

# Detectando fallas mediante redundancia analítica

Efraín Alcorta García\*

## Abstract

Every system is vulnerable to faults due to the physical nature of its components. These faults could cause severe damage. A way to reduce the effect of faults consist basically in two steps: first, in detect if they are present in a system as soon as they occur and second: to take a corrective action. This work offers a panoramic view about the fault detection methods based on analytical redundancy. The last part of this work contains a description of some applications in different areas.

## 1. INTRODUCCIÓN

Todo sistema físico sin excepción está sujeto a cambios en sus parámetros, los cuales modifican el comportamiento para el cual fueron diseñados. Estos cambios pueden ser debidos a efectos de la temperatura, desgastes ocasionados por la fricción, el envejecimiento de los componentes, etc. Los cambios en los parámetros del sistema a zonas fuera de los límites de tolerancia especificados por el fabricante o de los límites establecidos de acuerdo a criterios de ingeniería, serán considerados como fallas dentro del presente trabajo. Estas modificaciones afectan en su mayor parte el buen funcionamiento del sistema provocando desde una reducción del desempeño hasta la posibilidad de accidentes más graves.

La rápida detección de la presencia de fallas en los sistemas puede ayudar a tomar acciones correctivas y de este modo reducir el daño potencial que esta falla puede ocasionar al sistema. Al procedimiento anterior se le conoce con el nombre de reconfiguración. Ver figura 1.

Tradicionalmente los mecanismos para la detección de fallas son basados en el concepto de redundancia y más específicamente en el uso de

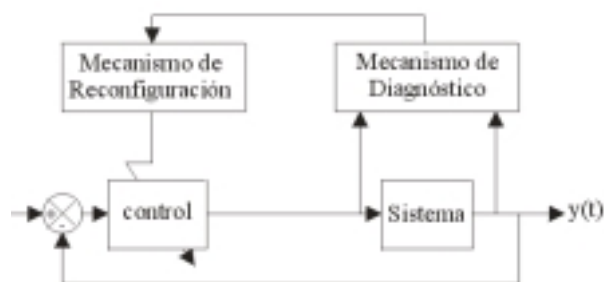


Fig. 1. Principio de reconfiguración.

redundancia física, es decir, en el uso de elementos repetidos en el sistema. Estos elementos nos permiten, por medio de comparaciones del funcionamiento, tomar decisiones sobre la presencia de fallas y sobre posibles acciones correctivas. Los métodos basados en redundancia física son muy confiables y permiten una rápida corrección de posibles fallas. Sin embargo, debe tenerse claro que la utilización de elementos repetidos en un sistema no puede ser llevada a la práctica siempre. Bajo ciertas condiciones, como por ejemplo, el costo, el tamaño o el peso de los dispositivos, el uso de este tipo de redundancia está limitado.

Técnicas alternativas tuvieron que ser desarrolladas para enfrentar los problemas antes descritos. A principios de la década de los 70 fue introducido el concepto de redundancia analítica, el cual complementa los resultados disponibles de los métodos basados en redundancia física. La redundancia analítica está basada en el conocimiento del modelo matemático del sistema en cuestión así como de las señales de entrada y de salida del sistema. Diferentes métodos basados en la redundancia analítica fueron propuestos y sujetos a

\*

División de Estudios de Postgrado, FIME-UANL  
E-mail: ealcorta@ieee.org

fuerte investigación en los pasados 25 años, como se puede corroborar en publicaciones.<sup>1-5</sup> El producto de ese trabajo de investigación trajo como resultado el aumento de confianza en estos métodos y, consecuentemente, el que hoy en día se apliquen a sistemas reales.

El presente trabajo ofrece un panorama sobre los métodos de diagnóstico de fallas. El reporte se enfoca principalmente a los métodos que son basados en la redundancia analítica. Las ideas básicas de los principales métodos de diagnóstico de fallas son presentadas. Adicionalmente, se presentan algunas aplicaciones a manera de ejemplo.

## 2. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

El concepto de diagnóstico de fallas se refiere tanto a la detección como a la localización de una falla, es decir, además de poder determinar si una falla está presente se requiere saber que componente es el que la está ocasionando. Esto último es indispensable en la mayor parte de los casos para poder determinar una acción correctiva. De acuerdo a la referencia<sup>2</sup> la tarea de diagnóstico (detección y localización) puede realizarse en dos pasos principales. Ver figura 2:

- Generación de residuos. Este paso consiste en la obtención de señales que contienen información sobre las fallas solamente. Estas señales son llamadas residuos. En el caso ideal los residuos son cero cuando no hay fallas y difieren de cero en la presencia de una falla.
- Evaluación de residuos. Este paso pretende la extracción de la información contenida en los residuos. La evaluación proporciona información sobre el tiempo en el que una falla ocurrió y sobre el elemento en el cual esta falla está actuando.

