

# Detección Automática de Faltas empleando Lógica Borrosa

A. Torralba, J.Chávez, L.G.Franquelo  
Depto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla  
FAX. 34-5-4556849  
E-mail: leopoldo@gte.esi.us.es

## Resumen

Presentamos a continuación una herramienta para la detección y clasificación de faltas en circuitos analógicos a partir de un reducido conjunto de medidas. Se emplea una estructura formada por neuronas borrosas, que permite el reconocimiento de regiones de clasificación de forma arbitraria. Permitiendo la realización de tests tanto funcionales como paramétricos.

## 1 Introducción

La detección y la clasificación de las faltas en circuitos analógicos recibió un gran empuje durante la década de los setenta y principio de los ochenta, debido al incremento de la complejidad de los circuitos electrónicos y el elevado nivel de seguridad que se impuso para las aplicaciones espaciales y militares. La realización de circuitos analógicos mixtos en los últimos años ha hecho renacer el interés por este campo en la comunidad científica. A diferencia del test digital, el test analógico ha sufrido un importante retraso en su desarrollo.

Se pueden considerar dos metodologías para la detección y clasificación de faltas:

- **simulación después de la prueba** (*simulation-after-test*)  
Consiste en estimar los parámetros de los elementos internos del circuito a partir de la medición de un sistema con un defecto. Este proceso se realiza en la línea de fabricación.
- **simulación antes de la prueba** (*simulation-before-test*)  
Este método consta de dos fases: una primera fuera de línea, que consiste en medir un sistema que tiene una falta conocida y almacenar dicho valor en una base de datos conocida como el diccionario de faltas. Este proceso se repite para todas las faltas que

se considere puede presentar el circuito.

Y una segunda fase en línea de fabricación que consiste en realizar una serie de mediciones que se comparan con las que se tienen almacenadas en el diccionario; aquella que se aproxime mejor se considera que es la que se está produciendo.

El primer método presenta problemas de sensibilidad numérica y de consumo de excesivos recursos computacionales.

Otra clasificación que se puede establecer es en función del objetivo:

- **Test de existencia** (*Go-No Go test*): que consiste en comprobar si existe o no falta en el circuito.
- **Test de detección** (*detection test*): Permite la localización del elemento que ha producido la falta.
- **Test de clasificación/diagnosis** (*classification test*): que permite localizar la causa que ha provocado la falta.

La complejidad es creciente en cada uno de los casos.

Un enfoque empleando lógica borrosa fue ya desarrollado por Lee y Bedrosian en [3]. En éste se construye un diccionario de faltas (suponiendo que sólo se produce una falta simultáneamente y el resto de parámetros tiene una desviación normal). Mide la respuesta del sistema para diferentes desviaciones del elemento donde se produce la falta de su valor nominal. Compara tres algoritmos de decisión diferentes: distancia borrosa, entropía borrosa y regla más próxima.

El trabajo desarrollado en este campo se inscribe como un **método para la detección y clasificación de faltas**. Puede ser considerado como un caso de **método simulación antes de la prueba**.

Comentaremos a continuación los aspectos considerados para el desarrollo del sistema:

Se deseaba que este sistema fuera capaz tanto funcionar con la ayuda de un diseñador experto, como sin éste. Esto es, se deseaba que el sistema soportase un aprendizaje, permitiendo una elevada flexibilidad.

Debido a la escasa capacidad computacional de la maquinaria de prueba en línea, se intentará reducir al máximo la complejidad numérica de los algoritmos, para hacerlo viable.

Para la construcción del diccionario, previamente se han realizado una serie de simulaciones Monte-Carlo del circuito bajo condiciones nominales y de falta.

La contribución principal consiste en que se propone una estructura compuesta de neuronas-borrosas (empleadas en problemas de clasificación), que aplicamos para el proceso de test de circuitos analógicos. El método de test propuesto permite el reconocimiento de regiones de clasificación de forma arbitraria. Con un campo de aplicación válido tanto para sistemas lineales como no lineales. Válido tanto para test funcionales como para paramétricos. Por otra parte, en contra de los que ocurre con otros métodos, no se realizan suposiciones sobre las distribuciones estadísticas ó independencia de las medidas.

## 2 Neurona borrosa

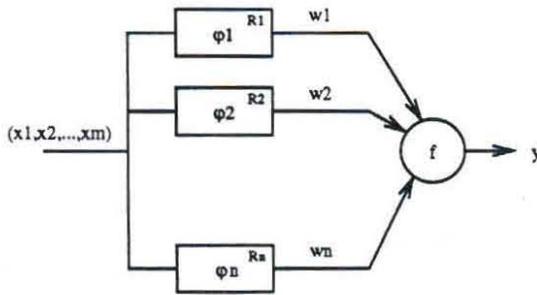


Figura 1: Clasificador basado en una neurona-borrosa

En la figura [Fig. 1] se muestra una neurona-borrosa pensada para problemas de clasificación. Las  $n$  entradas de la neurona son las reglas de un sistema borroso cuyas entradas a su vez son las medidas del circuito. Sean:

- $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  la entrada del clasificador (las medidas del circuito).
- $g_{ij}(x_j)$  la función de pertenencia de la entrada  $x_j$  en la regla  $i$ . Las funciones de pertenencia más frecuentes son la triangular, trapezoidal y gaussiana.

