

# Diagnóstico de fallas de circuito abierto en un inversor trifásico basado en la transformada wavelet discreta

S. J. de la Rosa Mendoza \* R. Alvarez Salas \*  
M. González García \*\* V. Cárdenas \* F. Pazos Flores \*  
F. J. Villalobos Piña \*\*\*

\* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 México (e-mail: sanjouaslp@gmail.com, ralvarez@uaslp.mx, vcardena@uaslp.mx, fpazos@uaslp.mx).

\*\* CONACyT - Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. 78290 México (e-mail: mgonzale@uaslp.mx).

\*\*\* Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Aguascalientes, Ags. 20256 México (e-mail: fvillalobos@mail.ita.mx).

---

**Abstract:** En este trabajo se aborda la detección de fallas de circuito abierto en un VSI trifásico acoplado por un filtro de primer orden a una carga resistiva. Se analizan varios escenarios de falla en los elementos de conmutación mediante el uso de la transformada wavelet discreta utilizando las wavelets de Haar y Daubechies 4. Se presentan resultados obtenidos en un prototipo experimental de 1.5 kW.

*Keywords:* Detección de fallas, VSI, wavelet.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

El uso del inversor fuente de tensión (VSI, por sus siglas en inglés) se emplea cada vez más en aplicaciones industriales tales como los accionamientos para motores, ya que con estos dispositivos es posible cambiar la frecuencia de funcionamiento de la máquina eléctrica y operarla a velocidad variable (Moghe (2016)). También se puede usar en sistemas fotovoltaicos para generar energía e inyectarse a la red eléctrica (Geury et al. (2013)). Por otro lado, el VSI ha tenido un papel importante en áreas de calidad energía eléctrica, por ejemplo, en aplicaciones como filtros activos (Nayeripour and Niknam (2008)) y en UPS (Tashakor et al. (2016)), los cuales desempeñan un papel importante en instalaciones eléctricas críticas de hospitales, bases de datos bancarios, sistemas de transporte eléctrico, entre otros.

En la literatura existen diversos trabajos sobre la detección y el diagnóstico de fallas en el VSI, como por ejemplo en (Ramana and Baskar (2016)), donde se muestra el análisis de fallas de un inversor acoplado a un motor de inducción utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) y la transformada wavelet discreta (TWD), donde se establece que en el caso de la primera técnica no tiene resultados favorables con señales no estacionarias, a diferencia de la TWD.

Por otro lado, en (Yang et al. (2016)) se aborda el diagnóstico de fallas en un VSI empleado en el control de motores de CA donde se utiliza la TWD, obteniendo resultados favorables con variaciones de carga. Para el caso de sistemas fotovoltaicos, en (Kumar et al. (2018)) se emplea una variante llamada wavelet packet transform (WPT) para la detección de fallas, se reporta que a pesar de condiciones desfavorables como sombreado parcial y baja radiación, la WPT es capaz de detectar fallas en un VSI bajo los escenarios propuestos utilizando las tensiones y corrientes disponibles en el sistema fotovoltaico. En (Alavi et al. (2014)) se detectan fallas de cortocircuito en un VSI trifásico analizando patrones de los vectores de tensión para los diferentes estados de conmutación. Además se presenta una revisión sobre diferentes enfoques de detección de fallas en el VSI, mostrando ventajas y desventajas, como el tiempo necesario para detectar la falla, el tipo de fallas y algunas características adicionales.

Este artículo está compuesto por varias secciones como la introducción, modelado del VSI y tipos de falla, también el algoritmo propuesto para la detección de fallas y finalmente, se presentan los resultados experimentales, y además se aborda la detección de fallas en el VSI, se consideran fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, estas fallas pueden ser en un solo interruptor o en múltiples interruptores.

## 2. MODELADO DEL VSI Y TIPOS DE FALLA

### 2.1 Modelo promedio

La figura 1 muestra esquemáticamente el VSI acoplado a la carga mediante un filtro de potencia de primer orden. En el prototipo de fallas solo se consideran fallas de circuito abierto en los dispositivos de conmutación, estas fallas pueden ser en un solo interruptor o en múltiples interruptores.

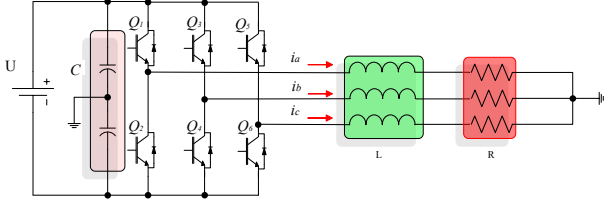


Figura 1. Diagrama esquemático del VSI.

