

Situación actual de los sistemas de diagnóstico y control tolerante a fallas basado en múltiples modelos

A. Aguilera-González, C. Morales-Morales, M. Adam-Medina, L.G. Vela-Valdés, C.M. Astorga-Zaragoza
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., México
adri.aguilera06e;cornelio;adam@cenidet.edu.mx

Resumen—En este trabajo se presenta una investigación bibliográfica en la que se busca resaltar las diferentes técnicas que son utilizadas para la solución de problemas de detección, diagnóstico y control tolerante a fallas en procesos a gran escala. Se consideran especialmente los enfoques de múltiples modelos y multi-control, que son conocidos como técnicas para superar las dificultades surgidas en los esquemas de modelado y control convencionales. Estos enfoques son útiles para los procesos industriales complejos; tienen la capacidad de manejar no linealidades, además de detectar fallas aprovechando la simplicidad de los sistemas lineales, durante todo el rango de operación.

Palabras clave: Múltiples modelos, FDD, FTCS.

I. INTRODUCCIÓN

La ingeniería de control se enfrenta a las tendencias actuales de la industria para la reducción de costos mientras mantiene o mejora la calidad del producto y garantiza su confiabilidad. Los sistemas hoy en día son cada vez más complejos y consideran un gran número de lazos de control coordinados por agentes autónomos, en este ámbito, la ingeniería de control tiende a la solución de problemas en procesos a gran escala, [Bahar et al., 2006], [Han, 2006], [Biswas et al., 2009], [Zavala et al., 2009].

Para los sistemas que requieren seguridad de alto nivel, como es el caso de las aeronaves, plantas nucleares y plantas químicas donde se realizan procesos peligrosos, es particularmente importante la implementación de un esquema de diagnóstico de fallas, [Blanke et al., 2001], [Mhaskar et al., 2006]. En este tipo de sistemas, la consecuencia de una falla en algún componente del sistema puede ser catastrófica, esto hace que se genere una demanda considerable en confiabilidad, seguridad y tolerancia a fallas, [Hecht et al., 1991], [Ballé et al., 1998], [Ramdani y Doghmane, 2006].

Algunas técnicas de detección y diagnóstico de fallas (FDD por sus siglas en inglés) han sido desarrolladas a partir del análisis de los cambios en las señales, donde las técnicas para el seguimiento y el diagnóstico de errores en sistemas dinámicos tienen lugar, [Gertler, 1998],

[Chen y Patton, 1999]. Otra posibilidad es mejorar la confiabilidad y la seguridad de las máquinas mediante la medición de señales de entrada y salida, las relaciones inherentes y la redundancia analítica pueden ser utilizadas para detectar y localizar fallas en forma temprana, [Basseville, 1988], [Isserman, 1993], [Boukhris et al., 1999].

Dentro de las técnicas de modelado dinámico se encuentra el enfoque de múltiples modelos [Murray-Smith et al., 1999], [Akhenak et al., 2004], [Ibeas et al., 2008], donde en algunos casos los observadores [Karný et al., 1999], [Theilliol et al., 2003], [Chetouani, 2008] y filtros de Kalman [Adam et al., 2003], [Deshpande y Patwardhan, 2008] han sido utilizados para generar residuos para la detección de fallas.

Otra forma de ver los esquemas multi-modelos es a través de los sistemas lineales piecewise (PWL) que son representados por un número finito de modelos lineales junto con un conjunto de reglas para conmutación, estos modelos causan una partición del espacio de estado en celdas, lo que los convierte en una herramienta útil para modelar un amplio rango de sistemas no lineales, particularmente eléctricos y mecánicos [Besson et al., 1994], [Slupphaug y Foss, 1998].

Esta contribución presenta una síntesis del diagnóstico de fallas y de los sistemas de control tolerantes a fallas usando un enfoque de múltiples modelos, estudiando sus ventajas sobre otras técnicas de modelado, como herramienta de diagnóstico y de control tolerante a fallas.

Este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la Sección II se describe la técnica de múltiples modelos. En la Sección III se describen algunos esquemas y estrategias de control basados en múltiples modelos. En la Sección IV se citan algunos procedimientos de diagnóstico de fallas y trabajos que se desarrollan con este esquema; la Sección V describe algunas generalidades acerca de investigaciones sobre del control tolerante a fallas y la

reconfiguración de los procesos; en la Sección VI se citan algunas aplicaciones. Finalmente en la Sección VII se presentan las conclusiones de esta investigación bibliográfica.

II. MODELADO

Los modelos matemáticos que representan los sistemas de la vida real, son de gran importancia para la comprensión del comportamiento de los procesos. Desde el punto de vista de control, es de gran interés el modelado para poder elegir las herramientas que el sistema necesita para dar cumplimiento a los objetivos de operación.

Una suposición generalizada es la linealidad del sistema, sin embargo esta hipótesis sólo es válida para una región restringida en torno a un punto de operación. Estos modelos son a menudo inexactos pero sencillos, en cambio los modelos que reflejan con más precisión el comportamiento del sistema son complejos, es decir, representan a los sistemas no lineales que muestran la naturaleza compleja de la planta. Con el fin de representar adecuadamente el sistema manteniendo el compromiso entre la precisión en la descripción y la versatilidad de su implementación, un enfoque basado en varios modelos lineales (multi-modelos) ha sido desarrollado [Murray-Smith et al., 1999], [Tayebi y Zaremba, 2002].

II-A. Representación de los sistemas

Los esquemas multi-modelos lineales han sido comúnmente utilizados para resolver los problemas de representación de los sistemas [Adam et al., 2003], [Diao y Passino, 2002], [Nandola y Bhartiya, 2008], [Orjuela et al., 2009]. Este enfoque consiste en la descomposición de la región de operación del proceso en una serie de regímenes de funcionamiento, cada uno comprende un modelo local al cual es posible aplicarle una ley de control, [Narendra y Xiang, 2000], [Messaud et al., 2008].

