

# Metodología de diagnóstico de perturbaciones en la calidad de potencia usando la Transformada S

## Disturbances diagnostics methodology in the quality energy by means of S-Transform

Harrynson Ramírez-Murillo <sup>1</sup>, Carlos Andrés Torres-Pinzón <sup>2a</sup>, Edwin Forero-García <sup>2b</sup>, Alfonso Álzate-Gómez <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Grupo Calposalle, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle, Colombia.  
Orcid: 0000-0002-3474-4783. Correo electrónico: haramirez@unisalle.edu.co

<sup>2</sup> Grupo MEM, Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Santo Tomás, Colombia.  
Orcid: <sup>a</sup> 0000-0003-0367-8143, <sup>b</sup> 0000-0002-3818-7793. Correos electrónicos: <sup>a</sup> carlostorresp@usantotomas.edu.co, <sup>b</sup> edwinforero@usantotomas.edu.co

<sup>3</sup> Grupo en Electrónica de Potencia, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Correo electrónico: alalzate@utp.edu.co

Recibido: 9 agosto, 2020. Aceptado: 17 noviembre, 2020. Versión final: 28 enero, 2021.

### Resumen

Este trabajo presenta una metodología conocida como la Transformada S para el análisis tiempo-frecuencia de diferentes distorsiones en sistemas eléctricos de potencia, las cuales, en su mayoría, son no estacionarias y de corta duración, debido a la contribución de las impedancias de la red y los tipos de cargas conectadas por los usuarios. La habilidad de identificar todos los tipos de distorsiones de calidad de energía encriptados en las señales de corriente y tensión es de gran importancia para el análisis de las causas de fallos y funcionamientos erróneos de dispositivos de medición, protección y control en las redes eléctricas. Una característica clave de la Transformada S consiste en que combina una frecuencia dependiente de la resolución del espacio tiempo-frecuencia con información totalmente relacionada a la fase local. Esto permite definir el término de fase en un espectro local. Adicionalmente exhibe una respuesta de amplitud invariante en la frecuencia, en contraste con transformadas tales como la Wavelet y Fourier de Tiempo Corto. Serán simulados mediante el software PSCAD los siguientes casos de estudio: arranque y salida de motores, fallo línea-tierra, armónicos de secuencia cero en una carga trifásica balanceada, carga trifásica desbalanceada, señal en presencia de muescas y componentes de alta frecuencia.

**Palabras clave:** análisis tiempo-frecuencia; calidad de energía; espectro local; sistemas eléctricos de potencia; transformada.

### Abstract

This work shows a methodology known as the S Transform for time-frequency analysis of different distortions in electric power systems, which mostly are non-stationary and short-duration events, due to the contribution of network impedances and loads types connected by the users. The ability to identify all types of power quality distortions encrypted in the current and voltage signals is very important for failures and malfunctions analysis of monitoring equipment, protection, and control of electrical networks. An important feature of the S Transform is that it combines

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: H. Ramírez-Murillo, C. A. Torres-Pinzón, E. Forero-García, A. Álzate-Gómez, “Metodología de diagnóstico de perturbaciones en la calidad de potencia usando la Transformada S,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 2, pp. 109-124, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n2-2021010](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021010)

a frequency dependent resolution of time-frequency space, with information fully connected to the local phase. This allows defining the term of local phase spectrum. Additionally, it shows that amplitude response is invariant from frequency, in contrast to Wavelet and Short Time Fourier Transforms. The following study cases will be simulated by means of PSCAD software: motors starting up and shutting down, line-ground fault, zero-sequence harmonics in a balanced three-phase load, unbalanced three-phase load, a signal with high frequency components and notches presence.

**Keywords:** electric power systems; local spectrum; power quality; S transform; time-frequency analysis.

## 1. Introducción

Una gran cantidad de funciones discretas se obtienen en áreas de aplicación tales como finanzas, economía, procesos industriales, ciencias experimentales, medicina, monitoreo de distorsiones en una red de distribución, entre otras. En sistemas eléctricos de potencia, las señales medidas de tensión y corriente presentan distorsiones de amplitud, fase y frecuencia, debido a la operación de convertidores basados en dispositivos de estado sólido [1], los cuales son el tipo de carga armónica más común y se encuentran en equipos conformados por electrónica de potencia, tales como: rectificadores, variadores de velocidad, entre otros, al igual que procesos como la soldadura, hornos de arco, y control de luminarias. Estos son los mayores responsables de la contaminación armónica que afecta a cargas sensibles de otros usuarios. Debido a estos problemas el tema de calidad de energía ha despertado gran interés en las últimas décadas [2]; [3].

La presencia de armónicos en los sistemas de potencia trae como consecuencia un incremento de pérdidas de potencia de distorsión en las líneas de transmisión y distribución, así como Interferencias Electromagnéticas (Electromagnetic Interferences, EMIs) en sistemas de comunicación, causando en algunas ocasiones fallas en los equipos electrónicos que lo conforman, los cuales son cada vez más sensible por los circuitos de control que requiere. Además, estas cargas no lineales introducen una corriente distorsionada en los sistemas de potencia [4]; [5], lo cual puede causar pérdidas de datos y mal funcionamiento de la memoria en cargas sensibles tales como: un computador, Controladores Lógicos Programables (PLCs), entre otros, y en ocasiones comportamientos erráticos en las protecciones. Por otra parte, cuando cargas desbalanceadas y no lineales son aplicadas a sistemas trifásicos de cuatro hilos, una gran cantidad de corriente fluye a través de la línea de neutro, y dado que los conductores de neutro no están usualmente diseñados para estos casos, se presentan problemas considerables debido al incremento en la utilización de este tipo de cargas.

Estándares internacionales concernientes a la calidad en la energía eléctrica (IEEE 519, IEC 61000, EN 50160, entre otros) imponen que los equipos eléctricos no deben producir contenidos de armónicos mayores que determinados valores, y también especifican los límites de distorsión de las fuentes de tensión. Debido a esto es necesario determinar y solucionar los problemas de armónicos causados por estos equipos que se encuentran instalados en los sistemas de potencia.

La estimación de la calidad de energía se basa en el análisis de las señales presentes en los sistemas eléctricos, tanto en estado permanente como transitorio, el cual requieren de dispositivos de instrumentación precisos y con capacidad de procesamiento de datos. Dichos dispositivos entregarán información apropiada, a partir del uso de métodos estadísticos que permitan eliminar datos innecesarios y de esta manera mejorar la precisión de las medidas. Sin embargo, hay que tener en cuenta los problemas de almacenamiento de datos que se pueden presentar en un tiempo prolongado [6]. Algunos documentos como en [4], sugieren la combinación de métodos probabilísticos y espectrales, también conocido como espectro evolutivo, con el fin de utilizar la información necesaria, y de esta forma reducir almacenamiento de gran cantidad de datos.

Muchas técnicas han sido propuestas en la literatura para detectar perturbaciones en la calidad de energía. La Transformada Discreta de Fourier (DFT), la cual es computarizada a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se usa para extraer el contenido armónico existente en las señales de tensión. Sin embargo, la exactitud del algoritmo DFT es afectada por las “fugas” producidas por las variaciones del nivel en los diferentes eventos que afectan la calidad de energía. La Transformada Wavelet (WT) ha sido introducida como una poderosa herramienta para la detección armónica [7]. La principal desventaja de la WT es su voluminoso procesado, el cual se convierte en un retraso. Así mismo, en los últimos años, se ha empleado la Transformada de Hilbert-Huang, mediante la cual se han obtenido resultados satisfactorios, tanto para funciones no lineales como no estacionarias [8], [9].

Por otro lado, la Transformada S es la extensión de las ideas de la Transformada Wavelet [10], [11] y la generalización de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), y sus propiedades superiores se deben al hecho de que las sinusoides son ajustadas con respecto al eje del tiempo, mientras que la ventana gaussiana se dilata y se traslada, resultando una fase absoluta del espectro en el sentido de que siempre tiene su referencia con respecto al origen del eje del tiempo. En trabajos tales como [12]-[16] ha sido utilizada la Transformada S, en el contexto de caracterización de distorsiones en sistemas eléctricos de potencia. Así mismo, existen desarrollos tales como en [17], donde la Transformada S es obtenida a partir de la WT Modificada, sin embargo, esto presenta desventajas en cuanto a que se requiere de un mayor esfuerzo computacional frente a la metodología propuesta en este artículo, cuyo desarrollo es a partir de la STFT.

