

Detección y diagnóstico de fallas utilizando la transformada wavelet

Fault detection and diagnosis using wavelet transform

M. Guillén

Postgrado en Automatización e Instrumentación, ULA
Mérida 5101, Venezuela
marcosg@ula.ve

JL. Paredes* y O. Camacho**

Departamento de Circuitos y Medidas, Facultad de Ingeniería, ULA
Mérida 5101, Venezuela
*paredesj@ula.ve
**ocamacho@ula.ve

Resumen

En este trabajo se hace un análisis de las diferentes fallas que se pueden presentar en la instrumentación de un proceso químico (válvula y transmisor) y como cambia la salida del proceso ante estas fallas. Para diferenciar una falla de válvula de una falla de transmisor, se utiliza un análisis en el dominio wavelet; luego se mide la diferencia entre las fallas utilizando técnicas de reconocimiento de patrones, en este caso coeficiente de correlación y distancia euclidiana.

Palabras Claves: Detección, diagnóstico, fallas, transformada wavelet.

Abstract

This paper presents an approach to analyze different kinds of chemical process instrumentation faults. The proposed approach makes a detection and diagnosis of the instrument worsening in the process. To differentiate valve and transmitter problems an analysis in the wavelet domain is presented along with pattern recognition procedures, such as correlation coefficient and Euclidean distance approaches.

Key words: Detection, diagnosis, fault, wavelet transform.

1 Introducción

La detección y el diagnóstico de fallas es en la actualidad parte de todo proceso industrial, formando parte del nivel de supervisión en un esquema de automatización.

Cuando un proceso industrial presenta desviaciones en sus parámetros, sus salidas generalmente no corresponden a los valores normales dentro del rango de operación, estas desviaciones podrían ser causadas por desperfectos o mal funcionamiento de los dispositivos implicados dentro de dicho de proceso (Sánchez, 2002).

Las salidas no deseadas son consideradas fallas, es decir, desviaciones no permitidas del comportamiento normal

de la planta o de su instrumentación (Gertler, 1998).

Un instrumento se considera libre de falla si la relación entre los valores reales de la variable comprendidos dentro del campo de medida y los valores de lectura del aparato es lineal o aproximadamente lineal (Tarantino, 1999), esta relación puede observarse en la Fig. 1.

De esta manera se puede expresar el modelo de fallas de los instrumentos como la ecuación (Ec. 1) de la recta que relaciona la variable dependiente con la variable independiente del instrumento.

$$lect(t) = \frac{lec_{\max} - lec_{\min}}{Vr_{\max} - Vr_{\min}} v(t) \quad (1)$$

Donde:

- $lect(t)$ = Lectura del instrumento en el instante = t
- $tv(t)$ = Valor de la variable medida en el instante t
- lec_{max} y lec_{min} = Lectura máxima y mínima del instrumento
- Vr_{max} y Vr_{min} = Valores máximo y mínimo de salida de la variable real.

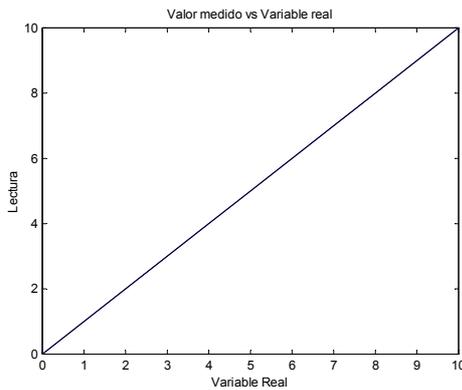


Fig. 1. Recta de calibración de un instrumento.

Ahora bien, el instrumento debe ser representado en forma dinámica, por lo que la ecuación anterior puede escribirse como una ecuación diferencial de primer orden.

$$\tau \frac{dlect(t)}{dt} + lect(t) = \frac{lec_{max} - lec_{min}}{Vr_{max} - Vr_{min}} ((v(t) - Vr_{min})) + lec_{min} \quad (2)$$

Conforme se vayan presentando desviaciones de la recta de calibración se tendrán desviaciones de la recta valor real – valor medido de un instrumento específico lo cual se traduce en fallas de medida del instrumento.