El modelo del convertidor VSI se puede obtener a partir de su representación equivalente del modelo promedio, de acuerdo a (Mohan and Undeland (2007)), y del análisis de la figura 1, donde se asumen las siguientes consideraciones: la relación de la frecuencia de operación y la de conmutación, que las pérdidas en los elementos de conmutación se consideran nulas y se asume un sistema trifásico balanceado. De esta manera se puede obtener el modelo determinado por las ecuaciones (1)-(3).

$$L \frac{di_a}{dt} = -R_p i_a + v_a - \frac{u_a U}{2} \quad (1)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = -R_p i_b + v_b - \frac{u_b U}{2} \quad (2)$$

$$L \frac{di_c}{dt} = -R_p i_c + v_c - \frac{u_c U}{2} \quad (3)$$

El esquema eléctrico cuenta con una inductancia de enlace  $L$  entre el convertidor y la carga. Las tensiones  $v_a, v_b, v_c$  están asociadas a la carga  $R$ , la resistencia  $R_p$  es un elemento parásito considerado en el cableado del inductor de enlace; su valor es pequeño ya que la inductancia es de un alto factor de calidad.  $U$  es la tensión del bus de CD,  $i_a, i_b, i_c$  corresponden a las corrientes de línea. Los interruptores de potencia son  $Q_1 - Q_6$ , los cuales reciben las señales de control para procesar la energía entre el sistema de CD y de CA y además son estos dispositivos en los que se consideraron las fallas.

### 2.2 Tipos de Fallas

El VSI tiene como elementos de conmutación interruptores de tipo IGBT con diodos en paralelo dados por los elementos  $Q_1$  a  $Q_6$ . Para el análisis de estas pruebas se asume el correcto funcionamiento de los diodos y solo se consideran fallas en los interruptores.

*Caso I* Primeramente se propone la situación donde se tiene una falla de circuito abierto en el interruptor  $Q_1$  como se muestra en la figura 2a.

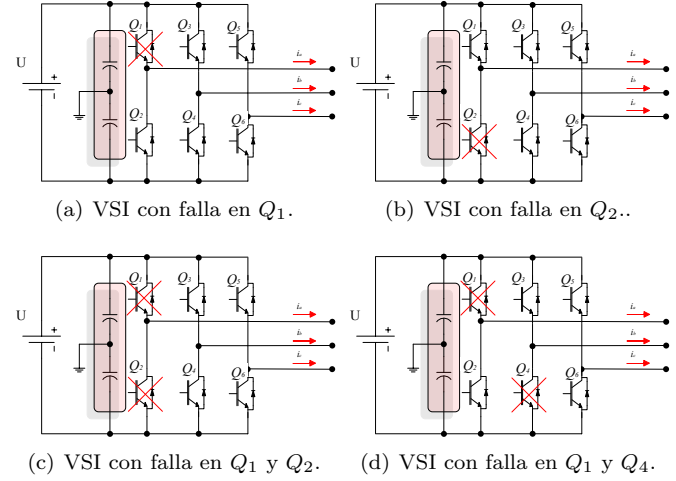


Figura 2. Condiciones de falla en el VSI.

Las corrientes de línea se obtuvieron por medio de sensores de efecto Hall, las cuales se muestran en la figura 3. Se puede observar que la corriente de la fase  $a$  pierde el semiciclo positivo y que las otras dos corrientes tienen que compensar ese cambio.

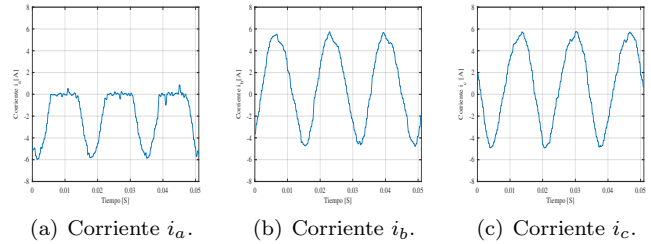


Figura 3. Corrientes de fase para el caso con falla en  $Q_1$ .

*Caso II* Para este caso se propone una falla en el interruptor  $Q_2$  como se indica en la figura 2b.