El enfoque de múltiples modelos ha sido utilizado recientemente para el modelado y control de sistemas no lineales [Murray-Smith et al., 1999], [Tayebi y Zaremba, 2002], [Ramdani y Doghmane, 2006]. Este esquema representa una estructura modular que evalúa el sistema con respecto a un conjunto de modelos. El seguimiento de un índice de desempeño permite determinar el comportamiento del sistema a partir de los modelos individuales en cada punto de operación.

La descripción de un sistema no lineal a partir de la técnica multi-modelos, se logra principalmente por dos enfoques: el primero, cuando se conocen o se obtienen los puntos de operación, se construyen los modelos lineales y se implementan esquemas de diagnóstico y control, [Bhagwat et al., 2003], [Wang et al., 2007], [Chetouani, 2008]. El segundo, es cuando las fallas se conocen, es decir, se tiene un modelo de referencia y

un conjunto de modelos con falla, [Athans et al., 2005], [Böling et al., 2008].

II-B. Funciones de ponderación

En los esquemas multi-modelos, la conmutación entre los modelos debe ser eficiente y sin pérdida de información. Por precisión, si existe un gran número de modelos lineales se tiene una mejor representación del sistema, sin embargo, la conmutación entre un modelo y otro se vuelve más compleja. Cada submodelo es válido en una zona de funcionamiento y un modelo global se obtiene a través de un mecanismo de interpolación, [Basseville, 1988], [Chen y Patton, 1999].

Entonces, se debe determinar el modelo lineal que mejor representa al sistema en un punto de operación, o la contribución de cada modelo en cada instante de tiempo. Esto se logra a través del cálculo de la distribución de probabilidad teniendo en cuenta que cada residuo sigue una ley de distribución Gaussiana, [Adam et al., 2003], [Akhenak et al., 2004]; este algoritmo permite obtener el modelo global tanto en el caso con fallas como libre de ellas, lo que permite determinar el punto en el que el sistema está en evolución.

También se considera el vector residual para determinar la probabilidad de cada modelo lineal (validez), teniendo en cuenta la medición anterior de acuerdo con la teoría de probabilidad de Bayes. Entonces, por definición, un modelo válido es el modelo que tiene la mayor probabilidad dentro del conjunto [Roumeliotis et al., 1998], [Banerjee et al., 2000].

Otro método utiliza el conocimiento *a priori* sobre el modo de las probabilidades de transición que es representado por una cadena de Markov, es decir, la transición de un modelo a otro es descrita por un proceso regido por una matriz Markoviana conocida, [Blom y Bar-Shalom, 1988], [Hocine et al., 2006], [Giovannini et al., 2006]. Existen otros métodos para definir las funciones de ponderación en los sistemas multi-modelos, sin embargo, las técnicas aquí presentadas se consideran las más representativas.

II-C. Estabilidad

La estabilidad es uno de los primeros requerimientos en cualquier sistema de control. La presencia de fallas puede llevar a la disminución del desempeño, a la inestabilidad del sistema o a la pérdida del proceso. En los multi-modelos, este criterio abordado en términos de estabilidad de Lyapunov cuadrática utilizando una matriz lineal de desigualdad (LMI), [Hocine et al., 2006], [Rodrigues et al., 2008]. Otra forma de garantizar la estabilidad es a través del teorema de pequeñas ganancias, donde se establece que un sistema en lazo cerrado es estable siempre que el lazo de ganancia (medida por una

norma) sea inferior a la unidad, [Leith y Leithead, 2000].

La técnica de múltiples modelos lineales, es una herramienta útil para hacer frente a la problemática de representación de los sistemas, facilitando la tarea de FDI (Fault Detection and Isolation). Con el fin de llevar a cabo el monitoreo y control de procesos industriales, se han venido desarrollando algunas combinaciones de estrategias control, FDI y FTC (Fault Tolerant Control) [Gatzke y III, 2002], [Wang y Lum, 2006], [Ru y Li, 2008], que son descritas a continuación:

III. TÉCNICAS DE CONTROL APLICANDO EL ENFOQUE DE MÚLTIPLES MODELOS

Algunas técnicas de control que emplean el enfoque de múltiples modelos, han encontrado soluciones a problemáticas entre las que se encuentran: representación de sistemas no lineales, modelado de incertidumbres y perturbaciones, entre otras. Además, los problemas de control en sistemas dinámicos surgen principalmente en el control de los sistemas mecánicos multi-cuerpo, circuitos eléctricos y sistemas heterogéneos, donde diferentes modelos se acoplan juntos, [Maherzi et al., 2007], [Azhmyakov et al., 2008], [Buchstaller y French, 2008].

En el enfoque de múltiples modelos, un método de control llamado *cambio y ajuste por multi-modelos* (MMST, Multiple Model Switching and Tuning) permite conmutar a una ley de control pre-calculada correspondiente a una situación (ó falla) dada, de esta forma cada escenario es descrito por un par modelo-controlador, [Narendra et al., 1995], [Pishvaie y Shahrokhi, 2000].

Un sistema de control que utiliza el enfoque MMST se propone en [Pishvaie y Shahrokhi, 2000] para el control de pH, este proceso es conocido por ser un problema difícil de controlar debido a su naturaleza altamente no lineal. Otro ejemplo de control usando este enfoque es presentado por [Giovanini et al., 2006], donde el objetivo es diseñar para cada modelo, una ley de control predictivo que garantice la estabilidad del sistema en lazo cerrado; los resultados son mostrados mediante simulaciones de un reactor de tanque agitado continuo (en inglés CSTR).