2 Tipos de fallas

Las fallas de medida del instrumento pueden ser de cuatro tipos (Sánchez., 2002 y Tarantino, 1999):

- Falla en el span
- Falla en la zona muerta del span
- Falla en la calibración de cero
- Falla en la zona muerta de cero

Falla en el span: Se produce una desviación positiva en la pendiente de la recta (recta de calibración), representada por Δlec_{max}

Falla en la ZM del span: Se produce una desviación negativa de la recta, representada por ΔVr_{max} .

Falla en la calibración de cero: Variación en el parámetro lec_{min} , la recta se desplaza paralelamente hacia arriba en forma positiva. La desviación es señalada por Δlec_{min} .

Falla en la ZM de cero: Variación en el parámetro, la recta se desplaza paralelamente en forma negativa. La desviación es señalada por ΔVr_{min} .

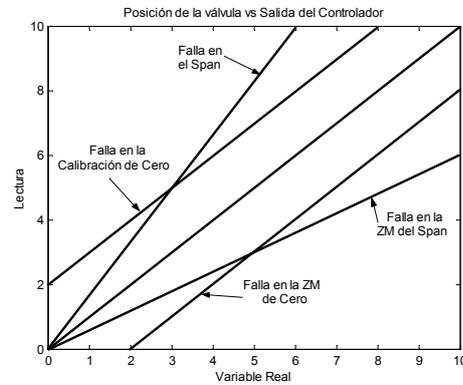


Fig. 2. Fallas de medida en los instrumentos.

La Fig.2 muestra el efecto que producen los distintos tipos de fallas sobre la recta de calibración

3 Modelado de fallas en los instrumentos del proceso

Para este caso particular se hará solo el modelado de las fallas en el actuador de la válvula, el transmisor no será modelado debido a que se realiza de la misma manera.

Falla en el actuador de la válvula (Fig.3): Se considera sin falla si mantiene su relación original entre la señal de control relativa ($m(t)$) y su correspondiente posición relativa ($vp(t)$).

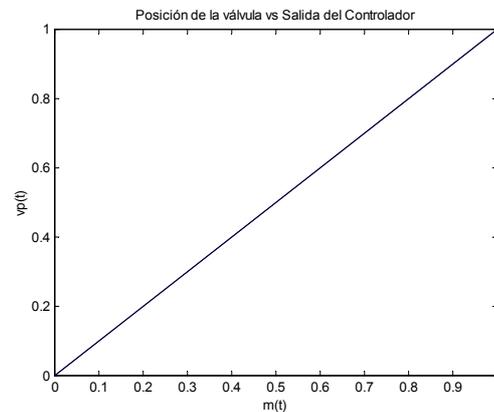


Fig. 3. Recta de calibración para un actuador.

De acuerdo a la Fig.3, se puede expresar la ecuación que relaciona la variable dependiente (salida del actuador) $vp(t)$ con la variable independiente (salida del controlador) $m(t)$, como la ecuación de una recta:

$$vp(t) = \left(\frac{vp_{max} - vp_{min}}{m_{max} - m_{min}} \right) m(t) \quad (3)$$

El actuador de la válvula se debe representar con una dinámica para tomar en cuenta las características reales de la válvula; por lo tanto convertiremos la ecuación anterior en una ecuación dinámica con un comportamiento de primer orden.

$$\tau_v \frac{dvp(t)}{dt} + vp(t) = \left(\frac{vp_{\max} - vp_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \right) (m(t) - m_{\min}) + vp_{\min} \quad (4)$$

Donde vp_{\max} y vp_{\min} son las posiciones máximas y mínimas permitidas para las señales de control m_{\max} y m_{\min} respectivamente.

Variaciones sobre estos parámetros son desviaciones en la relación entre la posición de la válvula y la señal de control las cuales representan las fallas del instrumento. Falla en el span (Fig. 4a): Esta falla se produce cuando se tiene una variación en vp_{\max} , es decir, que para una señal de control m_{\max} tendremos una posición $vp(t)$ mayor al vp_{\max} correspondiente.