Las corrientes se muestran en la figura 4. La corriente de la fase  $a$  pierde ahora el semiciclo negativo.

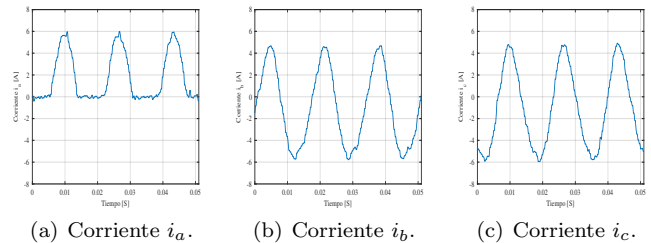


Figura 4. Corrientes de fase con falla en  $Q_2$ .

*Caso III* En este caso se considera una falla múltiple en los interruptores de una misma rama ( $Q_1$  y  $Q_2$ ), como se describe en la figura 2c.

Las corrientes de fase se muestran en la figura 5, la corriente de la fase a es nula.

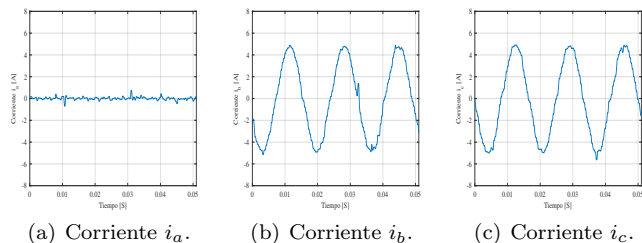


Figura 5. Corrientes de fase con falla en  $Q_1$  y  $Q_4$ .

*Caso IV* Por último se propone una falla múltiple en los interruptores de una misma rama, los interruptores implicados son  $Q_1$  y  $Q_4$  como se muestra en la figura 2d.

Las corrientes de fase se muestran en la figura 6, en este caso son dos corrientes las afectadas (fases a y b).

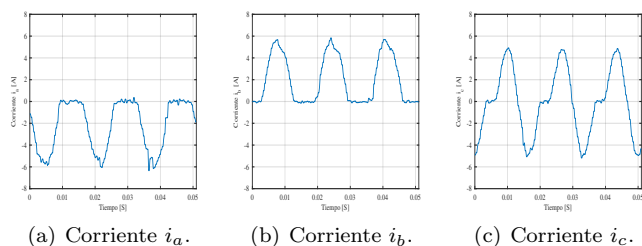


Figura 6. Corrientes de fase con falla en  $Q_1$  y  $Q_4$ .

### 3. ALGORITMO PARA LA DETECCION DE FALLAS

El método de la transformada wavelet permite análisis de señales no estacionarias, su forma continua está dada por:

$$W_f(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Phi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (4)$$

donde  $s$  es la escala,  $u$  denota la traslación.

La transformada wavelet puede implementarse en tiempo discreto y se le denomina transformada wavelet discreta (TWD). La transformada wavelet Haar es el tipo más simple y también sirve como un punto de comparación para todas las otras transformadas wavelets (Walker (2008)).

A continuación, se muestra la aplicación de la TWD Haar, partiendo de una señal  $\mathbf{f}$  discreta como se muestra en 5.

$$\mathbf{f} = (f_1, f_2, f_3, \dots, f_N) \quad (5)$$

donde  $N$  es un entero par positivo. Estos valores pueden ser obtenidos de una señal analógica en instantes de

tiempo  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ , por lo tanto,  $\mathbf{f}$  también se puede representar por (6).

$$\mathbf{f} = (g(t_1), g(t_2), g(t_3), \dots, g(t_N)) \quad (6)$$

La TWD descompone la señal en dos partes. La primera contiene el promedio o tendencia  $\mathbf{a}^1$  y la segunda contiene la diferencia o fluctuación  $\mathbf{d}^1$ . Lo anterior se describe mediante la expresión (7):

$$\mathbf{f} \xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \quad (7)$$

donde  $\mathbf{f}$  es una función discreta,  $\mathbf{a}^1$  es la componente promedio o tendencia y  $\mathbf{d}^1$  es la componente de diferencia o fluctuación. Las componentes quedan definidas como:

$$\mathbf{a}^1 = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_{N/2}) \quad \mathbf{d}^1 = (d_1, d_2, d_3, \dots, d_{N/2}) \quad (8)$$

Los términos  $\mathbf{a}^1$  y  $\mathbf{d}^1$  se obtienen de las expresiones dadas por (9).

$$a_m = \frac{f_{2m-1} + f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad d_m = \frac{f_{2m-1} - f_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

donde  $m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2}$ .