Una arquitectura de control adaptable es llamada SMMAC (Switching Multiple-Model Adaptive Control), que opera con un número finito de modelos, cada uno de ellos emplea un observador para la estimación de parámetros, de tal forma que la salida del observador en comparación con la planta real proporciona una señal de monitoreo que indica el modelo que mejor representa el sistema, y así un selector proporciona el controlador (del banco de controladores) que debe entrar en operación, [Lourenco y Lemos, 2006].

En otros trabajos enfocados a control se aplica la arquitectura MMAC (Multiple Model Adaptive Control), [Maybeck, 1999], [Lee, 2006], [Kuipers y Ioannou, 2008], [Zhang et al., 2008], donde se busca controlar sistemas sometidos a incertidumbres multiplicativas y perturbaciones acotadas; aquí cada modelo representa un tipo de perturbación el cual es comparado con el sistema nominal y se determina el control que debe ser aplicado. Entonces, se tiene un sistema de multi-controladores adaptables *mezclados* dentro de un conjunto conducido por una ley adaptable robusta que es capaz de elegir de dicho conjunto, la ley de control candidata a ser utilizada.

El control por modos deslizantes es una técnica del control no lineal aplicado a sistemas donde el modelo de la planta original es incierto. En este esquema se construye un conjunto finito de modelos dinámicos de tal manera que cada uno describe una incertidumbre en particular, [Poznyak et al., 2003], [Mihoub et al., 2009].

Trabajos que utilizan un banco de controladores, donde a cada modelo le es asignado un controlador adaptable que funciona con base en la selección del mejor modelo (y del mejor controlador) para las condiciones actuales de funcionamiento del sistema son expuestos en [Athans et al., 2005], [Habibi et al., 2006]. Para el adecuado funcionamiento de sistemas sometidos a perturbaciones, [Böling et al., 2008] propone que el sistema sea representado por un banco de modelos que incluyen diferentes magnitudes de las perturbaciones y distintos valores de parámetros.

IV. DIAGNÓSTICO DE FALLAS: ENFOQUE DE MÚLTIPLES MODELOS

Diferentes estudios sobre enfoques de FDD han sido desarrollados basados en modelos lineales o linealizados alrededor de algún punto de operación, por lo que varios trabajos reportados han dado lugar a esquemas FDI sofisticados considerando la presencia o ausencia de ruido dentro del modelado [Frank y Ding, 1997], [Chen y Patton, 1999], [Alcorta, 2002], y más recientemente en trabajos de [Campos et al., 2008], [Huang y Tan, 2009].

Cuando el rango de operación del proceso llega a ser mayor al modelo linealizado, la dinámica del sistema no es representada de forma completa. Una alternativa de solución a este problema es el uso de métodos como los observadores no lineales bajo enfoques analíticos [Alcorta y Frank, 1997] y geométricos [De-Persis y Isidori, 2001], donde se requiere de un conocimiento preciso de la planta. Este requerimiento ha sido resuelto en algunos casos usando redes neuronales [Narendra et al., 1995] y lógica difusa [Uppal et al., 2006], [El-Koujok et al., 2008].

Sin embargo, considerar métodos no lineales resulta complejo por lo que varios autores han considerado dividir el fenómeno en diferentes regiones de operación. Bajo este esquema han sido propuestos algoritmos de control basado en modelos LTI (linear time invariant) y LPV (linear parameter variant) entre otros, reportados en [Gharieb et al., 1991], [Foss y Cong, 1999], [Murray-Smith et al., 1999]. No obstante, en el contexto de FDI no habían sido considerados, hasta que autores como [Diao y Passino, 2002], [Adam et al., 2003], [Orjuela et al., 2009] lo proponen como un nuevo esquema de diagnóstico de fallas para el caso de sistemas no lineales. En este ámbito, el sistema de diagnóstico de fallas posee la capacidad de detectar fallas múltiples que se presenten en forma simultánea o secuencial.

La efectividad de la estrategia fue desarrollada para diagnóstico de fallas y control en sistemas industriales reales [Bhagwat et al., 2003], [Athans et al., 2005]. En caso de fallas, el trabajo de [Rodrigues et al., 2005] utiliza observadores politópicos de entradas desconocidas como estrategia FDI. Otro trabajo es reportado en [Niemann et al., 2007], donde consideran cambios en las condiciones de operación; otros combinan técnicas de filtros de Kalman con observadores a lazo abierto para detectar fallas en procesos químicos [Bhagwat et al., 2003], [Chetouani, 2008]. A fin de ilustrar algunas técnicas de diagnóstico de fallas con múltiples modelos se presenta el esquema siguiente (ver Figura 1):

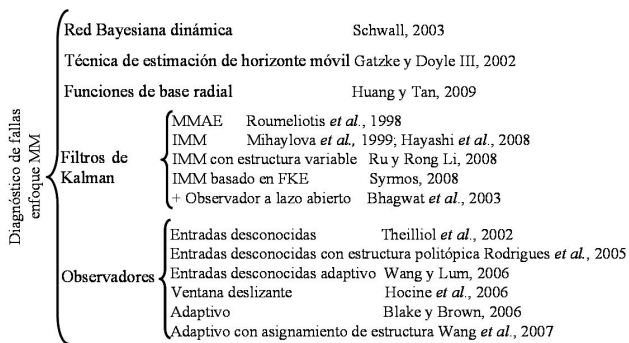


Figura 1. Diagnóstico de fallas y múltiples modelos.