Este trabajo propone el uso de la Transformada S como una herramienta para el diagnóstico de perturbaciones de energía ante diferentes condiciones transitorias comunes, que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia. Para ello, este trabajo de investigación se encuentra conformado por una sección donde expresa matemáticamente la Transformada S, tanto continua como discreta. Posteriormente, se mostrarán resultados y discusión ante algunos escenarios relevantes en sistemas eléctricos de potencia, donde será validada la metodología mediante el análisis de patrones presentes en diferentes planos de tiempo-frecuencia normalizada y, finalmente, las principales contribuciones se encontrarán resumidas en las conclusiones.

## 2. Metodología de diagnóstico de perturbaciones

### 2.1. Obtención de la Transformada S a partir de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT)

La relación entre la Transformada S y la STFT, se establece a partir de la función  $H(f)$ , el cual se obtiene mediante la Transformada de Fourier (FT) de  $h(t)$ , es decir:

$$H(f) = F\{h(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} df \quad (1)$$

Y su transformada inversa viene dada por la Ecuación (2):

$$h(t) = F^{-1}\{H(f)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} H(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

Si  $h(t)$  en la Ecuación (1) se multiplica punto a punto por una función ventana  $g(t)$ , entonces su espectro resultante se puede obtener mediante la expresión (3).

$$H(f) = F\{h(t)g(t)\}$$

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)g(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

Si  $g(t) = \frac{e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$  en (3) y, además, se le permite ser una función de desplazamiento temporal y de dilatación o ancho de la ventana ( $\sigma$ ), se obtiene:

$$S^*(\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

Se elige como  $g(t)$  una ventana Gaussiana, debido a que es la más compacta en el tiempo y en la frecuencia [18], lo cual conlleva a la reducción de los espectros de fuga o distorsiones espectrales al aplicar la transformada a señales no periódicas. La expresión anterior es un caso especial de la Transformada Multi-resolución de Fourier [19], debido a que es una función de tres variables independientes, lo cual es una herramienta poco práctica para el análisis. Se puede llegar a una simplificación de (4) al establecer la constante restringida del ancho de la ventana ( $\sigma$ ), proporcional al inverso de la frecuencia en (5) (o proporcional al período), es decir:

$$\sigma(f) = \frac{k}{f} \quad (5)$$

De esta forma, se obtiene la expresión correspondiente a la Transformada S en (6):

$$S(\tau, f) = \frac{\left|\frac{f}{k}\right|}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2k^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

Donde:

La función unidimensional de variable temporal ( $\tau$ ) y un valor fijo  $f_1$ , definida como  $S(\tau, f_1)$  se conoce como voz. La función unidimensional de la variable de frecuencia  $f$  y un valor fijo  $\tau_1$  definida por  $S(\tau_1, f)$  se conoce como local, o espectro local. Como puede observarse en (7), la voz de la Transformada S para  $f = 0$  se define como el promedio de la función  $h(t)$ , es decir:

$$S(\tau, 0) = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} h(t) dt \quad (7)$$

Según la expresión (6), la Transformada S puede ser escrita como una convolución de dos funciones en la variable  $t$ :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} p(t, f) g(\tau - t, f) dt \quad (8)$$

$$S(\tau, f) = p(\tau, f) * g(\tau, f)$$

Donde las funciones en la variable  $t$  se ilustran en las ecuaciones (9) y (10):

$$p(\tau, f) = h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} \quad (9)$$

$$g(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2k^2}} \quad (10)$$

La expresión (8) se puede definir como  $B(\alpha, f)$ , la cual es la transformada de Fourier de la Transformada S, por lo tanto, la aplicación de la propiedad de la convolución en el dominio del tiempo en (11), equivale al producto en el dominio de la frecuencia en (12), es decir:

$$B(\tau, f) = p(\tau, f) * g(\tau, f) \quad (11)$$

En el dominio del tiempo:

$$B(\alpha, f) = P(\alpha, f) G(\alpha, f) \quad (12)$$

Donde  $P(\alpha, f)$  y  $G(\alpha, f)$  son las transformadas de Fourier de  $p(\tau, f)$  y  $g(\tau, f)$  respectivamente. Aplicando la propiedad de traslación en la frecuencia, se obtiene:

$$P(\alpha, f) = H(\alpha + f) \quad (13)$$

La Transformada de Fourier de la expresión (10) está dada por:

$$G(\alpha, f) = e^{-\frac{2\pi^2 k^2 \alpha^2}{f^2}} \quad (14)$$

La transformada  $S(\tau, f)$  se obtiene por medio de la transformada inversa de Fourier de  $S(\alpha, f)$  (al pasar del dominio  $\alpha$  al dominio  $\tau$ ), aplicando las expresiones (12)-(14), tal como se ilustra mediante la siguiente expresión:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 k^2 \alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (15)$$

Donde la función exponencial en (15), es la ventana localizadora dependiente de la frecuencia y se conoce como Voz Gaussiana, la cual desempeña el papel de un filtro pasa bajo para una voz en particular. La Transformada S supera la STFT en el sentido de que presenta una mejor resolución en el espacio de fase, es decir, se usa una ventana más angosta en altas frecuencias, proporcionando una mejor representación tiempo-frecuencia de la señal a analizar [20].

## 2.2. Transformada S Discreta (SDT)

La Transformada S produce una representación tiempo-frecuencia de una serie temporal. Esta combina una resolución dependiente en la frecuencia con una ubicación instantánea real e imaginaria en el espectro. Algunas aplicaciones importantes se encuentran en [21]-[23]. La Transformada S puede ser calculada aprovechando la eficiencia de la FFT (Transformada rápida de Fourier) y la propiedad de convolución.

Sea  $h[kT]$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$  una serie discreta, asociada a una función continua  $h(t)$ , con un intervalo de muestreo  $T$ , la transformada discreta de Fourier viene dada por la Ecuación (16).

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (16)$$

La Transformada S es la proyección del vector definido por una serie temporal  $h[kT]$  como un conjunto de vectores no ortogonales que la atraviesan, hecho por el cual sus elementos no son independientes. Cada vector base de la Transformada de Fourier (TF) se divide en  $N$  vectores localizados por un producto elemento a elemento con  $N$  Gaussianas desplazadas, hecho por el cual la suma de esos  $N$  vectores localizados equivale al vector base original. Haciendo  $f = n/NT$  y  $\tau = iT$  en (15), se obtiene la expresión (17):

$$S\left[iT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 k^2 m^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi mi}{N}} \quad (17)$$

Donde, generalmente  $k = 0.2$  en (17) para la mayoría de las caracterizaciones realizadas por medio de la Transformada S, mientras que en transitorios oscilatorios, su valor oscila entre 1 y 3, según sea

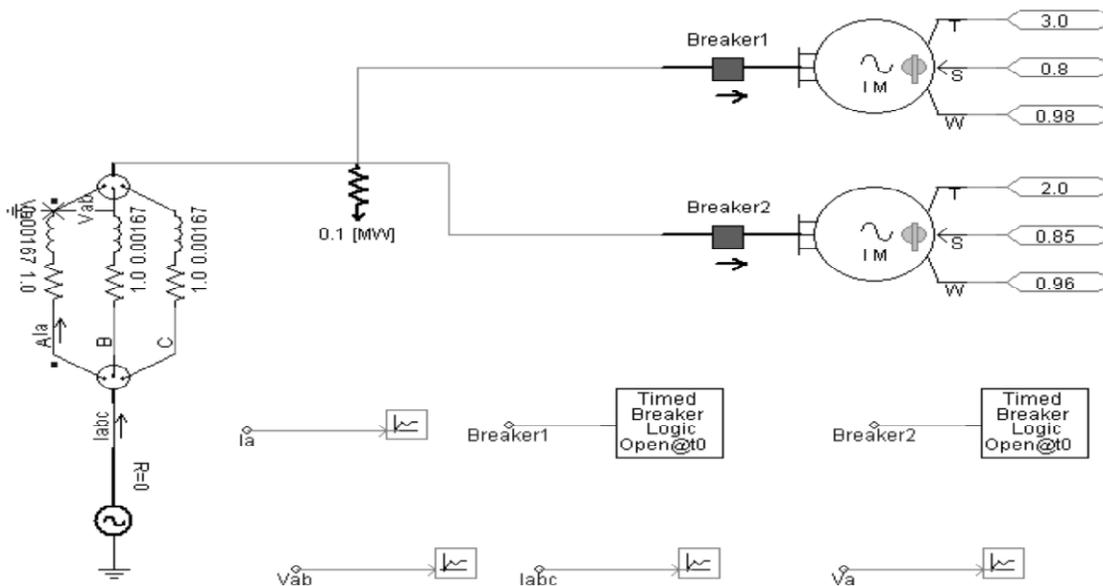


Figura 1. Circuito de simulación de sags y swells de tensión, con una frecuencia de operación de 60 Hz.

