimo de Pareto.

El AG es un procedimiento de optimización que imita la evolución natural biológica. Algunas de sus características atractivas incluyen: (i) capacidad para

resolver problemas combinatorios de gran dimensión, (ii) devuelve un conjunto de soluciones subóptimas, (iii) presenta baja probabilidad de obtener mínimos locales. Nótese que a través de este procedimiento se reduce sensiblemente la cantidad de soluciones candidatas a analizar. En este trabajo se empleó la función de Matlab *ga*, que busca minimizar una función objetivo especificada utilizando algoritmo genético.

Típicamente, las soluciones obtenidas involucran hardware existente presente en la estructura CN como así también sensores y actuadores adicionales (redundancias) que implican un costo extra. En este trabajo se busca establecer un conjunto de redundancias de bajo costo, que posibilite el diseño de eficientes estructuras de control alternativas. En el contexto de AG, considere el siguiente cromosoma que representa una selección particular de hardware:

$$C_i = [c_1, c_2, \dots, c_{N_c}] \quad (13)$$

El cromosoma  $C_i$  tiene longitud  $N_c = m + n$ , es decir  $m$  variables de decisión para las variables controladas y  $n$  para las variables manipuladas. Además, cada gen  $c_i$  de  $C_i$  con  $i = 1, 2, \dots, N_c$  pertenece al alfabeto binario donde  $c_i = 1$  indica que se ha seleccionado el sensor/actuador correspondiente a la posición  $i$ , y  $c_i = 0$  implica lo contrario. Para una solución particular  $C_i$ , el correspondiente costo de hardware puede calcularse como:

$$C_h = C_i C^T \quad (14)$$

con:

$$C = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_{N_c}^*] \quad (15)$$

donde cada componente  $c_i^*$  representa el costo asociado con el uso de un componente de hardware particular. Comúnmente puede definirse  $c_i^* = 0$  para el hardware original empleado por la estructura CN. Luego, un valor no nulo de  $C_h$  indica que la solución  $C_i$  recomienda la utilización de redundancias.

Finalmente, el último paso consiste en realizar el apareamiento entre las entradas-salidas elegidas de modo de definir las interconexiones entre las variables controladas y manipuladas para cada solución del conjunto óptimo de Pareto. El objetivo es implementar estrategias de control descentralizadas, que pueden sintetizarse utilizando controladores independientes PI (proporcional-integral). Para obtener el apareamiento óptimo de las entradas-salidas se propone utilizar el procedimiento desarrollado por [11]. Se trata de un algoritmo Branch and Bound que resuelve un problema de optimización bi-objetivo basado en los índices *RGA sum* y  $\mu$  *interaction measure*. En la Tabla 1 se resumen todas las tareas descriptas que conforman la metodología propuesta.

#### 4 Caso de estudio: proceso Tennessee Eastman

En esta sección se considera el reconocido caso de estudio Tennessee Eastman (TE) de modo de evaluar la metodología presentada anteriormente. Aquí se provee mínima información acerca del proceso. Para más detalles consultar [7].