V. CONTROL TOLERANTE A FALLAS

Paralelo al campo de FDD, las investigaciones acerca del control tolerante a fallas y la reconfiguración de los procesos han incrementado progresivamente. A partir de la década de los 80's empieza a darse importancia a la seguridad en sistemas de control, especialmente se vieron aplicaciones en aeronavegación [Montoya et al., 1983], [Motyca et al., 1985], [Varga, 1996]; pero fue realmente a partir de la siguiente década cuando más trabajos sobre FTCS (Fault Tolerant Control Systems) han surgido, [Patton, 1997], [Polycarpou y Vemurij, 1998],

[Rodrigues et al., 2006], [Hallouzi y Verhaegen, 2007].

Investigaciones sobre control reconfigurable han sido llevadas a cabo de tal forma que la mayoría de estrategias de FDD se han desarrollado como un instrumento de control. En el trabajo de [Benosman y Lum, 2008], se presenta un esquema donde el módulo FDD detecta y proporciona en tiempo real, un modelo del sistema con falla para posteriormente aplicar la estrategia de reconfiguración del controlador, que se realiza a través del método MPC (Model Predictive Control). Otro trabajo que utiliza MPC como técnica de control tolerante a fallas es presentado por [Miksch et al., 2008], donde el controlador predictivo es probado en fallas de los actuadores.

Uno de los tópicos más importantes en los FTCS, es recobrar el desempeño del sistema original después de que ha ocurrido una falla, o evaluar las consecuencias de la degradación y el tiempo durante el cual el sistema soportaría funcionar en este régimen. También las acciones correctivas que deben ser desarrolladas de forma paralela para poder recuperar la funcionalidad completa del sistema, [Steinberg, 2005], [Guenab, 2007].

En la práctica, cuando ocurre una falla en un sensor el desempeño del sistema original puede ser recuperado siempre y cuando encuentre la información completa en otra parte, ya sea de otros sensores lo que es llamado *redundancia física* (instrumentos que miden la misma variable [Johnson et al., 1988]), o de observadores o filtros de Kalman dedicados a estimar dichas variables en paralelo a los instrumentos, *redundancia analítica* [Theilliol et al., 2002], [Boskovic et al., 2008].

Sin embargo, cuando un actuador falla el grado de redundancia de control del sistema y las capacidades disponibles del actuador se ven reducidas; si el desempeño del sistema debe mantenerse, los actuadores restantes están forzados a trabajar por encima de sus tareas habituales para compensar el actuador que falló; para este caso la solución del problema está limitada a las capacidades físicas del instrumento [Eun et al., 2001].

Algunos métodos para diseñar sistemas de control que operen con desempeño degradado han sido desarrollados fundamentados en técnicas con base en modelos simples o estrategias de múltiples modelos [Zhang y Jiang, 2001], [Paul et al., 2005], [Rodrigues et al., 2008], [Guan y Yang, 2008], [Jung et al., 2009]. En este contexto, un conjunto de modelos lineales bajo la influencia de una falla predefinida es presentado en [Yamé y Kinnaert, 2003], posteriormente un controlador es sintetizado para cada modelo y, son seleccionados de acuerdo a la dinámica; aquí cada modelo existe para una única falla y cada controlador está activo en un momento dado.

VII. CONCLUSIONES

Otro esquema de control tolerante a fallas basado en múltiples modelos usa MMST generando un banco de pruebas ideal para la evaluación de tecnologías avanzadas de tolerancia a fallas, adaptación y estrategias de control reconfigurable. Este enfoque evalúa posibles escenarios de falla utilizando múltiples observadores, [Boskovic et al., 2008].

La Figura 2 muestra otro enfoque desarrollado en caso de fallas usando observadores de estado politépicos de entradas desconocidas [Rodrigues et al., 2005] donde, una estrategia FDI se realiza teniendo en cuenta la ponderación de funciones de peso que determinan la contribución de cada modelo según esté funcionando el sistema.

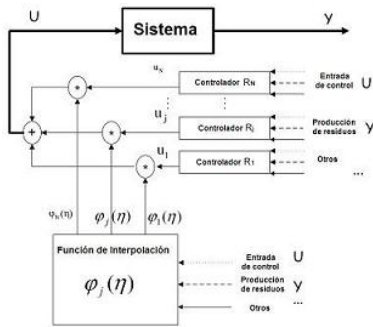


Figura 2. Esquema de control usando multi-modelos.

VI. CAMPOS DE APLICACIÓN

Muchos de los esquemas citados en el presente documento bajo el enfoque de múltiples modelos en el contexto de control, diagnóstico de fallas y control tolerante a fallas, han sido aplicados en modelos de procesos tanto químicos, industriales, como a sistemas de aeronavegación, satélites, máquinas eléctricas, entre otros. En la Figura 3 se presenta un esquema con algunas aplicaciones.

Aplicaciones / Esquemas	Aviación	Procesos	Autos, Robótica, Tres tanques, etc..
Control	Varga, 1996	Pishvaie and Shahrokhi, 2000; Mihoub et al., 2009; Foss y Cong, 1999; Zeng et al., 2008; Porfirio et al., 2003; Mazinan and Sadati, 2008; Giovanini et al., 2006;	Roumeliotis et al., 1998; Lei et al., 2009; Lee, 2006; Nandola y Bhartiya, 2008
FDD	Wang and Lum, 2006; Ru and Rong Li, 2008; Wang et al., 2007	Bhagwat et al., 2003; Gatzke y Doyle III, 2002; Chetouani, 2008; Deshpande and Patwardhan, 2008; Coghill et al., 1998;	Schwall, 2003; Hayashi et al., 2008; Theilliol et al., 2002; Rodrigues, 2005; Rodrigues et al., 2008; Niemann et al., 2007; Orjuela et al., 2009; Adam et al., 2003
FTC	Hallouzi y Verhagen, 2007; Jung et al., 2009	Guan and Yang, 2008	Theilliol et al., 2008; Rodrigues et al., 2006; Bosković et al., 2008;

Figura 3. Aplicaciones MM/FDD/FTC.