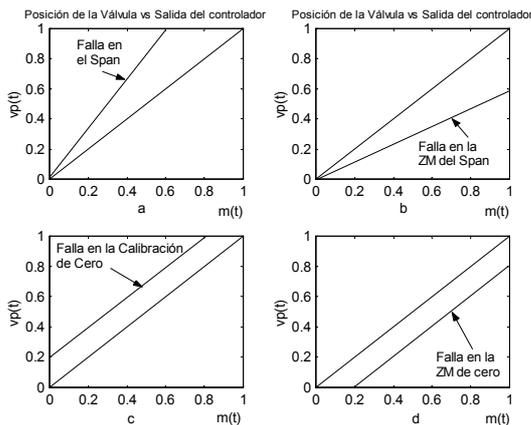


Fig.4 Fallas en el actuador de la válvula.

$$\tau_v \frac{dvp(t)}{dt} + vp(t) = \left(\frac{vp_{\max} \pm \Delta vp_{\max} - vp_{\min}}{m_{\max} - m_{\min}} \right) (m(t) - m_{\min}) + vp_{\min} \quad (5)$$

Falla en la ZM del span (Fig. 4b): Se presenta cuando se tiene una variación en m_{\max} , que se traduce en que para una señal de control m_{\max} desviada, tendríamos una posición $vp(t)$ menor al vp_{\max} correspondiente.

$$\tau_v \frac{dvp(t)}{dt} + vp(t) = \left(\frac{vp_{\max} - vp_{\min}}{(m_{\max} \pm \Delta m_{\max}) - m_{\min}} \right) (m(t) - m_{\min}) + vp_{\min} \quad (6)$$

Falla en la calibración de cero (Fig. 4c): Se presenta cuando se tiene una variación en el parámetro vp_{\min} , lo que se traduce en que para una señal de control m_{\min} tendremos

una posición $vp(t)$ mayor al vp_{\min} correspondiente.

$$\tau_v \frac{dvp(t)}{dt} + vp(t) = \left(\frac{vp_{\max} - (vp_{\min} \pm \Delta vp_{\min})}{m_{\max} - m_{\min}} \right) (m(t) - m_{\min}) + (vp_{\min} \pm \Delta vp_{\min}) \quad (7)$$

Falla en la ZM de cero (Fig. 4d): Se presenta cuando se tiene una desviación en m_{\min} , es decir, se estaría enviando una señal de control mínima cuando en realidad la válvula se encuentra cerrada.

$$\tau_v \frac{dvp(t)}{dt} + vp(t) = \left(\frac{vp_{\max} - vp_{\min}}{m_{\max} - (m_{\min} \pm \Delta m_{\min})} \right) (m(t) - (m_{\min} \pm \Delta m_{\min})) + vp_{\min} \quad (8)$$

4 Análisis Wavelet

El análisis Wavelet permite hacer una representación tiempo-frecuencia de una señal. La habilidad del análisis Wavelet para enfocar intervalos cortos de tiempo en componentes de alta frecuencia, e intervalos largos para componentes de baja frecuencia; mejora el análisis de señales con impulsos y oscilaciones localizadas. Por esta razón, la descomposición Wavelet es ideal para el estudio de señales transitorias obteniéndose una mejor caracterización y una discriminación mas precisa de las señales (Sidney, 1989).