**Table 2.** Variables del proceso TE: (a) Utilizadas por el controlador nominal (CN), (b) Potenciales redundancias

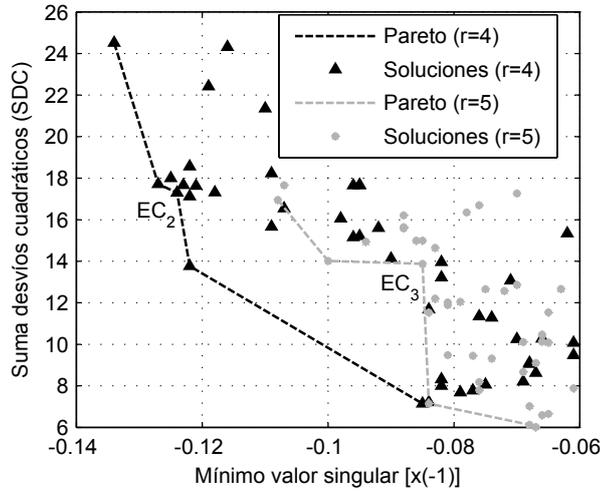
Salida	Descripción	Entrada	Descripción
<i>(a)</i>			
$xme(7)$	Reactor pressure (a)	$xmv(1)$	D feed flow (a)
$xme(17)$	Stripper underflow (a)	$xmv(3)$	A feed flow (a)
$xme(30)$	B comp. purge (a)	$xmv(4)$	A and C feed flow (a)
$xme_{G/H}$	G/H comp. ratio (a)	$xmv(6)$	Purge valve (a)
<i>(b)</i>			
$xme(5)$	Recycle flow (b)	$xmv(5)$	Compressor recycle valve (b)
$xme(6)$	Reactor feed rate (b)	$xmv(9)$	Stripper steam valve (b)
$xme(9)$	Reactor temp. (b)	$xmv(11)$	Condenser cooling water flow (b)
$xme(11)$	Product separator temp. (b)	$xme(21)_{sp}$	Reactor water outlet temp. setp. (b)
$xme(13)$	Product separator pres. (b)		
$xme(16)$	Stripper pressure (b)		
$xme(18)$	Stripper temp. (b)		
$xme(20)$	Compressor work (b)		

Para esta etapa se adopta el controlador nominal (CN) propuesto en [4]. Se trata de una estructura de control completamente descentralizada, de dimensión reducida, formada solamente por 4 lazos de control independientes. De esta manera, todos los sensores y actuadores no utilizados por CN pueden considerarse para el problema de selección de redundancias y diseño de controladores alternativos. En la Tabla 2 se muestran todas las variables correspondientes al proceso TE, donde se distinguen: a) el hardware utilizado por la estructura CN, y b) los sensores y actuadores adicionales (potenciales redundancias).

A partir de simulaciones dinámicas del modelo TE ejecutadas previamente, se determinó un conjunto de fallas críticas. El manejo de las mismas implica una reconfiguración de la estructura CN, debido a que un reajuste de los controladores de CN no es suficiente.

En el presente estudio se analizará una falla parcial en el actuador  $xmv(6)$ , concretamente un 50% de reducción de su efectividad (falla denominada  $F$ ). Además se considera que:

- El proceso TE opera en el modo 1 (caso base), con una relación de masas G/H de 50/50 y una tasa de producción de  $7038 \text{ kg h}^{-1}$  G y  $7038 \text{ kg h}^{-1}$  H [7]. El correspondiente modelo de estado estacionario, es decir las matrices normalizadas  $G$  y  $D$  son las mismas que se utilizaron en [4].
- En trabajos previos [4] se forzó la selección de las salidas  $xme(7)$ ,  $xme(17)$ ,  $xme(30)$  y  $xme_{G/H}$  como variables controladas, de modo de cumplir con todos los requisitos del proceso TE. Aquí esta restricción es relajada ya que se tolera una degradación del desempeño del sistema debido a la falla  $F$  propuesta. Esta hipótesis es válida siempre que se respeten los límites operativos definidos en la Tabla 6 del trabajo [7]. De todas formas, se pondera la selección de las variables  $xme(7)$ ,  $xme(17)$ ,  $xme(30)$  y  $xme_{G/H}$  a través de la siguiente configuración específica del vector de costos.