La descomposición de las señales se puede realizar a mayores niveles como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^2 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^3 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^4 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (\mathbf{a}^5 | \mathbf{d}^5 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \\ &\vdots \\ \mathbf{f} &\xrightarrow{H_1} (|\mathbf{a}^n | \mathbf{d}^n | \mathbf{d}^{n-1} | \dots | \mathbf{d}^5 | \mathbf{d}^4 | \mathbf{d}^3 | \mathbf{d}^2 | \mathbf{d}^1) \end{aligned}$$

donde el superíndice denota el nivel de descomposición.

Ahora, generalizando para cualquier componente  $\mathbf{a}_m$  y  $\mathbf{d}_m$ , se utilizan las señales de escalamiento y wavelets de Haar de primer nivel, las cuales están dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0\right) & \mathbf{w}_1^1 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, 0, \dots, 0\right) \\ \mathbf{v}_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, \dots, 0\right) & \mathbf{w}_2^1 &= \left(0, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, \dots, 0\right) \\ &\vdots & & \vdots \\ \mathbf{v}_{N/2}^1 &= \left(0, 0, \dots, \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}\right) & \mathbf{w}_{N/2}^1 &= \left(0, 0, \dots, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \end{aligned}$$

De esta manera, quedan definidas las componentes  $\mathbf{a}_m$  y  $\mathbf{d}_m$  como:

$$\mathbf{a}_m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}_m^1 \quad \mathbf{d}_m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{w}_m^1$$

La TWD del tipo Daubechies 4 se define de forma similar a la TWD del tipo Haar, solo que es de soporte más largo (con mayor número de elementos). Sin embargo este

ligero, cambio brinda mejores herramientas desde el punto de vista de procesamiento de señales; por ejemplo si una señal  $\mathbf{f}$  es próxima a ser lineal sobre el soporte de una wavelet Daubechies 4, entonces el valor de fluctuación  $\mathbf{d}_1$  es casi nulo.

La TWD del tipo daubechies 4 descompone la señal en dos partes al igual que la TWD del tipo Haar. La primera contiene el promedio o tendencia  $a^1$  y la segunda contiene la diferencia o fluctuación  $d^1$ , pero hay una diferencia significativa para obtener estos valores, las cuales están descritas por la ecuación 10:

$$\mathbf{f} \xrightarrow{D^1} (\mathbf{a}^1 | \mathbf{d}^1) \quad (10)$$

Las señales de escalamiento y las wavelets para este caso son:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1^1 &= (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{v}_2^1 &= (0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{v}_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{v}_{N/2-1}^1 &= (0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4) \\ \mathbf{v}_{N/2}^1 &= (\alpha_3, \alpha_4, 0, 0, \dots, 0, \alpha_1, \alpha_2) \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_1^1 &= (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{w}_2^1 &= (0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0) \\ \mathbf{w}_3^1 &= (0, 0, 0, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \dots, 0) \\ \mathbf{w}_{N/2-1}^1 &= (0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) \\ \mathbf{w}_{N/2}^1 &= (\beta_3, \beta_4, 0, 0, \dots, 0, \beta_1, \beta_2) \end{aligned}$$

$$\alpha_1 = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \alpha_2 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \alpha_3 = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \alpha_4 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$$

$$\beta_1 = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \beta_2 = \frac{\sqrt{3} - 3}{4\sqrt{2}} \quad \beta_3 = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \quad \beta_4 = \frac{-1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$$

entonces, de esta manera quedan definidas las componentes  $\mathbf{a}_m$  y  $\mathbf{d}_m$  como:

$$\mathbf{a}^m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}_m^1 \quad \mathbf{d}^m = \mathbf{f} \cdot \mathbf{w}_m^1$$

Una descripción gráfica del análisis de una señal con la TWD se presenta en la figura 7. Se observa la descomposición de la señal en diferentes niveles y la distribución de los datos en cada nivel. Por otro lado, se evidencia también la descomposición de las señales en dos componentes, una de alta frecuencia y la otra de baja frecuencia. Los datos de los diferentes niveles proporcionan información que puede ser utilizada para la detección de fallas.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 4.1 Condiciones de operación