Consideraremos a lo largo del desarrollo que la función de pertenencia es de tipo gaussiano, siendo  $\mu_{ij}$  su valor medio y  $\sigma_{ij}$  su desviación típica.

$$g_{ij}(x_j) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x_j - \mu_{ij}}{\sigma_{ij}} \right)^2} \quad (1)$$

- la regla  $i$  de la forma:  
if  $X_1$  is  $A_{i1}$  and ... and  $X_m$  is  $A_{im}$   
se implementa mediante el producto:

$$\varphi_i = \prod_{j=1}^m g_{ij}(x_j) \quad (2)$$

- Por último la salida de la neurona se obtiene empleando la suma ponderada de sus entradas y la función sigmoideal:

$$y = f \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i \right) = \frac{1}{1 + \exp \left( - \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i \right)} \quad (3)$$

Se puede demostrar que la neurona-borrosa es el aproximador universal en el espacio  $m$ -dimensional. Por tanto, regiones de formas arbitrarias pueden ser clasificadas empleado ésta.

## 3 El proceso de aprendizaje

El sistema anteriormente comentado puede ser empleado para resolver un problema de clasificación en regiones de decisión correspondiente a un tipo de falta. Consideremos como punto de partida que hemos realizado una serie de análisis de Monte-Carlo y hemos obtenido un conjunto de entradas  $x$  con sus correspondientes salidas deseadas  $y_d$ . Consideraremos que la salida vale 1 si la medida corresponde a un circuito cuya falta pertenece a la falta clasificada por la neurona, y 0 en caso contrario.

Los parámetros del sistema ( $\mu_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  y  $\omega_i$ ) pueden ser ajustados de forma automática, mediante un método de aprendizaje por retropropagación.

## 4 Método de test

En método de test empleado (simulación antes de la prueba, como ya se ha comentado previamente) consta de dos fases:

### 1. Proceso de entrenamiento.

Como en todo sistema que se basa en un sistema neuronal, es necesario previamente

hacer que el sistema aprenda la forma en la que deba de funcionar. Este proceso se realiza previamente al proceso de test. Este aprendizaje se divide a su vez en:

(a) **Generación del conjunto de puntos para el entrenamiento.**

Para ellos se realizan una serie de simulaciones de Monte-Carlo del circuito, bajo condiciones de funcionamiento nominales así como condiciones de falta. Una vez generado el conjunto, se almacena dicha información en un archivo.

(b) Se asigna una neurona borrosa a cada clase de falta que pretenda clasificarse. A continuación se procede al entrenamiento de dichas neuronas empleando el proceso de aprendizaje comentado en el apartado anterior.

2. **Proceso de test.**

Se realizan mediciones de un conjunto de señales del circuito que se está probando. Estas señales se aplican como entrada al sistema neuro-borroso, donde cada neurona del mismo produce una determinada salida. El sistema asigna como clase de falta detectada el valor de la neurona con mayor salida.

Dada la escasa complejidad numérica del proceso de inferencia es posible su realización en línea del proceso de fabricación.

Para comprobar la validez del método se han realizado una serie de nuevas simulaciones de Monte-Carlo del sistema bajo condiciones de falta.

Se han considerado dos objetivos de clasificación distintos:

- **Test de existencia de fallo (Go-No Go):** consiste en detectar si el circuito presenta o no falta. Por tanto desde nuestro punto de vista de clasificación neuro-borrosa es una clasificación en dos regiones: zona sin falta y con falta.
- **Test de clasificación:** consiste en la clasificación en tantas regiones como faltas posibles (número de faltas consideradas x elementos donde se puede producir la falta) así como la región de circuito sin falta.

## 5 Modelado de faltas

Existe una gran variedad de faltas que pueden presentarse en los circuitos analógicos. Sin embargo suelen considerarse un conjunto muy limitado

de las mismas entre las que destacan: circuitos abiertos y cortocircuitos en los terminales de los dispositivos activos. A pesar de que pudiera parecer muy limitado el conjunto seleccionado, incluye las faltas que se presentan con mayor frecuencia, tal como se ha deducido en estudios empíricos [[1]]. Coincidiendo esta aparente restricción teórica con nuestro objetivo de centrarnos en los fallos que aparezcan con mayor frecuencia en el proceso de fabricación.