Desarrollar métodos de detección y estimación en línea de las fallas, requiere implementar esquemas robustos a perturbaciones e incertidumbres en el modelado con el fin de evitar falsas alarmas y la no detección. Precisamente, uno de los principales usos del enfoque de múltiples modelos es motivado por la necesidad de una estimación precisa de los estados para sistemas dinámicos sujetos a importantes incertidumbres en los parámetros. Este esquema permite tomar en cuenta los diferentes tipos de fallas que intervienen sobre el sistema y asegurar la fiabilidad de la información para activar el mecanismo de reconfiguración en un tiempo mínimo.

Una reseña bibliográfica acerca del enfoque de múltiples modelos ha sido presentada en este documento. Algunos problemas abiertos e investigaciones recientes en materia de diagnóstico de fallas y control tolerante fueron discutidos, con el fin de identificar estrategias de control, FDD y FTC aún no exploradas, que puedan ser desarrolladas y aplicadas a sistemas dinámicos y procesos principalmente.

REFERENCIAS

[Adam et al., 2003] Adam, M.; Rodrigues, M.; Theilliol, D.; y Jamouli, H. (2003). "Fault diagnosis in nonlinear systems through an adaptive filter under a convex set representation". *The 7th European Control Conference ECC'03*.

[Akhenak et al., 2004] Akhenak, A.; Chadli, M.; Maquin, D.; y Ragot, J. (2004). "State estimation of uncertain multiple model with unknown inputs". In IEEE, editor, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3563–3568, Paradise Island, Bahamas.

[Alcorta, 2002] Alcorta, E. (2002). "Diagnóstico de fallas usando observadores no lineales: un caso de estudio". *Ingenierías*, 5(16), pp. 38–43.

[Alcorta y Frank, 1997] Alcorta, E. y Frank, P. (1997). "Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey". *Control Engineering Practice*, 5(5), pp. 663–670.

[Athans et al., 2005] Athans, M.; Fekri, S.; y Pascoal, A. (2005). "Issues on robust adaptive feedback control". In *16th IFAC World Congress, International Federation of Automatic Control*, pages 9–39, Prague, Czech Republic.

[Azhmyakov et al., 2008] Azhmyakov, V.; Boltyanski, V.; y Poznyak, A. (2008). "On the Dynamic Programming Approach to Multi-Model Robust Optimal Control Problems". In *American Control Conference*, Seattle, Washington, USA.

[Bahar et al., 2006] Bahar, A.; Güner, E.; Ozgen, C.; y Halici, U. (2006). "Design of the state estimators for the inferential control of and industrial distillation column". In IEEE, editor, *International Joint Conference on Neural Networks*, pages 1112–1115, Vancouver, Canadá.

[Ballé et al., 1998] Ballé, P.; Fisher, M.; Füssel, D.; Nelles, O.; y Isermann, R. (1998). "Integrated control, diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger". *Control Systems Magazine, IEEE*, pages 52–63.

[Banerjee et al., 2000] Banerjee, A.; Arkun, Y.; Pearson, R.; y Ogunnaike (2000). "H ∞ control of nonlinear processes using multiple linear models". In *Proceedings of the European control conference*, pages 2671–2676, Roma, Italy.

[Basseville, 1988] Basseville, M. (1988). "Detecting changes in signals and systems - A survey". *Automatica*, 24(2), pp. 309–326.

[Benosman y Lum, 2008] Benosman, M. y Lum, Y. (2008). "On-line references reshaping and control reconfiguration for non-minimum phase nonlinear fault tolerant control". In IFAC, editor, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pages 2563–2569, Seoul, Korea.

[Besson et al., 1994] Besson, V.; Pettit, L.; y Wellstead, P. (1994). "Representing Piecewise Linear Systems for Analysis and Simulation". In *Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications*, pages 1815–1820, California, USA.