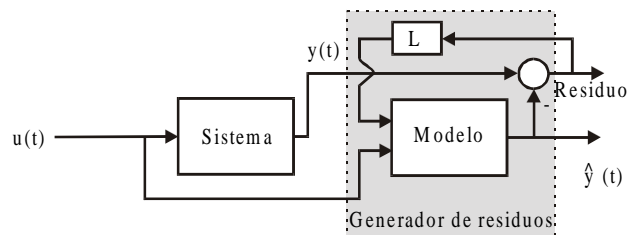


Fig. 2. Filtro detector de fallas

## 3. GENERACIÓN DE RESIDUOS

La idea en esta sección es repasar los conceptos básicos de los principales esquemas de generación de residuos. Aquí se agrupan los procedimientos basados en redundancia analítica, los cuales se pueden dividir (burdamente) en los que están basados en el modelo matemático y los que se basan en un modelo no obtenido a partir de las leyes de la física, sino a partir de procedimientos comúnmente utilizados en inteligencia artificial. Tres métodos destacan dentro de cada una de las dos grandes divisiones. Por un lado, en los procedimientos basados en el modelo analítico tenemos los filtros detectores, el espacio de paridad y las técnicas de estimación paramétrica. Por el otro lado se encuentran los métodos que utilizan redes neuronales, lógica difusa y otras técnicas de inteligencia artificial.

### El espacio de paridad

El espacio de paridad consiste en formar ecuaciones a partir del modelo del sistema, las cuales tienen que cumplirse si el funcionamiento nominal del sistema no se ve alterado por fallas. Existen tres versiones del espacio de paridad, dos de ellas, sin embargo, son las más populares. La primera fue presentada en la referencia<sup>5</sup> y está basada en una representación interna del sistema, en

lo que se conoce como variables de estado. Las ecuaciones de paridad son obtenidas fácilmente después de desarrollar la salida del sistema en el tiempo y formar una ventana de tiempo en la que la variable de salida es conocida. Una versión basada en la misma idea pero utilizando la representación externa.<sup>3</sup> La tercera variante considera sistemas continuos y retrasos en las mediciones de la salida del sistema. La implementación de este algoritmo requiere del conocimiento matemático del sistema así como el de las mediciones de salida y entrada. En todos los casos puede ser demostrado que el espacio de paridad puede ser resumido como en la figura 3.

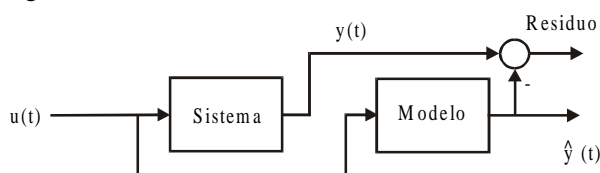


Fig. 3. Idea básica del espacio de paridad

### Filtro detector de fallas

El filtro detector fue introducido a principios de los años 70 y desarrollado fuertemente en distintas variantes, como puede apreciarse en las referencias<sup>1-3</sup>.

La idea básica del filtro detector es muy parecida a la del espacio de paridad, a pesar de que ambos métodos fueron desarrollados independientemente y solo en fechas recientes se pudo demostrar que ambos métodos producen, bajo ciertas condiciones, resultados semejantes.<sup>2</sup> En el filtro detector además de tener un modelo matemático el cual es capaz de predecir el valor de las salidas del sistema en caso de que no hubiera fallas presentes se cuenta con un término de corrección. Ver figura 4.

Si una falla afecta al sistema, la diferencia de las salidas (del modelo y del sistema) será diferente de cero con lo que se puede determinar la presencia de una falla. Si se requiere localizarla es necesario generar más información. Esta información se obtiene construyendo residuos con sensibilidad a una determinada falla. El análisis de todos los residuos proporciona la información deseada.

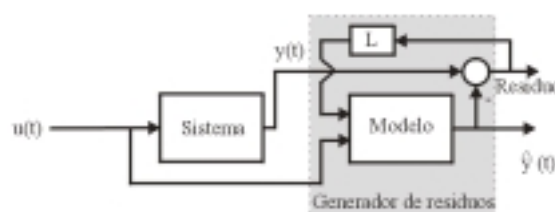


Fig. 4. Filtro detector de fallas

### Estimación paramétrica

En el caso de estimación paramétrica los parámetros nominales (sin falla) de un sistema son comparados a los estimados actuales. Más información sobre este procedimiento puede ser encontrada, por ejemplo, en la referencia<sup>4</sup>. Si hay diferencia entre los parámetros se concluye una falla. Note que en este caso la localización puede llevarse a cabo de manera directa. Una de las dificultades más grandes es el requerimiento de riqueza en frecuencias de la señal de entrada al sistema, para poder permitir la estimación de los parámetros. Este es un requisito que frecuentemente hace este procedimiento no operable.