**Fig. 2.** Soluciones alternativas

- El vector de costos se define como:  $C=[10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 10, 0, 10, 10, 10, 10]$ . Nótese que los elementos nulos de  $C$  corresponden al hardware original utilizado por CN, es decir  $xme(7)$ ,  $xme(17)$ ,  $xme(30)$ ,  $xme_{G/H}$ ,  $xmv(1)$ ,  $xmv(3)$ ,  $xmv(4)$  y  $xmv(6)$ . Por lo tanto, cada vez que se seleccione un sensor o actuador adicional, el costo se incrementará en 10 unidades.
- Para la ejecución del algoritmo genético (AG) se emplean los siguientes parámetros: población inicial  $N_i=10000$ , longitud del cromosoma  $N_c=20$ , nro. de generaciones  $N_g=50$ , probabilidad de mutación  $0.7/N_c$ , probabilidad de cruzamiento 0.7, y método de selección *roulette wheel*.

Al realizar la simulación de la estructura CN con la falla  $F$  propuesta y considerando las perturbaciones  $idv(1)$  y  $idv(2)$  [7], se observa una parada del proceso TE debido a una alta presión del reactor  $xme(7)$ . Para este escenario se propone realizar 2 diseños alternativos considerando  $r=4$  y  $r=5$ , donde  $r$  hace referencia a la dimensión de la estructura de control. El objetivo es intentar mejorar el desempeño del sistema al utilizar 5 lazos de control en lugar de 4. Entonces, el AG se ejecutó varias veces de modo de obtener soluciones para cada caso. Las soluciones obtenidas se muestran en Fig. 2, donde se superponen los conjuntos de soluciones correspondientes a  $r=4$  y  $r=5$  en una gráfica  $SDC$  vs.  $-\underline{\sigma}$ . Para la selección de la estructura de control final se utilizó el siguiente criterio: (i) considerar sólo las soluciones pertenecientes al conjunto óptimo de Pareto, (ii) teniendo en cuenta el conjunto anterior, seleccionar la solución de menor costo. Como puede observarse, el conjunto óptimo de Pareto consiste de 5 soluciones para  $r=4$ , y 6 soluciones para  $r=5$ . Para  $r=4$ , se seleccionó la solución denominada  $EC_2$  presentada en Tabla 3 ya que: (i) presenta el mínimo costo, y (ii) no incluye el actuador fallado  $xmv(6)$ , lo que

**Table 3.** Controlador nominal y estructuras alternativas para la falla  $F$ 

	$CN$	$EC_2 (F)$	$EC_3 (F)$
	$xmv(1) - xme_{G/H}$	$xmv(1) - xme_{G/H}$	$xmv(1) - xme_{G/H}$
	$xmv(3) - xme(7)$	$xmv(3) - xme(7)$	$xmv(3) - xme(7)$
	$xmv(4) - xme(17)$	$xmv(4) - xme(18)$	$xmv(4) - xme(9)$
	$xmv(6) - xme(30)$	$xmv(5) - xme(20)$	$xmv(6) - xme(30)$
			$xmv(11) - xme(20)$
$-\sigma$ :	-0.061	-0.124	-0.085
$SDC$ :	18.33	17.30	13.87
Costo:	0	30	30

permitiría manejar diferentes porcentajes de reducción de su efectividad, incluso una falla total. Como puede observarse, para este caso ( $r = 4$ ) las redundancias seleccionadas resultaron ser 2 sensores  $xme(18)$  y  $xme(20)$ , y el actuador  $xmv(5)$ . Sin embargo, en la próxima sección se muestra que  $EC_2$  presenta un pobre desempeño dinámico en comparación con la solución  $r = 5$  (denominada  $EC_3$ ). Esto es consistente con el mayor valor del índice  $SDC$  presentado por  $EC_2$ , ver Tabla 3. Utilizando el mismo criterio que para  $r = 4$ , para el caso  $r = 5$  se eligió la solución denominada  $EC_3$ . Esta estructura utiliza 3 redundancias, a saber: los 2 sensores  $xme(9)$  y  $xme(20)$  y el actuador  $xmv(11)$ . Esta solución presenta el mismo costo que  $EC_2$ , con la desventaja de que  $EC_3$  considera el actuador fallado  $xmv(6)$ . Tal como se analiza en la próxima sección, la ventaja es que  $EC_3$  mejora notablemente el desempeño dinámico del sistema.