- [Bhagwat et al., 2003] Bhagwat, A.; Srinivasan, R.; y Krishnaswamy, P. (2003). "Multi-linear model-based fault detection during process transitions". *Chemical Engineering Science*, 58(9), pp. 1649–1670.
- [Biswas et al., 2009] Biswas, P.; Ray, S.; y Samanta, A. (2009). "Nonlinear control of high purity distillation column under input saturation and parametric uncertainty". *Journal of Process Control*, 19, pp. 75–84.
- [Blanke et al., 2001] Blanke, M.; Staroswiecki, M.; y Wu, N. (2001). "Concepts and Methods in Fault-tolerant Control". In IEEE, editor, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA, USA.
- [Böling et al., 2008] Böling, J.; Gustafsson, T.; y Häggblom, K. (2008). "Output-Error Criteria in Multi-Model Adaptive Control with Experimental Application to pH Control". In IEEE, editor, *17th IEEE International Conference on Control Applications and IEEE Multi-conference on Systems and Control*, pages 769–774, San Antonio, Texas, USA.
- [Blom y Bar-Shalom, 1988] Blom, H. y Bar-Shalom, Y. (1988). "The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 33(8), pp. 780–783.
- [Boskovic et al., 2008] Boskovic, J.; Jackson, J.; y Mehra, R. (2008). "Multiple Model-based Adaptive Fault-Tolerant Control of Delta Clipper Experimental (DC-X) Planetary Lander". In AIAA, editor, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, pages 1–22, Honolulu, Hawaii.
- [Boukhris et al., 1999] Boukhris, A.; Mourot, G.; y Ragot, J. (1999). "Sensor fault diagnosis for urban sewer network management". In *The 3rd IMACS IEEE International Multiconference on: Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 1999) Proceedings*, pages 4291–4297, ATHENS, GREECE.
- [Buchstaller y French, 2008] Buchstaller, D. y French, M. (2008). "Gain Bounds for Multiple Model Switched Adaptive Control of General MIMO LTI Systems". In 2008, editor, *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 5330–5335, Cancún, México.
- [Campos et al., 2008] Campos, D.; Palacios, E.; y Espinoza, D. (2008). "Fault detection, isolation, and accommodation for LTI systems based on GIMC structure". *Journal of Control Science and Engineering*, 2008(1).
- [Chen y Patton, 1999] Chen, J. y Patton, R. (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, U.S.A.
- [Chetouani, 2008] Chetouani, Y. (2008). "Design of a Multi-Model Observer-Based Estimator for Fault Detection and Isolation (FDI) Strategy: Application to a Chemical Reactor". *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 25(04), pp. 777–788.
- [De-Persis y Isidori, 2001] De-Persis, C. y Isidori, A. (2001). "A geometric approach to nonlinear fault detection". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(6), pp. 853–865.
- [Deshpande y Patwardhan, 2008] Deshpande, P. y Patwardhan, C. (2008). "Online Fault Diagnosis in Nonlinear Systems Using the Multiple Operating Regime Approach". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(17), pp. 6711–6726.
- [Diao y Passino, 2002] Diao, Y. y Passino, K. (2002). "Intelligent fault-tolerant control using adaptive and learning methods". *Control Engineering Practice*, 10(8), pp. 801–817.
- [El-Koujok et al., 2008] El-Koujok, M.; Gouriveau, R.; y Zerhouni, N. (2008). "Development of a prognostic tool to perform reliability analysis". In *Proceedings of the European Safety and Reliability and Risk Analysis Conference and 17th SRA-EUROPE*, Valencia, Spain.
- [Eun et al., 2001] Eun, Y.; Gokcek, C.; Kabamba, P.; y Meerkov, S. (2001). "Selecting the level of actuator saturation for small performance degradation of linear designs". In IEEE, editor, *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, volume 2, pages 1769–1774, Orlando, Florida, USA.
- [Foss y Cong, 1999] Foss, B. y Cong, S. (1999). "Nonlinear MPC based on multi-model for distillation columns". In *Proceedings of 14th IFAC World Congress*, number 7, pages 337–342, Beijing, China.
- [Frank y Ding, 1997] Frank, P. y Ding, X. (1997). "Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems". *Journal of Process Control*, 7(6), pp. 403–424.
- [Gatzke y III, 2002] Gatzke, E. P. y III, F. J. D. (2002). "Use of Multiple Models and Qualitative Knowledge for On-Line Moving Horizon Disturbance Estimation and Fault Diagnosis". *Journal of Process Control*, 12, pp. 339–352.
- [Gertler, 1998] Gertler, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. Marcel Dekker, New York, 1 edition.
- [Gharieb et al., 1991] Gharieb, W.; Chai, P.; Binder, Z.; y David, B. (1991). "Expert Multimodel Location Diagnosis". *IMACS Symposium MCTS, Diagnostic et sûreté fonctionnement*, 2(1), pp. 37–49.
- [Giovannini et al., 2006] Giovannini, L.; Ordys, A.; y Grimble, M. (2006). "Adaptive Predictive Control using Multiple Models, Switching and Tuning". *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 4(6), pp. 669–681.
- [Guan y Yang, 2008] Guan, W. y Yang, G. H. (2008). "Adaptive Fault-Tolerant Control of Linear Systems in the Presence of Actuator Saturation and L2-Disturbances". In *Control and Decision Conference*, pages 2973–2982.
- [Guenab, 2007] Guenab, F. (2007). *Contribution aux systèmes tolérants aux défauts : Synthèse d'une méthode de reconfiguration et/ou de restructuration intégrant la fiabilité des composants*. PhD thesis, Université Henri Poincaré, Centre de Recherche en Automatique de Nancy, Nancy 1, Vandoeuvre-Les-Nancy, France.
- [Habibi et al., 2006] Habibi, J.; Moshiri, B.; y Sedigh, A. (2006). "Performance Benefits of Hybrid Control Design for Switched Linear Systems". In ICASE, editor, *SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 920–925, Bexco, Busan, Korea.
- [Hallouzi y Verhaegen, 2007] Hallouzi, R. y Verhaegen, M. (2007). "Reconfigurable Fault Tolerant Control of a Boeing 747 using Subspace Predictive Control". In *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*.
- [Han, 2006] Han, M. (2006). "Nonlinear model based control of two-product reactive distillation column". In *SICE-ICASE International Joint Conference*, pages 3320–3323, Bexco, Busan, Korea.
- [Hecht et al., 1991] Hecht, M.; Agron, J.; Hecht, B.; y Kim, K. (1991). "A distributed fault tolerant architecture for nuclear reactor and other critical process control applications". In IEEE, editor, *21th International Symposium on Fault-Tolerant Computing*, pages 462–498, Montreal, Québec, Canada.
- [Hocine et al., 2006] Hocine, A.; Chadli, M.; Maquin, D.; y Ragot, J. (2006). "A discrete-time Sliding Window Observer for Markovian Switching System". In IEEE, editor, *45th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2661–2666, San Diego, CA, USA.
- [Huang y Tan, 2009] Huang, S. y Tan, K. (2009). "Fault Detection and Diagnosis Based on Modeling and Estimation Methods". *IEEE Transactions on Neural Networks*, 20(5), pp. 872–881.
- [Ibeas et al., 2008] Ibeas, A.; Balaguer, P.; Vilanova, R.; y Pedret, C. (2008). "On-Line Model Selection Techniques By Using Multiple Models And Supervision Algorithms". In IEEE, editor, *IEEE International Symposium on Intelligent Control and IEEE Multi-conference on Systems and Control*, pages 631–636, San Antonio, Texas, USA.
- [Isserman, 1993] Isserman, R. (1993). "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing : tutorial paper : Fault detection, supervision and safety for technical processes". *Automatica*, 29(4), pp. 815–835.
- [Johnson et al., 1988] Johnson, B.; Aylor, J.; y Hana, H. (1988). "Efficient use of time and hardware redundancy for concurrent error detection in a 32-bit VLSI adder". *Journal of Solid-State Circuits, IEEE*, 23(1), pp. 208–215.
- [Jung et al., 2009] Jung, B.; Kim, Y.; y Ha, C. (2009). "Fault Tolerant Flight Control System Design Using a Multiple Model Adaptive Controller". volume 223, pages 39–50.
- [Karný et al., 1999] Karný, M.; Nagy, I.; y Nonovicová, J. (1999). "Quasi-Bayes Approach to Multi-Model Fault Detection and Isolation". *Journal of Adaptive Control and Signal Processing*.
- [Kuipers y Ioannou, 2008] Kuipers, M. y Ioannou, P. (2008). "Multiple Model Adaptive Control With Mixing: A Pedagogical Example". In IEEE, editor, *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 3239–3244, Cancún, México.
- [Lee, 2006] Lee, C. E. (2006). "Adaptive Control of a Class of Nonlinear Systems Using Multiple Parameter Models". *International Journal of Control, Automation and Systems*, pages 428–437.
- [Leith y Leithead, 2000] Leith, D. y Leithead, W. (2000). "Survey of gain-scheduling analysis and design". *International Journal of Control*, 73(11), pp. 1001–1025.
- [Lourenco y Lemos, 2006] Lourenco, J. y Lemos, J. (2006). "Learning in multiple model adaptive control switch". *Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE*, 9(3), pp. 24–29.