El análisis Wavelet es capaz de revelar aspectos de la señal que otras técnicas no harían. Además el análisis Wavelet puede comprimir o quitar el ruido de una señal sin apreciable degradación de la misma. 4.1 Transformada Wavelet discreta

Una señal $s(t)$ puede ser escrita como:

$$s(t) = \sum_{j=1}^{j_{\max}} c_j(k) \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{j_{\max}} \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (9)$$

Donde: φ y ψ son familia de funciones generadas de funciones básicas de escalamiento $\varphi(t)$ y wavelet $\psi(t)$, respectivamente. Cuando el índice k cambia de valor, la wavelet se mueve sobre el eje del tiempo permitiendo la localización en tiempo del evento. Cuando el índice j cambia, la forma de la wavelet cambia en escala. Esto permite una representación de los detalles de la señal (Sidney, 1989).

$$c_j(k) = \sum_m h(m-2k) c_{j+1}(m) \text{ Coeficientes aproximación} \quad (10)$$

$$d_j(k) = \sum_m h1(m-2k) c_{j+1}(m) \text{ Coeficientes de detalles} \quad (11)$$

Donde $h(m)$ y $h1(m)$ son los coeficientes del filtro paso bajo y paso alto asociados a la función de escalamiento y a la función Wavelet respectivamente (Sidney, 1989) El efecto multiresolución o cambio del tamaño de la ventana de

observación se obtienen cuando los coeficientes de aproximación, una vez submuestreados, se hacen pasar de nuevo por los mismo filtros paso bajo y paso alto. Al repetir este procedimiento de filtrado N veces, siendo N el numero de niveles de descomposición, se obtiene la representación multiresolucional de la señal objeto de análisis.

5 Ejemplo de aplicación

El sistema para el cual se aplica el análisis Wavelet, consiste en un tanque de mezcla mostrado en la Fig 5. El tanque recibe dos flujos, uno caliente, $W_1(t)$, y otro frío, $W_2(t)$. La temperatura de salida se mide a 125 pies del tanque aguas abajo. Se hacen las siguientes suposiciones:

- El volumen del líquido en el tanque es constante
- El contenido está bien mezclado
- El tanque y la tubería están bien aislados

El transmisor de temperatura está calibrado para un rango de 100 a 200°F. Las siguientes ecuaciones constituyen el modelo del proceso.

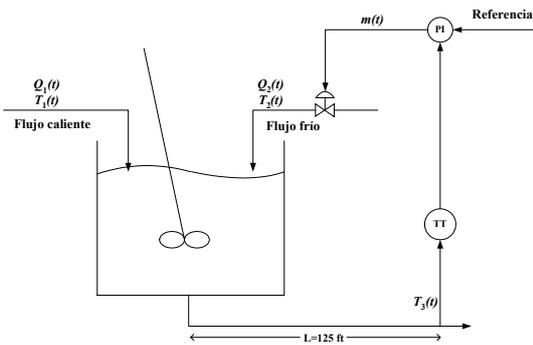


Fig.5 Tanque de mezcla.

Tabla.1. Información del proceso y valores en estado estacionario.

Variable	Valor	Variable	Valor
W_1	250 lb/min	V	15 ft ³
W_2	191.17 lb/min	TO	0.5
Cp_1	0.8 BTU/lb-°F	vp	0.478
Cp_2	1.0 BTU/lb-°F	Cv_1	12 gpm/psi ^{1/2}
Cp_3 Cpv_3	0.9 BTU/lb-°F	ΔPv	16psi
Set point	150°F	τ_T	0.5min
T_1	250°F	τ_{vp}	0.4min
T_2	50°F	A	0.2006 ft ²
T_3	150°F	L	125 ft
ρ	62.4 lb/ft ³	m	0.478 CO

Balance de energía alrededor del tanque de mezclado:

$$W_1(t)Cp_1(t)T_1(t) + W_2(t)Cp_2(t)T_2(t) - (W_1(t) + W_2(t))Cp_3(t)T_3(t) = V\rho Cv_3 \frac{dT_3(t)}{dt}$$

$$(12)$$

Retardo en la tubería entre el tanque y la ubicación del sensor:

$$T_4(t) = T_3(t - t_0) \tag{13}$$

Tiempo de retardo:

$$t_0 = \frac{LA\rho}{W_1(t) + W_2(t)} \tag{14}$$

Transmisor de temperatura:

$$\frac{dT_O(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_T} \left[\frac{T_4(t) - 100}{100} - T_O(t) \right] \tag{15}$$

Posición de la válvula:

$$\frac{dV_P(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_{V_P}} [m(t) - V_P(t)] \tag{16}$$

Ecuación de la válvula:

$$W_2 = \frac{500}{60} C_{VL} V_P(t) \sqrt{G_f \Delta P_V} \tag{17}$$

La Tabla 1 muestra los valores de los parámetros del proceso usados en la simulación.