requerido [24]. Para  $n = 0$ , se obtiene la Ecuación (18), donde la voz equivale al promedio de la serie temporal:

$$S[iT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h \left[ \frac{m}{NT} \right], m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (18)$$

### 3. Resultados y discusión

Las simulaciones realizadas para la comprobación de la metodología propuesta, se llevó a cabo mediante el uso del software PSCAD®, el cual es una herramienta avanzada en el análisis de sistemas de potencia, donde se usan componentes de conmutación no lineales. Los circuitos implementados en el presente estudio corresponden a distintos escenarios de distorsiones que afectan la calidad de la energía.

#### 3.1. Arranque y salida de motores

Se implementó en simulación el circuito de la Figura 1 con la finalidad de simular sags y swells de tensión, como sobre y sub corrientes. Se midió la respectiva tensión entre las fases A y B, junto a la corriente de la fase A, en un tiempo equivalente a un segundo, utilizándose para ello 4096 muestras, el cual se ilustra en la Figura 2. La Transformada S de las señales de la Figura 2, se muestran en la Figura 3. Como puede observarse en los patrones obtenidos en Figura 3, se encuentran alrededor de 0.014648437, lo cual equivale a una frecuencia de 60 Hz normalizada.

#### 3.2. Fallo Línea-Tierra

Se implementó un circuito para simular un fallo entre una fase (A) y tierra, el cual corresponde a la Figura 4, con la finalidad de analizar un *sag* de tensión del 100% en la fase donde ocurre el fallo (A), que corresponde a la Figura 5b., mientras que se presenta un *swell* de tensión en las fases B y C. Se midió la respectiva tensión en la fase donde ocurre el fallo línea-tierra (A) y en una fase adyacente (B), que corresponde a la Figura 5c., en un tiempo igual a un segundo, tomándose un total de 4096 muestras. La Transformada S de estas señales se ilustran en la Figura 6.

Por otro lado, en el plano tiempo-frecuencia de la Figura 6a., que corresponde a la Transformada S de la Figura 5a., se obtuvo únicamente un patrón alrededor de la frecuencia fundamental normalizada durante la ocurrencia del fallo línea-tierra, debido a que la magnitud de la corriente de fallo es mucho mayor que la corriente de pre-fallo en la señal de la Figura 6b. Se puede observar un patrón constante alrededor de 0.014648437 (60 Hz normalizado), tanto antes como después del hueco de tensión de la Figura 6b. Adicionalmente, se observa una componente de alta frecuencia al final del hueco cuya frecuencia normalizada va desde hasta 0.1025390625 (séptimo armónico, 420 Hz). Así mismo, al patrón constante alrededor de la frecuencia fundamental del sistema, se obtuvo una componente de alta frecuencia al final del swell de tensión de la Figura 6c, con una frecuencia normalizada alrededor de 0.0732421875 (quinto armónico, 300 Hz).

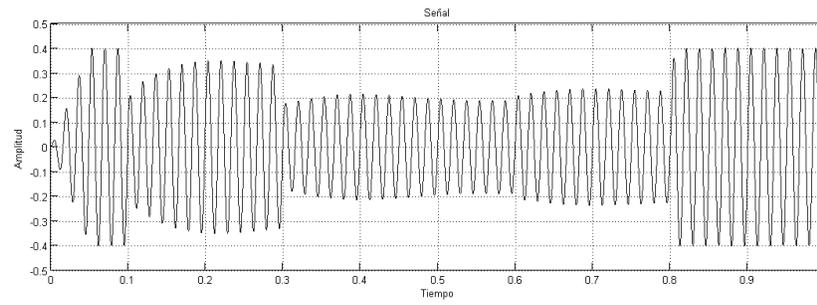
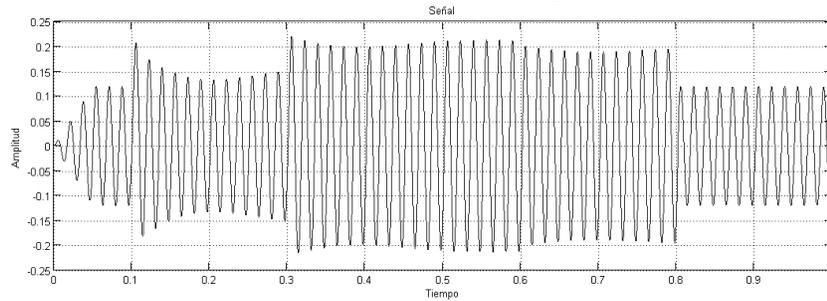
a. Tensión de línea  $v_{AB}(t)$ b. Corriente  $i_A(t)$ 

Figura 2. Señales de tensión en el tiempo medidas entre las fases A y B y corriente en la fase A, en arranque y salida de motores.

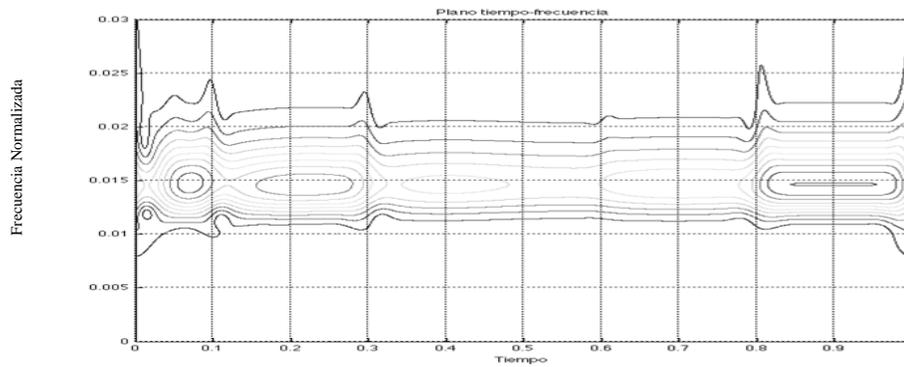
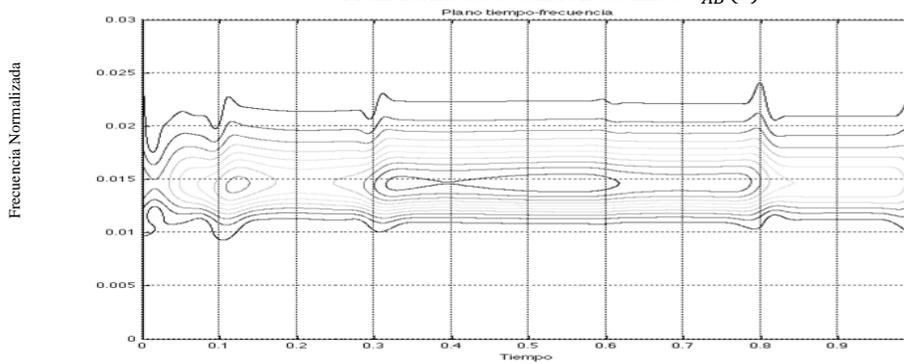
a. Transformada S tensión de línea  $v_{AB}(t)$ b. Transformada S corriente  $i_A(t)$ 

Figura 3. Transformadas S señales de tensión en el tiempo medidas entre las fases A y B y corriente en la fase A, con  $k = 1$ , en arranque y salida de motores.