Para las pruebas experimentales se utilizó un VSI trifásico alimentando una carga resistiva cuyas condiciones de operación son las que se describen en la Tabla 1. Las señales se obtuvieron por medio de un sistema de desarrollo basado

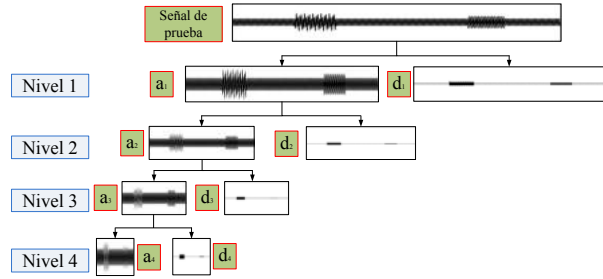


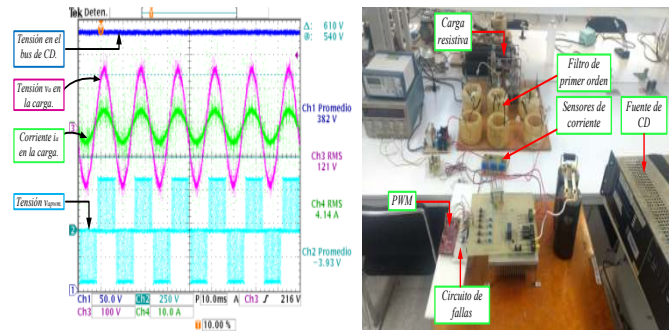
Figura 7. Análisis de una señal mediante la TWD.

en un DSP F28379D de la familia TI C2000, con una frecuencia de muestreo de 5 kHz y para el control de los interruptores se utilizó la técnica de modulación SPWM.

Tabla 1. Parámetros de operación del VSI.

Tensiones en la carga ( $v_a$ , $v_b$ y $v_c$ )	127 $V_{rms}$
Tensión en el bus de CD (U)	380 V
Inductor de enlace (L)	11 mH
Carga (R)	30 $\Omega$
Condensador (C)	2200 $\mu\text{F}$
Potencia nominal (P)	1.5 kW
Frecuencia de conmutación	10 kHz

En la figura 8a se muestran las condiciones nominales de operación donde se puede observar la tensión del bus de CD, la tensión y corriente en la carga y la tensión conmutada entre líneas y en la figura 8b se muestra el banco de pruebas utilizado en este trabajo.



(a) Condiciones de operación. (b) Prototipo experimental.

Figura 8. Condiciones de operación en estado estable y prototipo de pruebas.

Los siguientes casos se obtuvieron para la TWD Haar y Daubechies 4, por cuestiones de espacio solo se muestran los resultados para los casos I y II con la TWD con la wavelet Haar y para el caso III y IV con la TWD con la wavelet Daubechies 4 y se omite el caso sin falla.

### 4.2 Caso I

Empleando la Transformada wavelet Haar de nivel 2 en las corrientes de línea se obtienen los resultados de la figura 9, se puede observar como la componente de tendencia es amplificada respecto a las corrientes de la

figura 3, y además se observa la ausencia del semiciclo positivo.

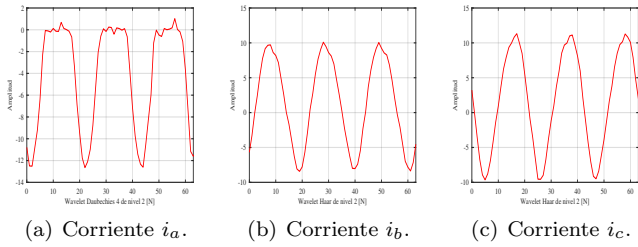


Figura 9. TWD Haar de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de Q1.

### 4.3 Caso II

En la figura 10 se presentan las corrientes de línea donde se les aplicó la TWD Haar de nivel 2 para el caso II, ocurre algo muy similar al caso anterior.

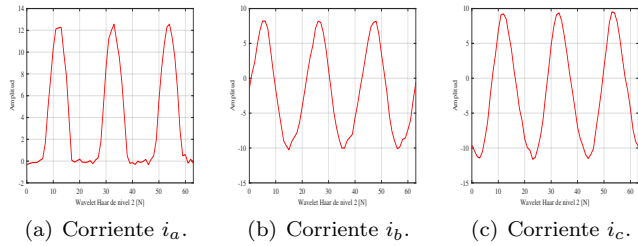


Figura 10. TWD Haar de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de Q2.