Se simularon tres tipos de fallas, una falla en el actuador de la válvula, una falla en el transmisor y una perturbación. En la Fig.6 se pueden observar estas tres fallas. Note la similitud entre las distintas fallas, tanto en la forma de la señal, como en la magnitud de los cambios que se presentan en cada una.

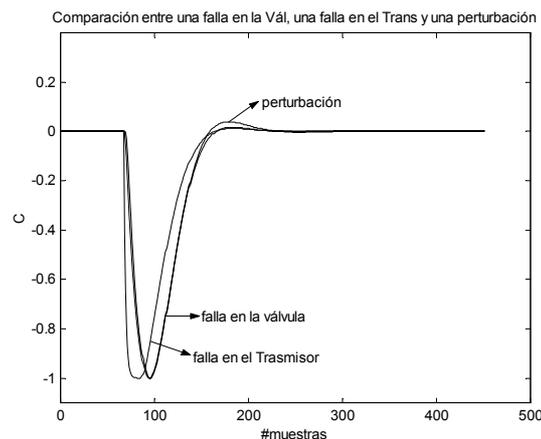


Fig.5 Comparación entre una falla en la válvula, una falla en el transmisor y una perturbación.

Seguidamente se realizó un análisis wavelet a la falla en la válvula y a la falla en el transmisor. La wavelet utilizada fue una db4 y la descomposición fue de 6 niveles.

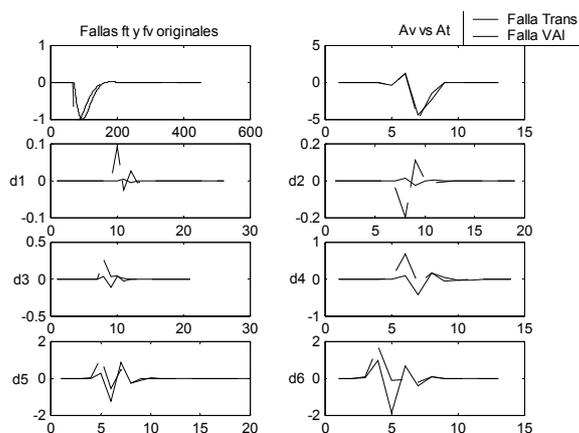


Fig.6 Comparación entre una falla en la válvula y una falla en el transmisor.

De igual manera se comparo una falla en la válvula con una perturbación.

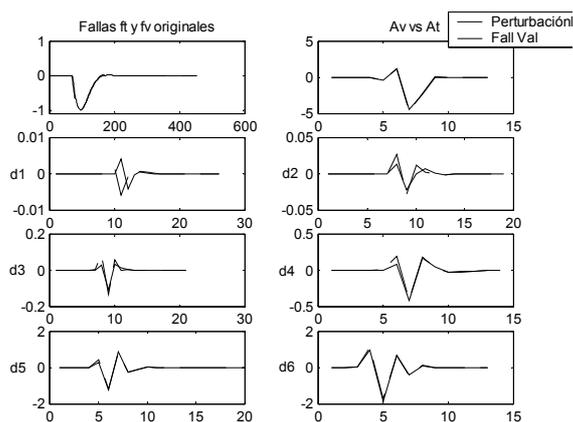


Fig.7 Comparación entre una falla en la válvula y una perturbación descomposición de cinco niveles.

En la Fig.6 se puede observar como la similitud entre las fallas es menor en el dominio wavelet que en el dominio del tiempo. Para el caso de la Fig.7 se observa una pequeña diferencia solo en uno de los detalles de la descomposición wavelet, específicamente en d1.