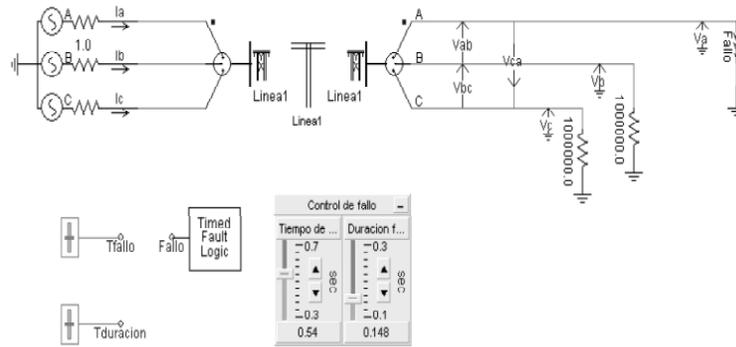
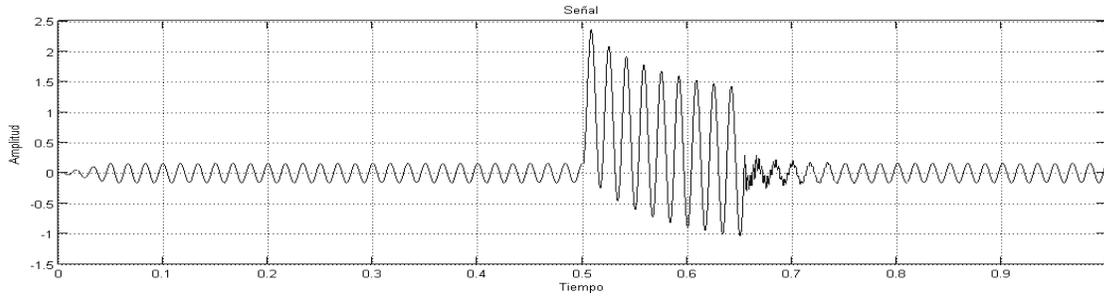
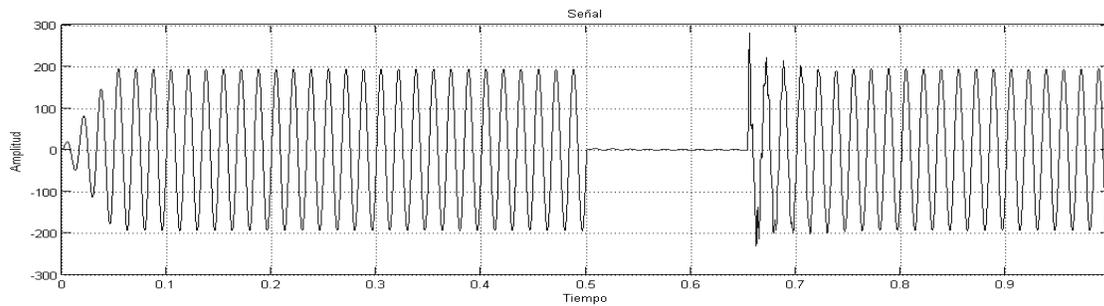


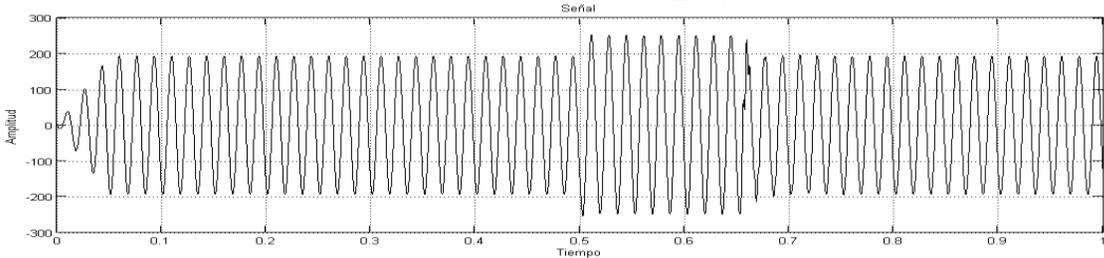
Figura 4. Circuito de simulación ante la presencia de un hueco de tensión del 100% en la fase A y un swell de tensión en las fases restantes.



a. Corriente  $i_A(t)$



b. Tensión de línea  $v_{AN}(t)$



c. Tensión de línea  $v_{BN}(t)$

Figura 5. Señales de tensión en el tiempo medidas entre las fases A y B, con respecto a neutro, y corriente en la fase A, ante un fallo línea-tierra.

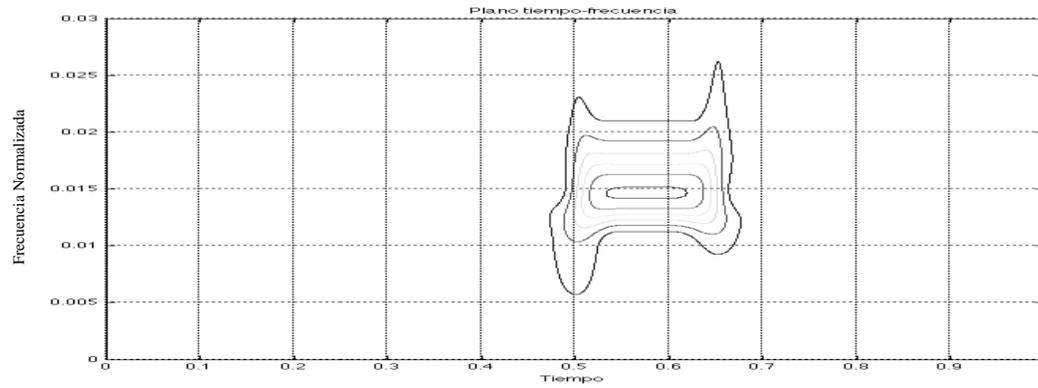
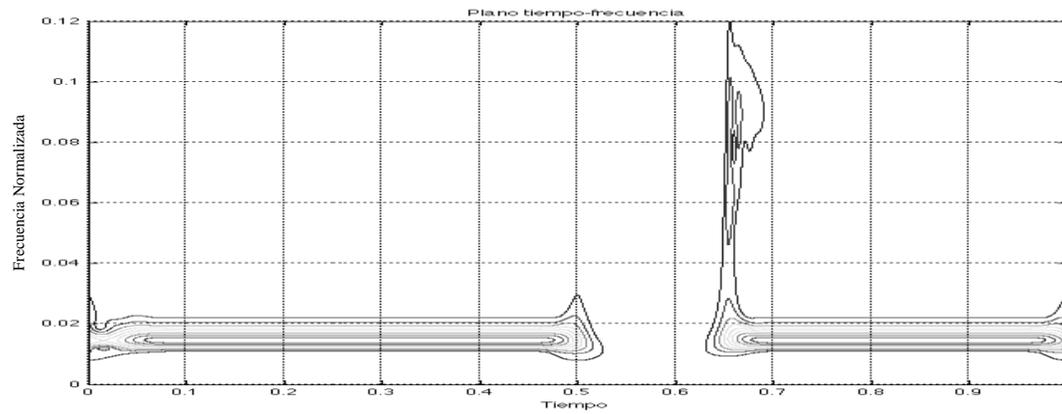
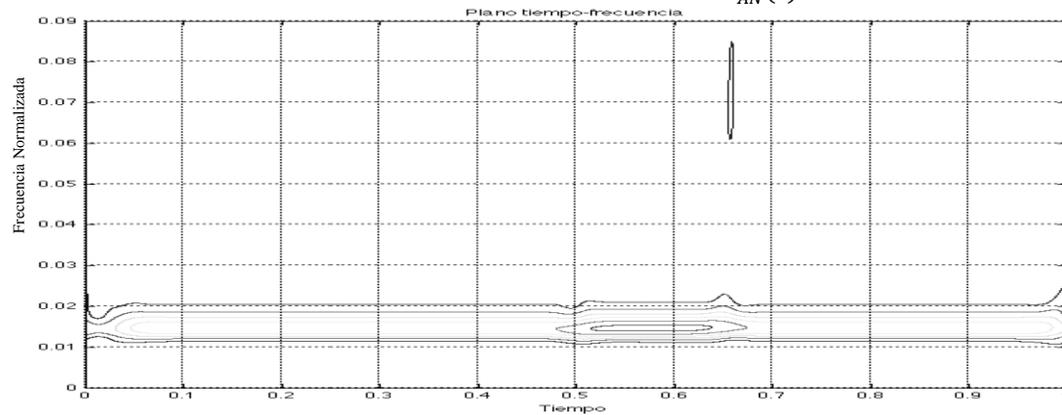
a. Transformada S corriente  $i_A(t)$ b. Transformada S tensión  $v_{AN}(t)$ c. Transformada S tensión  $v_{BN}(t)$ 