#### 4.1 Análisis del comportamiento dinámico

En esta sección se describe la ejecución de varias simulaciones del sistema CTF realizadas en el ambiente de trabajo Simulink de Matlab. El objetivo es comparar el desempeño dinámico de la estructura CN propuesta por [4] contra el sistema CTF aquí desarrollado, teniendo en cuenta la falla  $F$  propuesta y perturbaciones.

Para todas las simulaciones, se asume que el tiempo de estimación de la falla es  $t_{DDF} > 30\tau_{min}$ , donde  $\tau_{min}$  corresponde a la constante de tiempo más chica del proceso [2]. Para el proceso TE se tiene  $\tau_{min} = 0.01$  h. [7]. Por lo tanto, se adopta  $t_{DDF} = 1$  h. Además, se definen los siguientes parámetros: (i) tiempo de ocurrencia de la falla  $t_F = 10h.$ , (ii) tiempo de reconfiguración del sistema  $t_R = t_F + t_{DDF} = 11h.$ , que corresponde al instante en que se implementa la estructura de control alternativa  $EC_i$  a partir de CN, (iii) tiempo de aplicación de las perturbaciones  $t_{div(2)} = 21h.$  y  $t_{div(1)} = 22h.$

Las Figs. 3-4 muestran las respuestas temporales de algunas entradas y salidas clave del proceso. Tal como se sugiere en [7], la Tabla 4 presenta una comparación cuantitativa basada en el cálculo de la integral del error absoluto (IEA) y del porcentaje de mejora del error (PME):

$$IEA = \int_{t_1}^{t_2} |r(t) - y(t)| dt \quad (16)$$

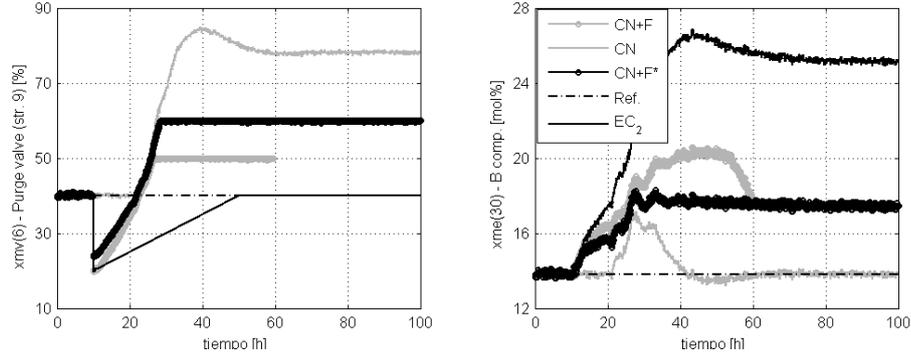


Fig. 3. Evolución temporal de las variables: (a)  $xmv(6)$  y (b)  $xme(30)$

$$PME = \frac{IAE^{base} - IAE^{new}}{IAE^{base}} 100 \quad (17)$$

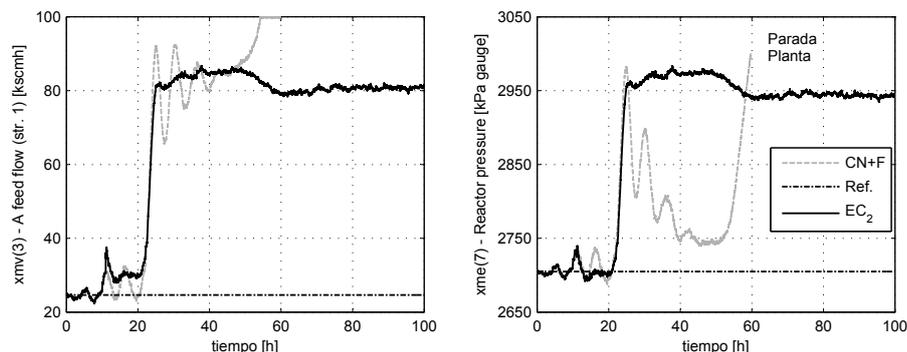
donde  $r(t)$  representa el setpoint,  $y(t)$  una salida particular del proceso,  $[t_1, t_2]$  el período de evaluación del índice, *base* se refiere a la  $EC_i$  considerada como referencia para la comparación, y *new* a la solución alternativa que se está evaluando.