Para no basarnos solo en una inspección visual se utilizaron técnicas de reconocimiento de patrones las cuales fueron el coeficiente de correlación y la distancia Euclidiana.

5.1 Coeficiente de correlación

En una distribución bidimensional puede ocurrir que dos variables guarden algún tipo de relación entre si. El coeficiente de correlación mide el grado de intensidad de esta posible relación entre las variables (Fu, 1982). El coeficiente de correlación se calcula como sigue:

$$\rho = \frac{Cov(fv, ft)}{\sigma_{fv} \sigma_{ft}} \quad (18)$$

Donde $Cov(fv, ft)$ es la covarianza entre las variable fv y ft , σ_{fv} y σ_{ft} son las desviaciones estándar fv y ft respectivamente. Los valores que puede tomar el coeficiente de correlación " ρ " son: $-1 < \rho < 1$.

Si $\rho > 0$, la correlación es positiva (si sube el valor de una variable sube el de la otra). La correlación es tanto más fuerte cuanto más se aproxime a 1.

Si $\rho < 0$, la correlación es negativa (si sube el valor de una variable disminuye el de la otra). La correlación negativa es tanto más fuerte cuanto más se aproxime a -1.

Si " ρ " = 0, no existe correlación entre las variables.

Tabla.2a. Coeficiente de correlación de una falla en el transmisor y una perturbación con respecto a una falla en el actuador de la válvula para cada uno de los coeficientes de la descomposición wavelet.

flv	f2T	pert1
F1	0.8782	0.9975
A	0.9838	0.9991
d1F1	-0.3694	-0.5695
d2F1	-0.8566	0.9244
d3F1	0.1873	0.9533
d4F1	0.4282	0.9780
d5F1	0.7046	0.9951
d6F1	0.5122	0.9967

En la Tabla 2a puede observarse que la correlación en el dominio del tiempo es muy alta para ambas fallas (f2t y pert1). Sin embargo; para el caso de f2t (falla en el transmisor) la correlación se hace más pequeña en el dominio wavelet por lo tanto se puede diferenciar entre una falla de válvula y una falla de transmisor. No obstante la correlación entre la falla de la válvula y la perturbación es alta en ambos dominios exceptuando la correlación negativa que presenta en los coeficientes de detalles d1. Esta es la única diferencia que presentan estas dos fallas, pudiéndose utilizar esta diferencia para diferenciar una falla de otra.

Tabla.2b. Coeficiente de correlación de una falla de transmisor con respecto a una perturbación para cada uno de los coeficientes de la descomposición wavelet.

f2T	pert1
F275t	0.9063
A	0.9900
d1F275	0.3929
d2F275	-0.8945
d3F275	0.4674
d4F275	0.6059
d5F275	0.7698
d6F275	0.5743

Para el caso de la Tabla.2b se observa que la correlación es alta en el dominio del tiempo pero disminuye en el

dominio wavelet; por lo tanto, puedo diferenciarlas en dicho dominio.

5.2 Distancia euclideana

Una señal f_x (falla cualquiera) puede considerarse que pertenece a una cierta clase de falla, si y solo si la distancia entre f_x y un prototipo f_v (falla en la válvula, por ejemplo) es menor que la distancia entre f_x y otro prototipo, por ejemplo $pert1$ (perturbación). La distancia euclideana se calcula como sigue (Gaouda, , 2002):

$$dE = \left(\sum_i^n (f_v - f_x)^2 \right)^{1/2} \tag{19}$$

Las Tablas 3a y 3b muestran la distancia euclideana tanto en el dominio del tiempo como en el dominio wavelet.