Figura 6. Transformadas S señales de tensión en el tiempo medidas entre las fases A y B, con respecto a

### 3.3. Armónicos de secuencia cero en una carga trifásica balanceada

El circuito de la Figura 7, se diseñó para obtener los armónicos de secuencia cero (múltiplos de tres) impares 3,9 y 15, los cuales corresponden a 180, 540 y 900 Hz respectivamente. Se midió la correspondiente tensión en la fase A, y la corriente en el conductor neutro, la cuales corresponden a la Figuras 8 y 10, en un tiempo equivalente a un segundo, usando para ello 4096 muestras. La Transformada S de estas señales se ilustra en las Figuras 9 y 11, respectivamente.

Debido a que la señal de la Figura 8 es estacionaria, se presenta patrón constante alrededor de la frecuencia fundamental normalizada del sistema en la Figura 9. Debido a que la señal de la Figura 10 también es estacionaria, se presenta un patrón constante alrededor de las frecuencias normalizadas 0.0439453125, 0.131835937 y 0.2197265625, las cuales corresponden a los armónicos tercero (180 Hz), quinto (300 Hz) y quinceavo (900 Hz) respectivamente y se muestran en la Figura 11.

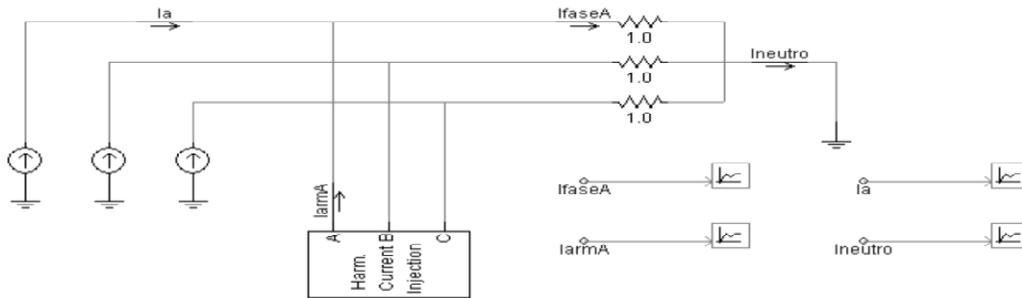


Figura 7. Circuito esquemático carga trifásica balanceada en presencia de armónicos de secuencia cero.

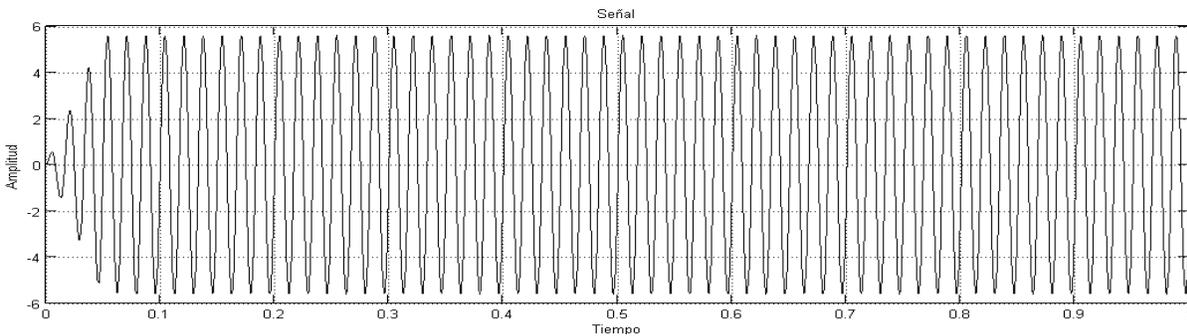


Figura 8. Señal de corriente en el tiempo medida en la fase A.

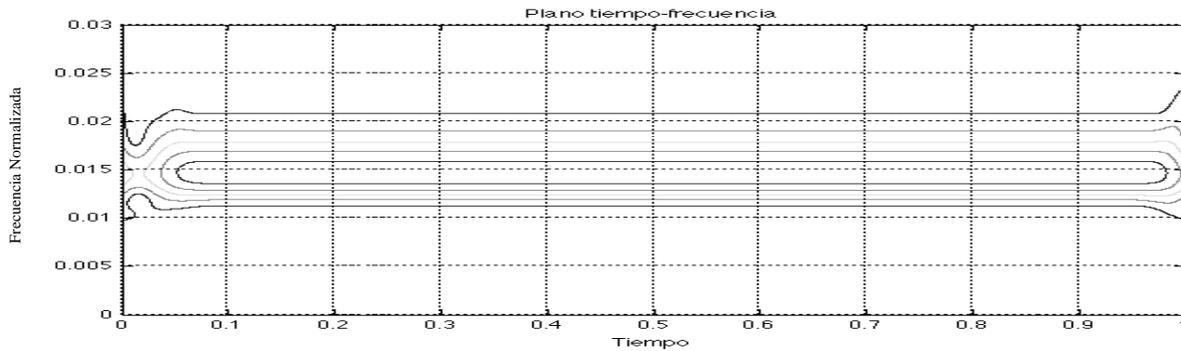


Figura 9. Transformada S de la señal de corriente medida en la fase A. con  $k=1$

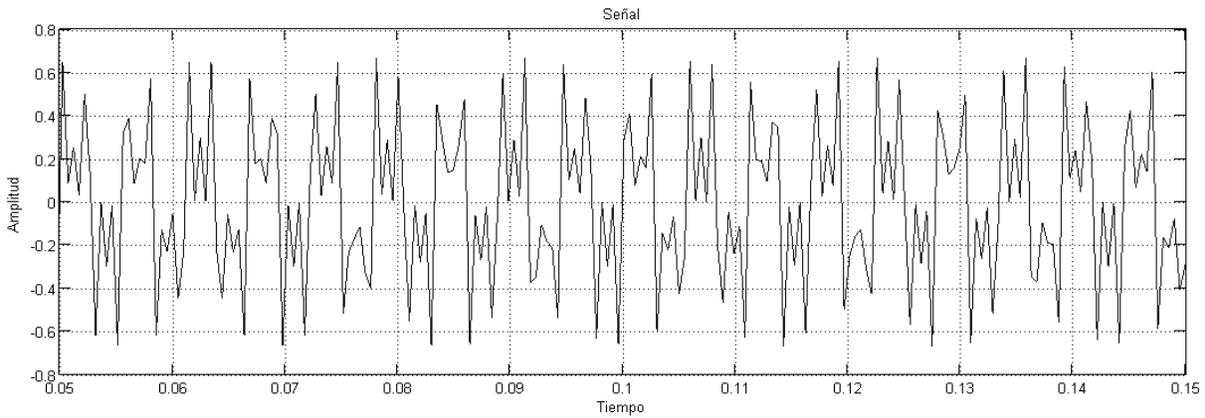
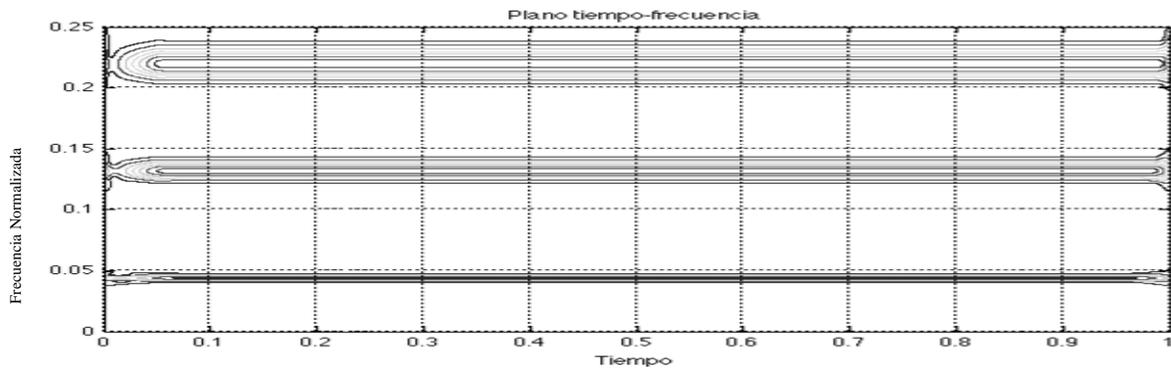


Figura 10. Señal de corriente medida en el neutro.