### Métodos basados en redes neuronales

La idea básica consiste en encontrar un modelo del sistema, el cual está basado en redes neuronales. Las redes neuronales son modelos matemáticos simplificados de las neuronas del cerebro humano y

consiste generalmente en tres capas de elementos, llamadas neuronas, ver figuras 5, 6 los cuales están altamente interconectados.

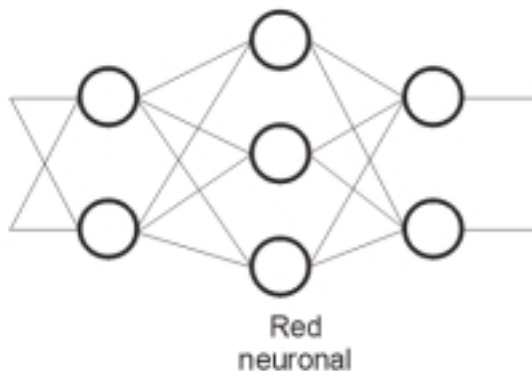


Fig. 5. Neurona.

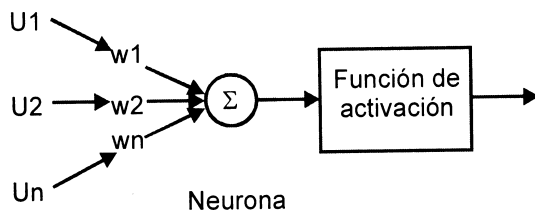


Fig. 6. Red neuronal.

De manera simplificada cada neurona podría definirse como una suma ponderada de entradas que son pasadas a través de una función no lineal, llamada función de activación.

El modelo del sistema se obtiene cambiando la ponderación de las entradas de cada red hasta que el comportamiento de la red sea semejante al del sistema.<sup>7</sup> El ajuste de los parámetros se denomina aprendizaje de la red. Una vez con el modelo la aplicación a detección de fallas es semejante al esquema de espacio de paridad presentado anteriormente.

### Métodos basados en lógica difusa

La lógica difusa fue desarrollada por el Ing. Lofti Zade a mediados de los años 60 con la finalidad de incorporar la experiencia de los operadores en el diseño de controladores. Para lograrlo Zade definió una nueva lógica que, a diferencia de la lógica tradicional, permite que una variable pertenezca a dos conjuntos basados en una función de pertenencia. Es decir un elemento puede pertenecer a un conjunto en un porcentaje. En la lógica convencional Aristotélica un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto. La aplicación a detección de fallas consiste en obtener un modelo difuso del sistema y entonces aplicar las mismas ideas que en el espacio de paridad.<sup>7</sup>

### Métodos basados en inteligencia artificial

Aquí se revisa el comportamiento actual con el que se considera normal, el cual es obtenido a través de un sistema experto o cualquier técnica de inteligencia artificial. Estos métodos se utilizan frecuentemente cuando la información disponible sobre el sistema se encuentra principalmente en forma de experiencia y no se cuenta con modelos matemáticos precisos.<sup>7</sup>

## 4. EVALUACIÓN DE RESIDUOS

La evaluación requiere determinar si los residuos sobrepasan algún valor de umbral determinado. El valor de umbral es necesario para evitar falsas alarmas debidas a condiciones iniciales, pequeñas perturbaciones o dinámicas no modeladas. Generalmente la evaluación se realiza obteniendo una medida del residuo. Esta medida puede ser estadística o determinista. La primera está basada en cálculo de desviación estándar, varianza, media, etc., mientras que los segundos son basados en la

noción de distancia definida en los espacios vectoriales, tales como normas, siendo las más utilizadas la norma 2 ó euclidiana y la norma infinito.

## 5. APLICACIONES

Los sistemas de detección de fallas son parte indispensable de una gran parte de los lazos de control actuales. Esto se puede constatar en la industria de la aviación, la industria automotriz, la industria de la energía eléctrica, en general y particularmente donde existen reactores, calderas o procesos con peligro de explosión. Además, conviene implementarlo en líneas de producción para reducir el riesgo de paro.

### Ejemplo 1. Sistema de tres tanques.

En este sistema dos bombas independientes llenan los tanques de los extremos. Los tres tanques están interconectados y el tercer tanque sólo tiene salida de líquido. La entrada al proceso se define por medio del flujo que proporcionan las bombas y las salidas los niveles del líquido en los tanques. Note que este sistema de laboratorio está equipado para simular fallas, por ejemplo en cualquiera de las dos bombas, en la interconexión de los tanques, en la medición del nivel y con llaves de desagüe en cada tanque para simular fugas. Un total de once fallas pueden ser consideradas.