Todas las  $EC_i$  implementadas se basan en controladores independientes tipo PI (proporcional-integral). Además, se utiliza un mecanismo de reconfiguración simple basado en la conmutación de los modos de operación automático/manual de los controladores PI, con el fin de minimizar la introducción de transitorios.

Tal como puede observarse en la Tabla 4, la  $EC_2$  presenta un pobre desempeño dinámico respecto a la estructura CN. Si bien el índice PME resulta negativo para la mayoría de las salidas de  $EC_2$ , esta estructura es capaz de evitar la parada del proceso para  $F$ ,  $idv(1)$  e  $idv(2)$ . La Fig. 3 muestra la evolución temporal del lazo de control  $xmv(6)$ - $xme(30)$ , el cual queda fuera de servicio

Table 4. Comparación del desempeño dinámico

Índice:	IEA	PME [%]	PME [%]
Estructura(s):	CN	EC <sub>2</sub> , CN	EC <sub>3</sub> , EC <sub>2</sub>
Perturbación, falla:	$idv(1, 2)$	$idv(1, 2), F$	$idv(1, 2), F$
$xme(1)$	4.14e+03	-9.85	9.24
$xme(2)$	2.19e+05	-312.74	41.19
$xme(3)$	1.65e+06	-12.34	11.06
$xme(4)$	2.45e+03	5.10	-1.64
$xme(7)$	2.79e+05	-588.30	9.17
$xme(17)$	1.30e+03	-373.64	44.58
$xme(30)$	4.21e+03	-2031.00	38.53
$xme_{G/H}$	2.05e+02	9.15	12.12
Costos operativos	2.49e+06	34.07	-11.91



**Fig. 4.** Evolución temporal de las variables: (a)  $xmv(3)$  y (b)  $xme(7)$

cuando la estructura CN es reconfigurada, es decir cuando se implementa  $EC_2$  en  $t = 11$  h. En dicha Fig. pueden observarse diferentes casos:

- Cuando no se considera la falla  $F$ , la estructura CN es capaz de atenuar el efecto de las perturbaciones  $idv(1)$  y  $idv(2)$  con un buen desempeño (Fig. 3.b). Para este caso,  $xmv(6)$  muestra una aceptable evolución sin saturaciones (Fig. 3.a), y  $xme(30)$  presenta offset nulo (Fig. 3.b).
- Otro escenario considera una falla caracterizada por una efectividad del 60% del actuador  $xmv(6)$  (esta falla se denomina aquí como  $F^*$ ). Puede observarse la saturación de  $xmv(6)$  producto de dicha reducción de efectividad (Fig. 3.a). Si bien las perturbaciones son rechazadas con pobre desempeño, no llega a producirse una parada del proceso.
- Por otro lado, el efecto de  $F$  (50% de reducción de efectividad en  $xmv(6)$ ) es similar al de  $F^*$ , pero en este caso se produce una parada de la planta luego de la ocurrencia de  $F$  ( $t = 10$  h.),  $idv(2)$  ( $t = 21$  h.) e  $idv(1)$  ( $t = 22$  h), dada la alta presión del reactor (ver Fig. 4.b).
- Cuando CN es reconfigurada, la  $xmv(6)$  deja de controlarse cuando se implementa  $EC_2$ . Como puede notarse, esta variable manipulada es llevada suavemente en modo manual del controlador hacia su valor de operación nominal (Fig. 3.a). Debe notarse el desempeño degradado de  $xme(30)$  consistente con el valor negativo del índice PME, ver Tabla 4. A pesar de ello,  $EC_2$  logra evitar la parada del proceso.