Figura 11. Transformada S de la señal de corriente medida en el neutro con  $k=4$ .

### 3.4. Carga trifásica desbalanceada

El circuito de la Figura 12 se implementó para obtener armónicos impares hasta el 33 (1980 Hz), siendo predominantes los de secuencia cero, o múltiplos de 3. Se midió la correspondiente corriente del conductor neutro, la cual corresponde a la Figura 13, en un tiempo equivalente a un segundo, utilizándose para ello 4096 muestras. La Transformada S de dicha señal se ilustra en la Figura 14.

El contenido armónico del plano tiempo-frecuencia de la Figura 14 se obtiene al aplicarle la Transformada S a la señal de la Figura 13 y encuentra resumido en la Tabla 1.

Tabla 1. Armónicos obtenidos en el patrón de la Figura 15

Frecuencia normalizada	Frecuencia en Hz	Orden del armónico
0.0146484375	60	1
0.0439453125	180	3
0.0732421875	300	5
0.1025390625	420	7
0.1318359375	540	9
0.2197265625	940	15
0.3076171875	1260	21
0.3955078125	1620	27
0.4833984375	1980	33

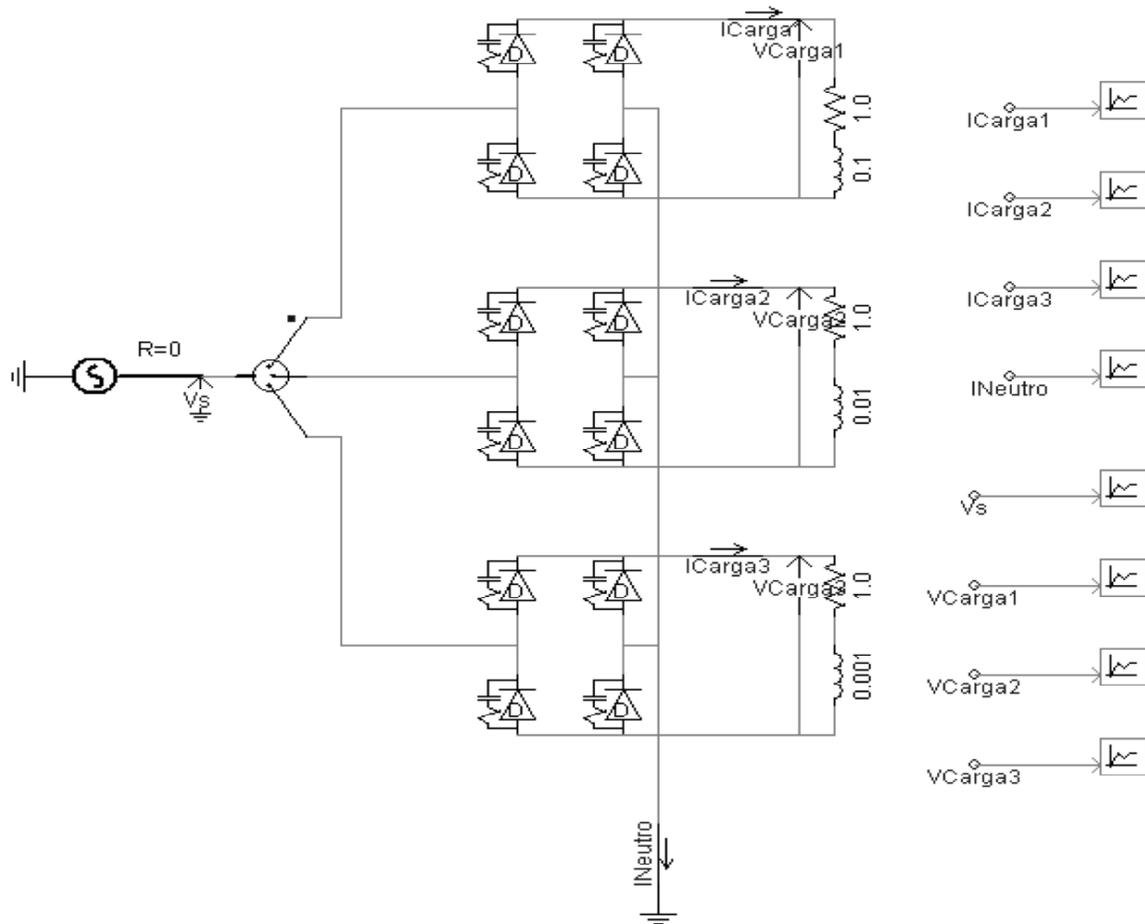


Figura 12. Circuito de simulación de armónicos impares hasta el orden 33.

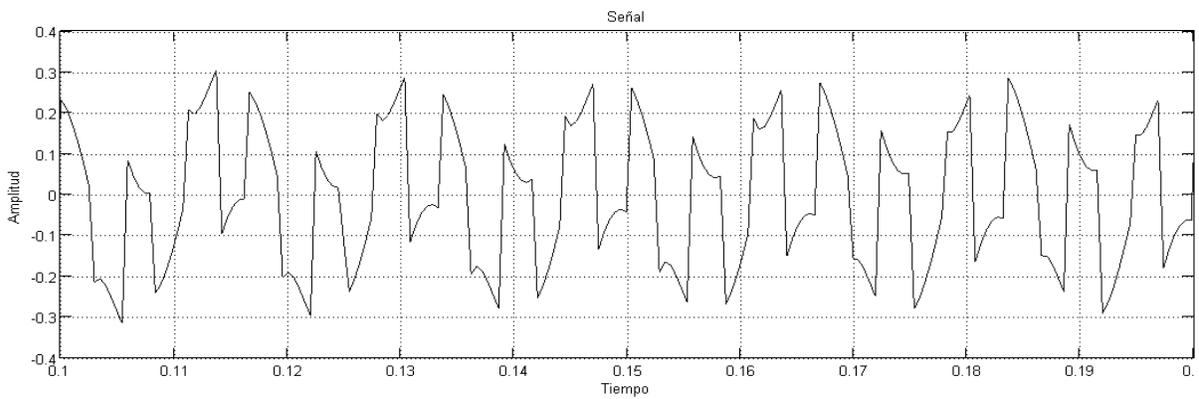


Figura 13. Señal de corriente medida en el neutro.

### 3.5. Señal en presencia de muescas y componentes de alta frecuencia

La siguiente señal fue elaborada en el software Matlab, la cual presenta dos características periódicas particulares: muescas y componentes de alta frecuencia y se pueden apreciar claramente en la Figura 15. El tiempo de la señal de análisis corresponde a un segundo, tomándose un total de 2048 muestras. La Transformada S correspondiente se muestra en la Figura 16, comprendido en un intervalo de tiempo [0.1, 0.2] segundos.

En el plano tiempo-frecuencia de la Figura 16, se obtuvo un patrón constante alrededor de la frecuencia fundamental del sistema (60 Hz), unos patrones

periódicos paralelos al eje de la frecuencia normalizada, encargados de caracterizar las muescas y componentes de alta frecuencia, siendo de más corta duración estos últimos.