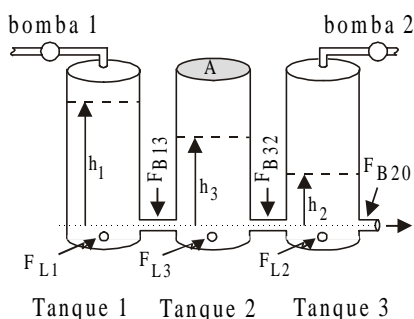


Fig. 7. Sistema de tres tanques.

A este sistema se le aplicó el método de detección de fallas basado en filtros detectores lográndose localizar un total de 9 de las once fallas posibles. La localización del total de fallas es posible con el uso combinado de otros métodos.

### Ejemplo 2. Detección de fallas en motores de barcos.<sup>6</sup>

Otro de los sistemas al que le fueron aplicados mecanismos de diagnóstico de fallas fue al motor de un barco comercial. Para realizarlo fue primero necesario el desarrollo de un modelo matemático dinámico del motor incluyendo su interacción con el medio. Después fueron aplicados diferentes métodos de diagnóstico para comparar los resultados y buscar el más eficiente.

Cabe hacer notar que actualmente un algoritmo de diagnóstico desarrollado a partir de los estudios presentados está implementado y se utiliza para impedir que fallas en los componentes del motor produzcan accidentes graves y costos.

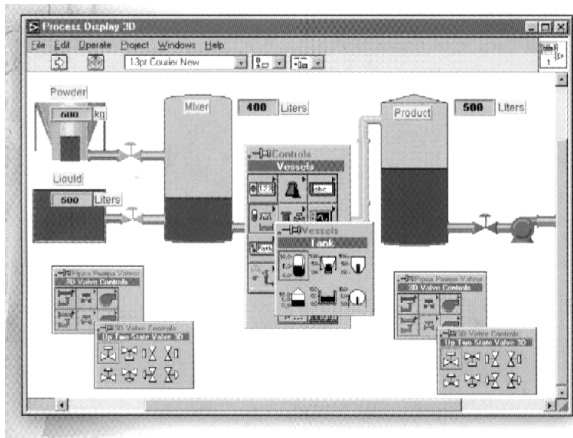
### Ejemplo 3. Detección de fallas en aviones.

Los aviones comerciales adolecen de un efecto que se ha denominado caso de falla oscilatoria (OFC). Esta no es necesariamente una falla de algún componente, sin embargo, puede ser ocasionada por fallas en los componentes del sistema de control de superficie. Una vez que la falla se presenta es fácil corregirla mientras tenga un rango pequeño de frecuencia y amplitud, pero se complica mucho a medida que aumenta. El problema es que esta falla no es detectada por el piloto cuando la amplitud o la frecuencia son pequeñas.

Este tipo de falla puede ser corregida mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico basadas en redundancia analítica y reconfiguración del controlador (mediante el piloto).

## 6. CONCLUSIÓN

La motivación más grande para el desarrollo de los métodos de diagnóstico de fallas es la de evitar que ocurran accidentes que pongan en riesgo la vida de seres humanos. Otro punto motivador del tema es la de evitar pérdidas económicas. En este trabajo se repasaron las ideas principales relacionadas con las técnicas de redundancia analítica más usadas para el diagnóstico de fallas. Adicionalmente se discutieron tres aplicaciones. El diagnóstico de fallas así como los sistemas tolerantes a fallas cobran cada día mayor importancia, debido a las cada vez mayores exigencias industriales.



## REFERENCIAS

1. E. Alcorta García, P. M. Frank. Deterministic non-linear observer-based fault diagnosis: a survey. *Control Eng. Practice*, Vol. 5, Nr. 5, pp. 663-670, 1997.
2. P. M. Frank. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey. *Automatica*, 26:459-474, 1990.
3. J. Gertler. Analytical redundancy methods in fault detection and diagnosis. In *IFAC/IMACS Symp. SAFEPROCESS*, Baden-Baden, Germany, pages 9-21, 1991.
4. R. Isermann. Process fault detection based on modeling and estimation methods-A survey. *Automatica*, 20:387-404, 1984.
5. E. Y. Chow and A. S. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-29(7):603-614, July 1984.
6. E. Alcorta García, B. Koepfen-Seliger, P. M. Frank. A frequency domain approach to residual generation for the industrial actuator benchmark. *Control Eng. Practice*, Vol. 3, Nr. 12, pp. 1747-1750, 1995.
7. P. Amann, E. Alcorta Garcia, B. Koepfen-Seliger, P.M. Frank. Knowledge- and data-based models for fault diagnosis. *Journal of Systems Analysis, Modelling and Simulation*. V. 35, pp.25 a 44. 1998.