### 4.4 Caso III

Para el caso III se presenta la TWD Daubechies 4 de nivel 2 de las corrientes de línea para una falla en dos interruptores de la misma rama. En la figura 11 se puede observar que la corriente de la rama *a* es prácticamente nula por lo que esta falla es de las más sencillas de detectar.

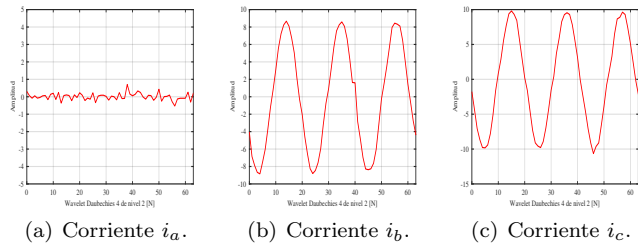


Figura 11. TWD Daubechies 4 de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de Q1 y Q2.

### 4.5 Caso IV

Por último se considera la TWD del tipo Daubechies 4 de nivel 2 de las corrientes de línea para una falla en dos interruptores de diferentes ramas (figura 12). Aquí se puede observar que la fase que no pertenece a los interruptores bajo condiciones de falla no es afectada como las otras fases. Esta es una de las fallas más complicadas de detectar puesto que ambas corrientes de las fases *a, b* pierden un semiciclo, mas sin embargo su valor RMS no es nulo.

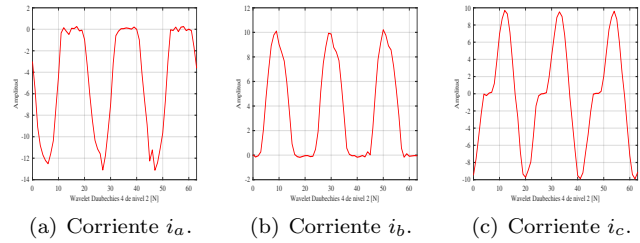


Figura 12. TWD Daubechies 4 de nivel 2 de las corrientes de línea afectada por la falla de Q1 y Q4.

### 4.6 Detección de fallas con la TWD

Con los datos obtenidos previamente datos es posible realizar un análisis con descriptores estadísticos tales como el promedio, RMS, Desviación estándar, Varianza, curtosis entre otros, y así poder dar un mejor juicio sobre la falla.

En la tabla 2 se muestran los valores promedio de la señal de tendencia de nivel 2 obtenida con la TWD de las señales de corriente bajo todas las condiciones de falla y sin falla.

Se puede observar que con el valor promedio se pueden caracterizar todas las fallas a excepción de la falla en interruptores de la misma rama ya que el valor promedio se puede tomar erróneamente como una condición de operación sin falla, esto se puede caracterizar con dos umbrales  $K_1 = -2$  y  $K_2 = 2$ . En el caso del valor RMS y la curtosis Tabla 3 y 4 pueden caracterizar de manera apropiada las fallas múltiples en una misma rama, en los otros casos no es posible tener la certeza de la falla. En el caso de la varianza puede entregar información acerca de fallas múltiples y simples. De acuerdo a la tabla 5, proponiendo un umbral en un valor  $K_3 = 30$ , para valores superiores a este umbral se tendrán fallas simples y si el valor es menor a  $K_3$  se tratara de una falla múltiple.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó de forma experimental la detección de fallas de un VSI. Las fallas estudiadas fueron de circuito abierto en todos los interruptores y combinación de fallas. Se evaluaron quince escenarios de falla, pero solo se presentan cuatro y una condición en

Tabla 2. Valores promedio de la señal  $a^2$  de las señales de corriente.

Haar	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	0,1291	0,0807	0,074
Falla en $Q_1$	-4,1726	1,3898	1,7532
Falla en $Q_2$	3,8698	-1,6663	-2,061
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,0112	-0,1222	-0,1106
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	-4,7025	3,6278	-0,2698
Daubechies 4	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	0,1291	0,0807	0,074
Falla en $Q_1$	-4,1726	1,3898	1,7532
Falla en $Q_2$	3,8698	-1,6663	-2,061
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,0112	-0,1222	-0,1106
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	-4,7025	3,6373	-0,2698

Tabla 3. Valores RMS de la señal  $a^2$  obtenida con la TWD de las señales de corriente.