- [Maherzi et al., 2007] Maherzi, E.; M.Besbes; Ellouze, M.; y Mhiri, R. (2007). "Polyquadratic stabilization of a multi-inputs multimodel with quantified commands". *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 1(4), pp. 344–349.
- [Maybeck, 1999] Maybeck, P. (1999). "Multiple model adaptive algorithms for detecting and compensating sensor and actuator/surface failures in aircraft flight control systems". *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9(14), pp. 1050–1070.
- [Messaoud et al., 2008] Messaoud, A.; Ltaief, M.; y Abdennour, R. (2008). "Partial Predictors for the Supervision of a Multimodel Direct Generalized Predictive Control of Highly Non Stationary Systems". In IEEE, editor, *IEEE American Control Conference*, pages 459–464, Seattle, Washington, USA.
- [Mhaskar et al., 2006] Mhaskar, P.; Gani, A.; El-Farra, N.; McFall, C.; Christofides, P.; y Davis, J. (2006). "Integrated Fault-Detection and Fault-Tolerant Control of Process Systems". *Journal of American Institute of Chemical Engineers*, 52(6), pp. 2129–2148.
- [Mihoub et al., 2009] Mihoub, M.; Nouri, A.; y Abdennour, R. (2009). "A real time application of discrete second order sliding mode control to a semi-batch reactor: a multimodel approach". *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 6(2), pp. 156–163.
- [Miksch et al., 2008] Miksch, T.; Gambier, A.; y Badreddin, E. (2008). "Real-time Implementation of Fault-tolerant Control Using Model Predictive Control". In IFAC, editor, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, pages 11136–11141, Seoul, Korea.
- [Montoya et al., 1983] Montoya, R.; Howell, W.; Bundick, W.; Ostroff, W.; Hueschen, A.; y Belcastro, R. (1983). "Restructurable controls". In NASA, editor, *Technical Report NASA CP-2277. Proceedings of a workshop held at NASA Langley Research Center*, Hampton V.A., USA.
- [Motyca et al., 1985] Motyca, P.; Bonnice, W.; Hall, S.; y Wagner, E. (1985). "The Evaluation of Failure Detection and Isolation Algorithms for Restructurable Control". In NASA, editor, *NASA Contractor Report 177983, The Charles Stark Draper Laboratory, INC.*, Cambridge, Massachusetts, USA.
- [Murray-Smith et al., 1999] Murray-Smith, R.; Johansen, T.; y Shorten, R. (1999). "On Transient Dynamics, Off-Equilibrium Behaviour and Identification in Blended Multiple Model Structures". In Frank, P. M., editor, *5th European Control Conference*, Karlsruhe, Germany.
- [Nandola y Bhartiya, 2008] Nandola, N.N. y Bhartiya, S. (2008). "A multiple Model Approach for Predictive Control of Nonlinear Hybrid Systems". *Journal of Process Control*, 18, pp. 131–148.
- [Narendra et al., 1995] Narendra, K.; Balakrishnan, J.; y Kernal (1995). "Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning". *IEEE Control Systems Magazine*, 15(3), pp. 37–51.
- [Narendra y Xiang, 2000] Narendra, K. y Xiang, C. (2000). "Adaptive control of discrete-time systems using multiple models". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(9), pp. 1669–1686.
- [Niemann et al., 2007] Niemann, H.; Poulsen, N.; y Buur, M. (2007). "A Multi-Model Approach for System Diagnosis". In IEEE, editor, *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, pages 2539–2544, New York City, USA.
- [Orjuela et al., 2009] Orjuela, R.; Marx, B.; Ragot, J.; y Maquin, D. (2009). "Une approche multimodèle pour le diagnostic des systèmes non linéaires". In *2ème Workshop Surveillance, Sûreté et Sécurité des Grands Systèmes*, Nancy, France.
- [Patton, 1997] Patton, R. (1997). "Fault tolerant control: The 1997 situation". *International Federation of Automatic Control IFAC Safeprocess*, 5(5), pp. 1033–1055.
- [Paul et al., 2005] Paul, B.; Kang, K.; Kufuoglu, H.; y Roy, M. A. K. (2005). "Impact of NBTI on the Temporal Performance Degradation of Digital Circuits". *IEEE Electron Device Letters*, 26(8), pp. 560–562.
- [Pishvaie y Shahrokhii, 2000] Pishvaie, M. y Shahrokhii, M. (2000). "pH Control Using the Nonlinear Multiple Models, Switching, and Tuning Approach". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 39(5), pp. 1311–1319.
- [Polycarpou y Vemurij, 1998] Polycarpou, M. y Vemurij, A. (1998). "Learning Approach to Fault Tolerant Control: An Overview". *Proceedings of the 1998 IEEE ISIC, CIRA, ISAS Joint Conference*, pages 157–162.