Tabla.3a. Distancia euclideana entre falla de transmisor y una perturbación con respecto a una falla de válvula para cada uno de los coeficientes de la descomposición wavelet.

f1v	f2T	pert1
F1	3.1955	0.3964
A	1.5693	0.2630
d1F1	0.1019	0.0109
d2F1	0.2537	0.0190
d3F1	0.2796	0.0655
d4F1	0.6817	0.1039
d5F1	1.1123	0.1734
d6F1	2.4277	0.2057

Tabla.3b. Distancia euclideana entre falla de transmisor, falla de válvula y perturbación para cada uno de los coeficientes de la descomposición wavelet.

f2T	f1v	pert1
F1	2.6884	2.3792
A	0.9383	0.7263
d1F1	0.1019	0.0972
d2F1	0.2537	0.2674
d3F1	0.2798	0.2475
d4F1	0.6827	0.5871
d5F1	1.1650	0.9957
d6F1	2.0906	1.9118

Como puede observarse en las Tablas 3a y 3b la distancia euclideana no arroja buenos resultados para diferenciar las fallas ya que la distancia euclideana en el dominio wavelet es menor que en el dominio del tiempo por lo tanto no se puede diferenciar una falla de la otra.

5.3 Comparación entre f1v, f3v, f2t, f4t y una perturbación

En este caso se compararon dos tipos de fallas en la válvula, dos tipos de fallas en el transmisor y una perturbación.

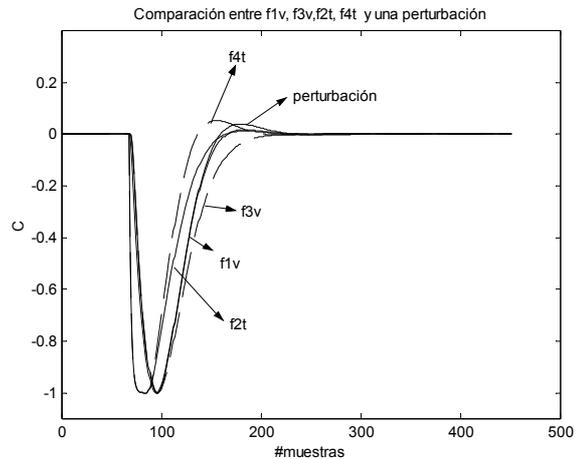


Fig.9. Comparación entre una f1v, f3v, f2t, f4t y una perturbación.

Como se observa en la Fig.9 las cinco señales se parecen bastante y es difícil hacer una diferenciación en el dominio del tiempo, por lo tanto; se realizó un análisis en el dominio wavelet, se calculó el coeficiente de correlación y la distancia euclideana.

Tabla.4a. Coeficiente de Correlación

f1v	f3v	f2T	f4T	pert1
F1	0.9924	0.8782	0.8251	0.9975
A	0.9910	0.9838	0.9497	0.9991
d1F1	1.0000	-0.3694	-0.3694	-0.5695
d2F1	1.0000	-0.8566	-0.8566	0.9244
d3F1	0.9999	0.1873	0.1877	0.9533
d4F1	0.9997	0.4282	0.4359	0.9780
d5F1	0.9995	0.7046	0.7396	0.9951
d6F1	0.9987	0.5122	0.3308	0.9967

Tabla.4b. Coeficiente de Correlación

f3v	f1v	f2T	f4T	pert1
F3	0.9924	0.8550	0.7871	0.9862
A	0.9910	0.9521	0.9009	0.9844
d1F3	1.0000	-0.3839	-0.3839	-0.5689
d2F3	1.0000	-0.8629	-0.8630	0.9260
d3F3	0.9999	0.2080	0.2086	0.9552
d4F3	0.9997	0.4550	0.4631	0.9797
d5F3	0.9995	0.7190	0.7514	0.9957
d6F3	0.9987	0.4962	0.3080	0.9954

Tabla.4c. Coeficiente de correlación

f2T	f3v	f4T	pert1	f2T
F275	0.8550	0.9886	0.9063	0.8550
A	0.9521	0.9903	0.9900	A
d1F2	-0.3694	1.0000	0.3929	d1F2
d2F2	-0.8566	1.0000	-0.8945	d2F2
d3F2	0.1863	1.0000	0.4674	d3F2
d4F2	0.4312	0.9998	0.6059	d4F2
d5F2	0.7078	0.9971	0.7698	d5F2
d6F2	0.4962	0.9727	0.5743	d6F2