Haar	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	8,9128	6,9777	7,8837
Falla en $Q_1$	6,4142	6,4634	7,3063
Falla en $Q_2$	6,1551	6,4914	7,5277
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,1972	6,0101	6,7869
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	6,7981	5,6119	6,1668
Daubechies 4	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	8,9425	6,9942	7,9108
Falla en $Q_1$	6,4373	6,4854	7,3308
Falla en $Q_2$	6,172	6,5115	7,5532
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,203	6,0274	6,8111
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	6,8127	5,3604	6,1957

Tabla 4. Varianza de la señal  $a^2$  obtenida con la TWD de las señales de corriente.

Haar	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	80,6824	49,4549	63,134
Falla en $Q_1$	24,1081	40,4759	51,1067
Falla en $Q_2$	23,273	39,9869	53,2509
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,0394	36,6794	46,781
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	24,4843	15,6119	38,5589
Daubechies 4	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	81,2211	49,6884	63,5685
Falla en $Q_1$	24,4092	40,7656	51,4712
Falla en $Q_2$	23,4855	40,2517	53,6417
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	0,0417	36,8906	47,1146
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	24,6854	15,7503	38,9223

Tabla 5. Curtosis de la señal  $a^2$  obtenida con la TWD de las señales de corriente.

Haar	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	1,4964	1,4889	1,4969
Falla en $Q_1$	1,6514	1,537	1,6219
Falla en $Q_2$	1,8055	1,6013	1,5837
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	4,2081	1,5562	1,589
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	1,5038	1,4675	1,8694
Daubechies 4	$i_a$	$i_b$	$i_c$
Sin falla	1,4964	1,4953	1,4963
Falla en $Q_1$	1,6477	1,5382	1,6216
Falla en $Q_2$	1,8003	1,6034	1,5831
Falla en $Q_1$ y $Q_2$	4,2912	1,5591	1,5926
Falla en $Q_1$ y $Q_4$	1,5173	1,4684	1,8759

operación normal por cuestiones de espacio. Por otro lado, el análisis se realizó con señales de corriente sensadas y,

posteriormente, se les aplicó la TWD Haar y Daubechies 4 obteniéndose resultados satisfactorios con los métodos basados en el valor promedio y la curtosis de los datos. El valor RMS permitió detectar ciertas fallas, por ejemplo, la falla de uno de los interruptores  $Q_1$  o  $Q_2$ . La varianza posibilitó detectar todas las fallas en el convertidor donde como resultado del análisis de las señales provenientes de los sensores de corriente, se pueden identificar las fallas en todos los interruptores de potencia con ambas transformadas.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado en el marco de proyectos CONACYT.

## REFERENCES

- Alavi, M., Wang, D., and Luo, M. (2014). Short-circuit fault diagnosis for three-phase inverters based on voltage-space patterns. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(10), 5558–5569.
- Geury, T., Pinto, S., and Gyselinck, J. (2013). Three-phase power controlled pv current source inverter with incorporated active power filtering. In *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, 1374–1379. IEEE.
- Kumar, B.P., Ilango, G.S., Reddy, M.J.B., and Chilakapati, N. (2018). Online fault detection and diagnosis in photovoltaic systems using wavelet packets. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 257–265.
- Moghe, P.S. (2016). *Zigbee based wireless adjustable speed drive system*. Purdue University.
- Mohan, N. and Undeland, T.M. (2007). *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
- Nayeripour, M. and Niknam, T. (2008). Design of a three phase active power filter with sliding mode control and energy feedback. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 15.
- Ramana, D.V. and Baskar, S. (2016). Fault analysis of voltage source inverter fed induction motor drive. In *Computational Intelligence and Computing Research (ICIC), 2016 IEEE International Conference on*, 1–7. IEEE.
- Tashakor, N., Bagheri, E., Farjah, E., and Ghanbari, T. (2016). Three-phase on-line uninterruptible power supply with isolated battery charger. In *Electrical Engineering (ICEE), 2016 24th Iranian Conference on*, 989–994. IEEE.
- Verde, C., Gentil, S., and Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Editorial Trillas.
- Walker, J.S. (2008). *A primer on wavelets and their scientific applications*. CRC press.
- Yang, H., Zhao, J., and Wu, F. (2016). Current similarity based fault diagnosis for induction motor drives with discrete wavelet transform. In *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu), 2016*, 1–6. IEEE.