En el plano tiempo-frecuencia de la Figura 18 se obtuvo un patrón constante alrededor de la frecuencia fundamental del sistema (60 Hz) y unos patrones periódicos paralelos al eje de la frecuencia normalizada, encargados de caracterizar las muescas. Este plano corresponde a la Transformada S de la señal de la Figura 17.

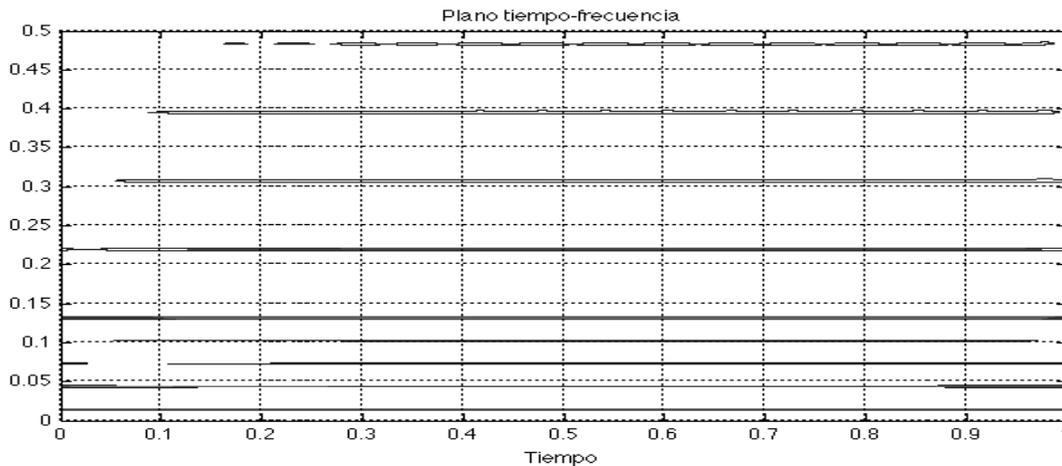


Figura 14. Transformada S de la señal de corriente medida en el neutro, con  $k = 25$ .

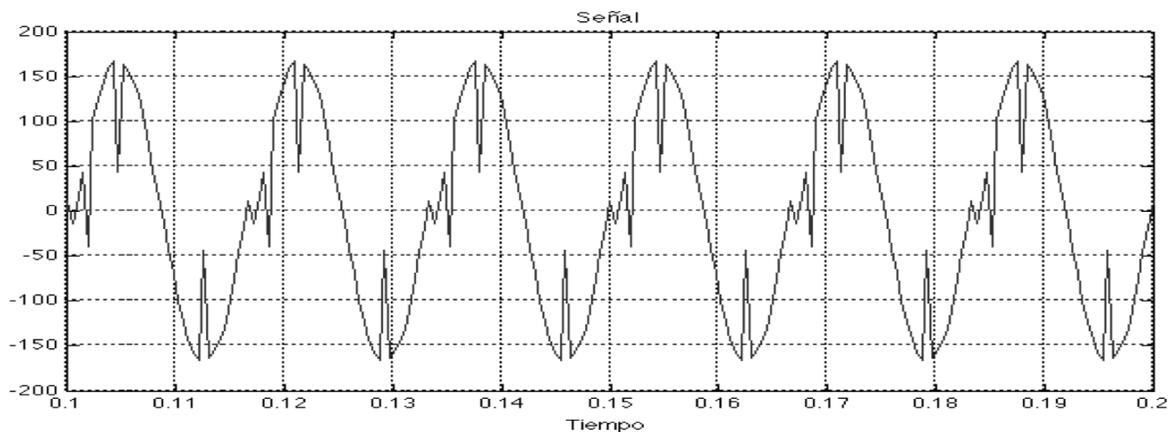


Figura 15. Señal en el tiempo medida con presencia de muescas y componentes de alta frecuencia.

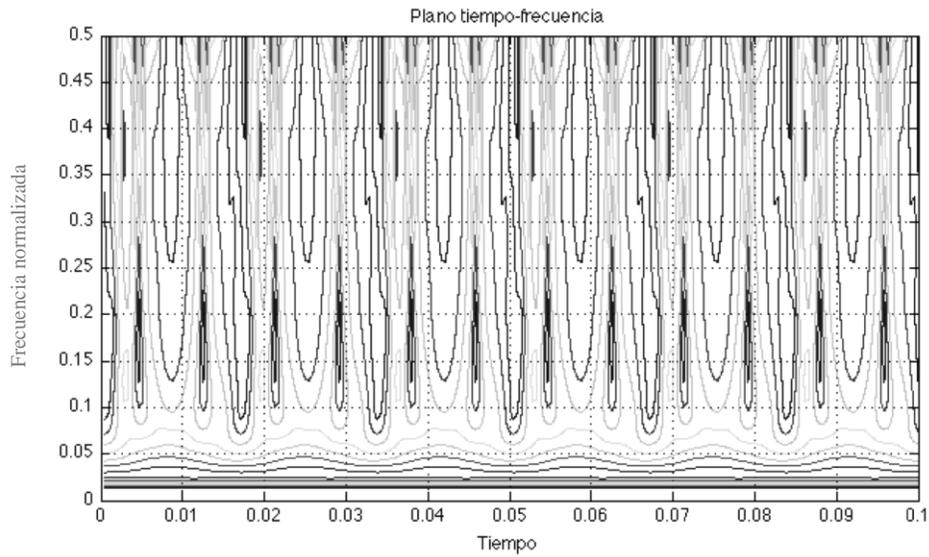


Figura 16. Transformada S de la señal con presencia de muescas y componentes de alta frecuencia, con  $k = \sqrt{0.1}$ .

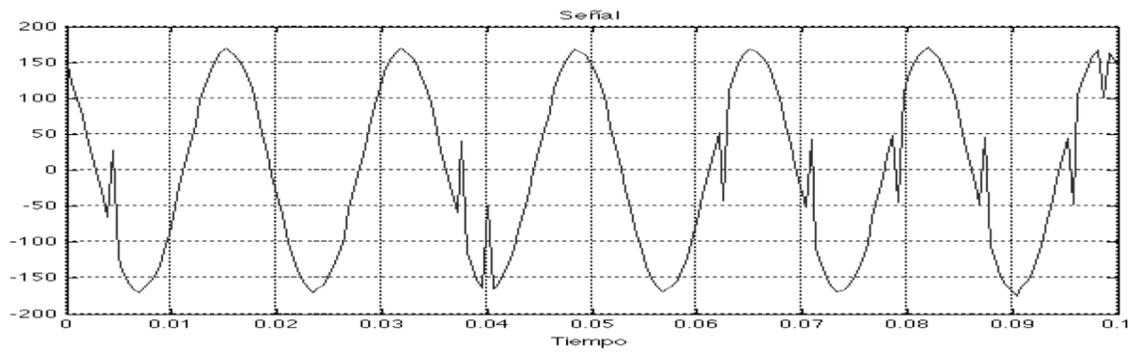


Figura 17. Señal en el tiempo medida con presencia de muescas y frecuencia fundamental.

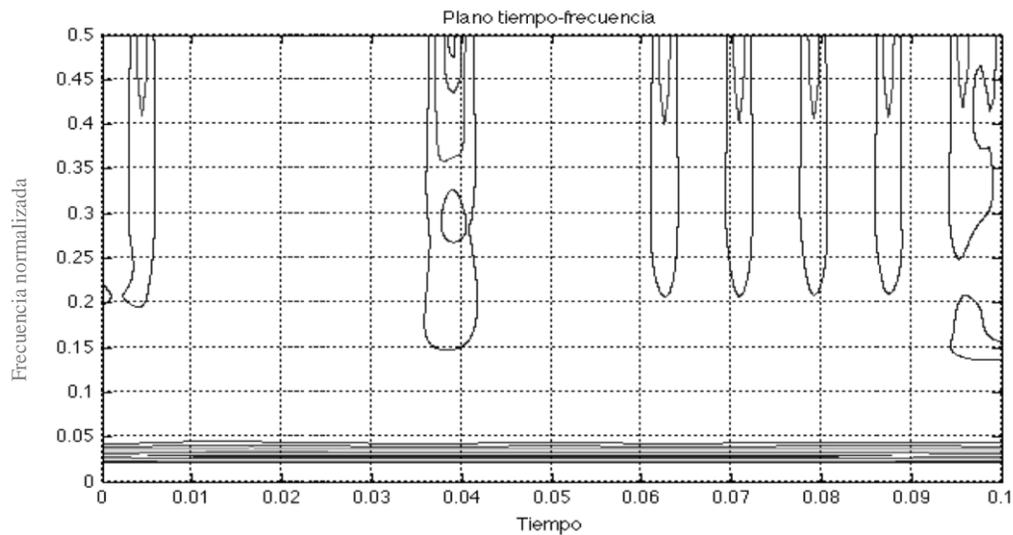


Figura 18. Transformada S de la señal con presencia de muescas y frecuencia fundamental, con  $k = 1$ .