Tabla.5. Distancia euclídeana

f1V	f3v	f2T	f4T	pert1
F1	0.7774	2.6884	3.1955	0.3964
A	0.7642	0.9383	1.5693	0.2630
d1F1	0.0000	0.1019	0.1019	0.0109
d2F1	0.0002	0.2537	0.2537	0.0190
d3F1	0.0014	0.2798	0.2796	0.0655
d4F1	0.0112	0.6827	0.6817	0.1039
d5F1	0.0813	1.1650	1.1123	0.1734
d6F1	0.1171	2.0906	2.4277	0.2057

En la Tabla 4 se observa que se puede diferenciar (en el dominio wavelet) una falla de válvula con una falla de transmisor ya que el coeficiente de correlación es menor en el dominio wavelet que en el dominio del tiempo. Para el caso de la perturbación se puede diferenciar de una falla en el transmisor ya que el coeficiente de correlación disminuye, en cuanto a diferenciar la perturbación de la falla en la válvula el coeficiente de correlación se sigue manteniendo alto en ambos dominios con la pequeña diferencia de la correlación negativa en el coeficiente de detalles d1.

También, se observa en estas tablas que es difícil diferenciar un tipo de falla de válvula (f1v) con otro tipo de falla de válvula (f3v) ya que su correlación es muy alta en ambos dominios, de igual manera ocurre para los dos tipos de fallas en el transmisor (f2t y f4t).

En cuanto a la distancia Euclídeana (Tabla5) no arroja buenos resultados debido a que la distancia disminuye en el dominio wavelet y por esta razón no se puede usar por ahora para diferenciar las fallas.

6 Conclusiones

- El análisis en el dominio del tiempo no es adecuado para diferenciar los diferentes tipos de fallas ya que las mismas tienden a confundirse entre ellas.
- El análisis Wavelet ofrece una distribución tiempo-frecuencia que permite hacer una primera diferenciación visual de las fallas.
- El coeficiente de correlación permite realizar una clasificación entre las fallas ya que la correlación en el dominio Wavelet es menor que la obtenida en el dominio del tiempo.
- La distancia euclídeana tal como está implementada en este trabajo no arroja buenos resultados. En subsiguientes trabajos se realizara el estudio de las fallas, definiéndose primero un vector característico de las señales con las características mas resaltantes de cada una de las fallas y

cuales son las que presentan mayor diferencia entre si, para luego aplicar técnicas mas elaboradas de reconocimiento de patrones tales como vecino mas próximo, técnicas bayesianas, redes neuronales, entre otras.

7 Agradecimientos

Parte de este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Automatización e Instrumentación (LABIDAI) de la Escuela de Ing. Eléctrica. ULA.

Referencias

- Antonini G y Antonio O, 2001, Wavelet packet-based emi signal processing and source identification, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 43, No. 2.
- Burrus C, Introduction to wavelets and wavelet transforms, Prentice Hall, New Jersey.
- Fu KS, 1982, Applications of pattern recognition, Boca de Ratón, Florida.
- Gaouda AM, Kanoum SH, Salama M y Chikhani AY, 2002, Pattern recognition applications for power system disturbance classification, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3.
- Gertler JJ, 1998, Fault detection and diagnosis in engineering systems, Prentice Hall, New York.
- Zhang JQ y Yan Y, 2001, A wavelet-based approach to abrupt fault detection and diagnosis of sensors, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.50, No. 5.
- Sánchez B, 2002, Detección y diagnóstico de fallas utilizando estructuras de transición, Proyecto de Grado para optar al título de Magíster Scientiae, Postgrado en Automatización e Instrumentación, Universidad de los Andes, Mérida.
- Tarantino R, 1999, Detección de fallas en sistemas dinámicos lineales variantes en el tiempo, Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Mérida.
- Youssef O y Menber AS, 2003, A wavelet-based technique for discrimination between faults and magnetizing inrush currents in transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1.
- Wong Ch-K y Lam Ch-W, 2003, Novel wavelet approach to current differential pilot relay protection, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1.