Por otro lado, una nueva simulación muestra que el desempeño del sistema mejora notablemente al implementar la estructura alternativa  $EC_3$  la cual involucra cinco lazos de control. Tal como se indica en la tabla 4, el índice IEA se reduce respecto a  $EC_2$  para la mayoría de las salidas. La solución  $EC_3$  presenta buen comportamiento regulador para las perturbaciones  $idv(1)$  y  $idv(2)$ , resultando una reducción del índice IEA para las salidas  $xme(20)$  y  $xme_{G/H}$ :  $PME(xme(20)) = 62.92\%$  y  $PME(xme_{G/H}) = 12.12\%$ , respectivamente.

## 5 Conclusiones

A partir del diseño e implementación del CTF propuesto se logró evitar una situación peligrosa que requeriría una parada de planta. Se mostró cómo una falla severa puede ser manejada satisfactoriamente al seleccionar un conjunto mínimo de redundancias e implementando la correspondiente estructura de control descentralizada. Su diseño se llevó a cabo fuera de línea, lo que reduce notablemente el tiempo necesario para reconfigurar la estructura nominal. Las funciones objetivo a minimizar se basan exclusivamente en información de estado estacionario del proceso. Además, el diseño de las estructuras resulta independiente del diseño de los controladores que las conforman. Diferentes técnicas y herramientas informáticas fueron integradas en un procedimiento de optimización multi-objetivo basado en algoritmo genético. Se trata de un procedimiento eficiente computacionalmente para la resolución de problemas combinatorios de gran dimensión, que permite sistematizar la búsqueda de soluciones candidatas.

## References

1. Zhang, Y., Jiang, J.: Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annu. Rev. Control.* 32(2), 229–252 (2008)
2. Jiang, J., Yu, X.: Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches. *Annu. Rev. Control.* 36, 60–72 (2012)
3. Jiang, J., Zhao, Q.: Design of Reliable Control Systems Possessing Actuator Redundancies. *J. Guid. Control Dynam.* 23(4), 709–718 (2000)
4. Luppi, P.A., Outbib, R., Basualdo, M.S.: Nominal Controller Design Based on Decentralized Integral Controllability in the Framework of Reconfigurable Fault-Tolerant Structures. *Ind. Eng. Chem. Res.* 54, 1301–1312 (2015)
5. Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S.N.: A review of process fault detection and diagnosis: Part III: Process history based methods. *Comput. Chem. Eng.* 27(3), 327–346 (2003)
6. Diwekar, U.M., Xu, W.: Improved Genetic Algorithms for Deterministic Optimization and Optimization under Uncertainty. Part I. Algorithms Development. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 7132–7137 (2005)
7. Downs, J.J., Vogel, E.F.: A plant-wide industrial process control problem. *Comput. Chem. Eng.* 17(3), 245–255 (1993)
8. Yu, C., Luyben, W.L.: Design of Multiloop SISO Controllers in Multivariable Processes. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 25, 498–503 (1986)
9. Zumoffen, D.A.R.: Oversizing analysis in plant-wide control design for industrial processes. *Comput. Chem. Eng.* 59, 145–155 (2013)
10. Sharifzadeh, M., Thornhill, N.: Optimal selection of control structure using a steady-state inversely controlled process model. *Comput. Chem. Eng.* 38, 126–138 (2012)
11. Kariwala, V., Cao, Y.: Branch and Bound method for multiobjective pairing selection. *Automatica.* 46, 932–936 (2010)
12. Skogestad, S., Postlethwaite, I.: *Multivariable feedback control. Analysis and design.* John Wiley & Sons (2005)