#### 4. Conclusiones

Las interrupciones en el suministro, los huecos de tensión y corriente (sags), sobretensiones (swells) y muescas (notches) son las perturbaciones más relevantes en el estudio de la calidad de energía, tanto por su periodicidad de ocurrencia como por los efectos económicos que causan. La ubicación temporal de un transitorio oscilatorio puede ser determinada mediante el análisis del mayor relieve obtenido en el plano tiempo-frecuencia.

La Transformada S produce una única caracterización de las muescas, las cuales se representan como líneas cortas en el plano tiempo-frecuencia. El ancho de estas líneas es menor que las del transitorio oscilatorio. No todas las muescas son detectadas por la Transformada S. Solamente las muescas más profundas son identificadas. Este inconveniente puede ser solucionado mediante el uso de un valor menor para la constante  $k$ . Por otra parte, los armónicos generan un patrón único en el plano tiempo-frecuencia, los cuales corresponden a patrones periódicos (paralelos al eje del tiempo) en frecuencias mayores a la fundamental. Tanto los sags como swells de tensión son ubicados claramente en el tiempo y en la frecuencia a través del uso de la Transformada S.

Finalmente, la Transformada S proporciona patrones únicos para los distintos tipos de distorsiones existentes en un sistema eléctrico de potencia, lo cual facilita un proceso de caracterización y clasificación de las señales medidas en dicho sistema. Así mismo, la implementación de la metodología propuesta en este trabajo de investigación permitirá la programación adecuada de unidades de generación que se encuentran disponibles en el sistema, de tal manera que se satisfaga la demanda al mínimo costo. Por otro lado, esta metodología también permitirá evaluar la efectividad (diagnóstico) de los diferentes sistemas de control implementados ante la presencia de distorsiones, tanto en sus señales de tensión y/o corriente, lo cual se encuentra estrechamente relacionado con la calidad del servicio de energía eléctrica suministrada. Esto podrá ser realizado en un tiempo de cómputo adecuado, siendo promisorio en sistemas reales, dado que la procedencia de la SDT es a partir de la discretización de la STFT.

#### Agradecimiento

Este trabajo ha sido parcialmente patrocinado por el proyecto Fodein 2019 Universidad Santo Tomás y por el grupo de investigación Calposalle.

#### Referencias

- [1] D. D. Sabin, A. Sundaram, "Quality enhances reliability [power supplies]", en *IEEE Spectrum*, 1996, vol. 33, no. 2, pp. 34-41, doi: 10.1109/6.482272
- [2] W. R. Anis Ibrahim, M. M. Morcos, "Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications: a survey", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 668-673, doi: 10.1109/61.997958
- [3] S. Elphick, P. Ciuffo, G. Drury, V. Smith, S. Perera, V. Gosbell, "Large Scale Proactive Power-Quality Monitoring: An Example From Australia", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 881-889, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2562680
- [4] Y. H. Gu, M. H. J. Bollen, "Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 4, pp. 1279-1284, doi: 10.1109/61.891515
- [5] D. Kumar, F. Zare, "Harmonic Analysis of Grid Connected Power Electronic Systems in Low Voltage Distribution Networks", en *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2016, vol. 4, no. 1, pp. 70-79, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2454537
- [6] G. T. Heydt, P. S. Fjeld, C. C. Liu, D. Pierce, L. Tu, G. Hensley, "Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, vol. 14, no. 4, pp. 1411-1416, doi: 10.1109/61.796235
- [7] P. A. Karafotis, P. S. Georgilakis, "Power quality monitoring and evaluation in power systems under non-stationary conditions using wavelet packet transform", en *High Voltage*, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 186-196, doi: 10.1049/hve.2019.0062
- [8] T. Tarasiuk, Y. Zunino, M. Bueno-Lopez, F. Silvestro, A. Pilatis, M. Molinas, "Frequency Fluctuations in Marine Microgrids: Origins and Identification Tools", en *IEEE Electrification Magazine*, 2020, vol. 8, no. 3, pp. 40-46, doi: 10.1109/MELE.2020.3005698
- [9] D. S. Laila, A. R. Messina, B. C. Pal, "A Refined Hilbert-Huang Transform With Applications to Interarea Oscillation Monitoring", en *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 610-620, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016478

- [10] O. Poisson, P. Rioual, M. Meunier, "Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, vol. 15, no. 3, pp. 1039-1044, doi: 10.1109/61.871372
- [11] F. Zhao, R. Yang, "Power-Quality Disturbance Recognition Using S-Transform", en *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 944-950, doi: 10.1109/TPWRD.2006.881575
- [12] Li, Jianmin, et al. "Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-transform and DAG-SVMs", en *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, vol. 65, no. 10, pp. 2302-2312, doi: 10.1109/TIM.2016.2578518
- [13] Zhong, Tie, et al. "Power quality disturbance recognition based on multiresolution s-transform and decision tree", en *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 88380-88392, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924918
- [14] O. P. Mahela, A. Gafoor Shaik, "Recognition of power quality disturbances using S-transform based ruled decision tree and fuzzy C-means clustering classifiers", *Applied Soft Computing*, 2017, vol. 59, pp. 243-257, doi: 10.1016/j.asoc.2017.05.061
- [15] N. H. T. Huda, A. R. Abdullah, M. H. Jopri, "Power quality signals detection using S-transform", en *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2013, pp. 552-557, doi: 10.1109/PEOCO.2013.6564609
- [16] F. Zhao, R. Yang, "Power quality disturbance recognition using S-transform", en *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, doi: 10.1109/PES.2006.1709411
- [17] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, G. Panda, "Power quality analysis using S-transform", en *IEEE transactions on power delivery*, 2003, vol. 18, no. 2, pp. 406-411, doi: 10.1109/TPWRD.2003.809616
- [18] A. J. E. M. Janssen, "Optimality property of the Gaussian window spectrogram", en *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, vol. 39, no. 1, pp. 202-204, doi: 10.1109/78.80783
- [19] R. Wilson, A. D. Calway, E. R. S. Pearson, "A generalized wavelet transform for Fourier analysis: the multiresolution Fourier transform and its application to image and audio signal analysis", en *IEEE Transactions on Information Theory*, 1992, vol. 38, no. 2, pp. 674-690, doi: 10.1109/18.119730
- [20] I. Daubechies, "The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis", en *IEEE Transactions on Information Theory*, 1990, vol. 36, no. 5, pp. 961-1005, doi: 10.1109 / 18.57199
- [21] M. Varanini et al., "Spectral analysis of cardiovascular time series by the S-transform", *Computers in Cardiology*, pp. 383-386, 1997, doi: 10.1109/CIC.1997.647913
- [22] P. C. Chu, "The s-transform for obtaining localized spectral", *Journal of Marine Technological Society*, vol. 29, no. 4, pp. 28-38, 1996.
- [23] N. Liu, J. Gao, B. Zhang, F. Li, Q. Wang, "Time-Frequency Analysis of Seismic Data Using a Three Parameters S Transform", en *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, vol. 15, no. 1, pp. 142-146, doi: 10.1109/LGRS.2017.2778045
- [24] P. K. Dash, M. Nayak, M. R. Senapati, I.W.C. Lee, "Mining for similarities in time series data using wavelet-based feature vectors and neural networks", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 2, pp. 185-201, 2007, doi: 10.1016/j.engappai.2006.06.018