Además de la restricción comentada con anterioridad, consideraremos únicamente las cuatro faltas más comunes que se producen en los circuitos analógicos CMOS, para construir nuestro conjunto de faltas:

1. Cortocircuito puerta-drenador
2. Cortocircuito puerta-fuente
3. Drenador abierto
4. Fuente abierta

Para garantizar la convergencia de las simulaciones se han empleado:

- resistencias de  $1\Omega$  para implementar cortocircuitos
- resistencias de  $100\text{Mega}\Omega$  para implementar circuitos abiertos

Asimismo se han considerado todas las faltas igualmente probables.

## 6 Medida de la validez del algoritmo

Para medir la validez del algoritmo empleado para la clasificación (esto es, evaluar las veces que el algoritmo discrimina correctamente el tipo de falta frente a las que su resultado es erróneo) empleamos la razón de errores de clasificación aparente (APER: *Apparent Error Rate of Misclassification*) [[2]].

Sean  $N_1, N_2, \dots, N_g$  el número de pruebas que se realizan sobre cada tipo de falta. Denominemos  $N_{kc}$  y  $N_{ki}$  el número de pruebas de la falta  $i$ -ésima que han resultado correcta e incorrectamente clasificadas, respectivamente, cumpliéndose que:

$$N_{kc} + N_{ki} = N_k$$

Definimos el índice APER:

$$APER = \frac{N_{1i} + N_{2i} + \dots + N_{gi}}{N_1 + N_2 + \dots + N_g} \quad (4)$$

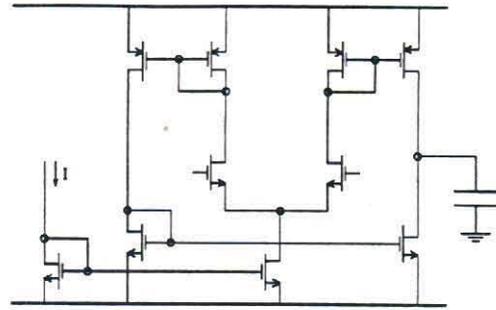
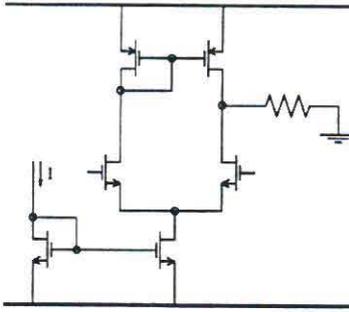


Figura 2: Esquemáticos de las dos topologías empleadas: Par diferencial simple y Amplificador de transconductancia

## 7 Aplicaciones

Las técnicas anteriormente comentadas se han aplicado en dos casos de diferente complejidad:

### 7.1 Amplificadores Operacionales

En la figura [Fig. 2] se muestran las dos topologías que se han empleado para probar la validez de los métodos de test anteriormente comentados. La tabla [Tab. 1] resume los resultados obtenidos con ambos circuitos.

Se han realizado 100 simulaciones de Monte-Carlo para cada tipo de falta. Suponiendo una distribución uniforme de los parámetros del circuito, con las siguientes desviaciones máximas:

- Las dimensiones físicas de los transistores MOS ( $W$  y  $L$ ) tienen una desviación del 10%. Los elementos emparejados (espejos de corriente, pares diferenciales,...) mantienen el ajuste.
- Los parámetros SPICE:  $V_{TO}$  y  $TOX$  tienen una desviación del 10%.
- Las intensidades de polarización tienen una desviación del 10%.
- Los componentes pasivos (resistencias y capacidades) tienen una desviación del 20%.

Los análisis que se realizan sobre el sistema son:

- Medida del comportamiento estático (tensiones para diferentes valores de tensiones estáticas aplicadas en los nodos de entrada del circuito) de los nodos del circuito
- módulo de la tensión AC de salida para una señal de entrada de frecuencia 100Hz.

Se realizaron 50 simulaciones Monte-Carlo por falta para construir el conjunto de aprendizaje, y luego se realizaron otras 50 para obtener el conjunto de verificación. Los tiempos necesarios para dicha generación oscilaron entre 10

minutos para el par diferencial simple y unos 20 minutos para el amplificador de transconductancia. Los tiempos han sido medidos en una estación Sun-SPARC 10. Estos tiempos son muy inferiores a los necesarios para un análisis de Monte-Carlo.