- [Poznyak et al., 2003] Poznyak, A.; Fridman, L.; y Bejarano, F. (2003). "Mini-Max Integral Sliding Mode Control for hft multimodel Linear Uncertain Systems". In IEEE, editor, *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, pages 2988–2993, Maui, Hawaii USA.,
- [Ramdani y Doghmane, 2006] Ramdani, M. y Doghmane, N. (2006). "Fault Diagnosis of Technical Processes Based on the Multi-Model Approach". *sian Journal of Information Technology*, 4(10), pp. 1166–1171.
- [Rodrigues et al., 2008] Rodrigues, M.; Theilliol, D.; Adam, M.; y Sauter, D. (2008). "A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models". *Control Engineering Practice*, (16), pp. 225–239.
- [Rodrigues et al., 2005] Rodrigues, M.; Theilliol, D.; y Sauter, D. (2005). "Design of an active fault tolerant control and polytopic unknown input observer for systems described by a multi-model representation". *Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2005. CDC-ECC '05. 44th IEEE*, pages 3815–3820.
- [Rodrigues et al., 2006] Rodrigues, M.; Theilliol, D.; y Sauter, D. (2006). "Fault Tolerant Control Design for Switched Systems". In *2nd IFAC Conf. on Analysis and Design of Hybrid Systems*, pages 223–228.
- [Roumeliotis et al., 1998] Roumeliotis, S. I.; Sukhatme, G. S.; y Bekey, G. A. (1998). "Sensor Fault Detection and Identification in a Mobile Robot". In IEEE, editor, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1383–1388.
- [Ru y Li, 2008] Ru, J. y Li, X. R. (2008). "Variable-Structure Multiple-Model Approach to Fault Detection, Identification and Estimation.". In IEEE, editor, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, volume 16, pages 1029–1038.
- [Slupphaug y Foss, 1998] Slupphaug, O. y Foss, B. (1998). "Quadratic Stabilization of Discrete-Time Uncertain Nonlinear Multi-Model Systems using Piecewise Affine State-Feedback". *International Journal of Control*, 72, pp. 686–701.
- [Steinberg, 2005] Steinberg, M. (2005). "Historical overview of research in reconfigurable flight control". *Proc. 16th IFAC World Congress*, 219(4), pp. 263–275.
- [Tayebi y Zaremba, 2002] Tayebi, A. y Zaremba, M. (2002). "Iterative learning control for non-linear systems described by a blended multiple model representation". *International Journal of Control*, 75(16/17), pp. 1376–1384.
- [Theilliol et al., 2002] Theilliol, D.; Noura, H.; y Ponsart, J. (2002). "Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy". *ISA Transactions*, 41(3), pp. 365–382.
- [Theilliol et al., 2003] Theilliol, D.; Rodrigues, M.; Adam, M.; y Sauter, D. (2003). "Adaptive Filter Design for FDI in Nonlinear Systems Based on Multiple Model Approach". In IFAC, editor, *5th Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 693–698, Washington D.C., USA.
- [Uppal et al., 2006] Uppal, F.; Patton, R.; y Witczak, M. (2006). "A neuro-fuzzy multiple-model observer approach to robust fault diagnosis based on the DAMADICS benchmark problem". *Control Engineering Practice*, 14(6), pp. 699–717.
- [Varga, 1996] Varga, A. (1996). "Optimal Output Feedback Control: A Multi-Model Approach". pages 327–332.
- [Wang et al., 2007] Wang, D.; Huang, J.; Guo, G.; y Yu, S. (2007). "An FDI Approach for Aircraft Actuator Lock-In-Place Fault". In *Control and Automation, 2007. ICCA 2007. IEEE International Conference on.*, pages 2999–3003.
- [Wang y Lum, 2006] Wang, D. y Lum, K. Y. (2006). "Adaptive Unknown Input Observer Approach for Aircraft Actuator Fault Detection and Isolation". *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 21, pp. 31–48.
- [Yamé y Kinnaert, 2003] Yamé, J. y Kinnaert, M. (2003). "Performance based switching for fault tolerant control". In *Proceedings of the 5th Symposium Safeprocess*, pages 555–560, Washington.D.C, USA.
- [Zavala et al., 2009] Zavala, A.; Astorga, C.; y Hernández, O. (2009). "Bounded positive control for double pipe heat exchangers". *Control Engineering Practice*, 17(1), pp. 136–145.
- [Zhang et al., 2008] Zhang, W.; Wang, X.; y Song, Y. (2008). "A Stability Criterion for Weighting Multiple Model Adaptive Control". In IEEE, editor, *International Conference on Control, Automation and Systems*, pages 642–646, Seoul, Korea.
- [Zhang y Jiang, 2001] Zhang, Y. y Jiang, J. (2001). "Fault Tolerant Control Systems Design with Consideration of Performance Degradation". In IEEE, editor, *Proceedings of the American Control Conference*, Arlington, VA.