|  | Medidas | Go-No Go | Clasificación |
|--|---------|----------|---------------|
| <b>Amplificador diferencial Simple</b><br>(15 tipos de faltas)         |         |          |               |
| Sólo medida nodo salida AC y DC  | 2       | 7.67%    | 13.53%        |
| Medida DC en todos los nodos   | 4       | 1.73%    | 0.47%         |
| Medida AC nodo salida y DC en todos los nodos                          | 5       | 0.4%     | 0.4%          |
| <b>Amplificador de transconductancia (OTA)</b><br>(23 tipos de faltas) |         |          |               |
| Sólo medida nodo salida AC y DC  | 2       | 8.04%    | 24.17%        |
| Medida DC en todos los nodos   | 5       | 1.12%    | 5.48%         |
| Medida AC nodo salida y DC en todos los nodos                          | 6       | 1.04%    | 0.7%          |

Tabla 1: Resultados de la clasificación de faltas para los casos de amplificadores operacionales

La tabla [Tab. 1] contiene los índices PER de ambas topologías, suponiendo que se realizan diferentes conjunto de medidas.

Existe aproximadamente un 99% de clasificación correcta empleando únicamente medidas estáticas. Este resultado debe matizarse con la observación de que deben realizarse medidas en nodos internos. Estas medidas exigen una maquinaria de test de coste muy elevado (máquina de puntas).

Usando sólo dos medidas en el nodo de salida, puede ser detectada una gran proporción de circuitos defectuosos. Es de destacar asimismo que dado el elevado porcentaje de clasificación obtenido con las medidas DC, la adición de la medida AC del nodo de salida no provoca un aumento sensible en el APER.

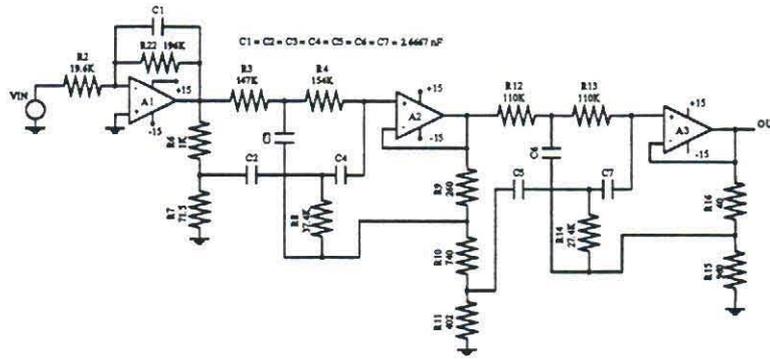


Figura 3: Esquema de un filtro de 5° orden

## 7.2 Filtro

Se ha aplicado el mismo procedimiento a un filtro de 5° orden (con una frecuencia de corte  $f_c = 750\text{Hz}$  de mayor complejidad como es el mostrado en la figura [Fig 3], habiéndose obtenido los resultados que aparecen en la Tabla [Tab 2]

Se realizaron 2 medidas del módulo y fase de la tensión AC en el nodo de salida, para 4 frecuencias (igualmente espaciadas en escala logarítmica) de la señal de entrada entre 250Hz y 2500Hz. Experimentalmente se observó la elevada influencia que tenía el comportamiento en la banda pasante para la detección de fallos.

En la tabla no se incluye el índice resultado del test de existencia pues el sistema obtuvo un  $APER = 0$ ; esto es, detectó sin ninguna equivocación la existencia de una falta.

Los resultados de clasificación de faltas son extremadamente buenos, obteniéndose un APER inferior al 1% para todos los tipos de faltas.

## Referencias

- [1] J.W. Bandler and A.E. Salama. Fault diagnosis of analog circuits. *Proc. IEEE*, 73:1270-1325, August 1985.
- [2] R.A. Johnson and D.W. Wirchern. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1988.
- [3] J. Lee and S.D. Bedrosian. Fault isolation algorithm for analog electronic systems using the fuzzy concept. *IEEE Trans. Circuits Syst.*, 26:518-522, July 1979.

| Tipo de Falta | Clasificación |
|---------------|---------------|
| Nominal       | 0             |
| C1 CC         | 0             |
| C2 CC         | 0             |
| C3 CC         | 0             |
| C4 CC         | 0             |
| C5 CC         | 0.35          |
| C6 CC         | 0.09          |
| C7 CC         | 0.39          |
| R12 CC        | 0             |
| R25 CC        | 0             |
| R3 CC         | 0             |
| R8 CC         | 0             |

| Tipo de Falta | Clasificación |
|---------------|---------------|
| -----         | -----         |
| C1 CA         | 0             |
| C2 CA         | 0             |
| C3 CA         | 0             |
| C4 CA         | 0             |
| C5 CA         | 0.04          |
| C6 CA         | 0             |
| C7 CC         | 0             |
| R12 CA        | 0.17          |
| R25 CA        | 0             |
| R3 CA         | 0.04          |
| R8 CA         | 0             |

|       |      |
|-------|------|
| TOTAL | 1.09 |
|-------|------|

Tabla 2: Resultados de la clasificación de faltas para el filtro de 5° orden