

**ANÁLISIS DE LA ESCALA DE SEÑALES TRANSITORIAS USANDO  
TRANSFORMADA WAVELET PARA MONITOREO EN TRANSFORMADORES**

**CARLOS ALBERTO ORDÓÑEZ ORDÓÑEZ**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015**

**ANÁLISIS DE LA ESCALA DE SEÑALES TRANSITORIAS USANDO  
TRANSFORMADA WAVELET PARA MONITOREO EN TRANSFORMADORES**

**CARLOS ALBERTO ORDÓÑEZ ORDÓÑEZ**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**DIRECTORES**

**GUILLERMO APONTE MAYOR**

**Ingeniero Electricista Ph.D.**

**EDUARDO GOMEZ LUNA**

**Ingeniero Electricista Ph.D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**SANTIAGO DE CALI**

**2015**

***Este Trabajo es dedicado a:***

*A mí, Madre María Judith Ordóñez quien fue mi gran apoyo en cada instante en que lo necesité, es la que me me ha guiado por el camino del conocimiento y el saber, formándome con buenos principios y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino.*

*Y por último a mi familia y amigos de la carrera, quienes creyeron y estuvieron pendientes de mí, y por enseñarme que ser persona también es importante en la vida profesional..*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios en primer lugar, por haberme dado la vida, la sabiduría y la fuerza para culminar mi carrera con éxito, estando siempre conmigo durante todas las etapas de mi vida.

Agradecer a mi madre María Judith Ordóñez, por brindarme incondicionalmente su apoyo durante mis estudios, porque creyó siempre en mí y eso me ha dado confianza para alcanzar siempre mis metas, por guiarme en el camino de la vida y hacer de mí un buen ser humano, por toda la confianza depositada durante toda mi vida, doy muchas gracias a Dios.

A mis hermanos Nilsa Ordóñez, Ana Ordóñez y Yeison Ordóñez y toda mi familia, por el apoyo incondicional que siempre me brindan.

A mis directores Eduardo Gómez Luna y Guillermo Aponte Mayor por su apoyo y guía durante mi trabajo de grado.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>10</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>1. MONITOREO FRA ON-LINE EN TRANSFORMADORES .....</b>	<b>13</b>
1.1.1    Método IFRA on-line.....	15
1.1.2    Método IFRA on-line mediante Transformada Wavelet.....	16
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>20</b>
<b>2. ANALISIS DE SEÑALES TRANSITORIAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA Y ESCALA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1    Análisis en frecuencia mediante Transformada Wavelet.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2    Análisis en la escala a partir de la energía de los Coeficientes Wavelet 24</b>	
2.2.1    Método de análisis en el dominio de la escala.....	24
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>28</b>
<b>3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS CURVAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA) Y LA ESCALA (SRA) ANTE VARICACIONES DE PARÁMETROS RLC .....</b>	<b>28</b>
3.1.1    Herramienta de análisis: GUI para IFRA y SRA on-line.....	30
3.1.2    Variación de la componente Capacitiva.....	31
3.1.3    Variación Componente Inductiva .....	34
3.1.4    Variación Componente Resistiva.....	37
3.2.1    Análisis del Comportamiento de las Curvas SRA y CWT Respecto a Voltaje y Corriente .....	40
3.2.2    Obtención curvas SRA respecto a Voltaje y Corriente .....	41
3.2.3    Obtención Curvas CWT respecto a Voltaje y Corriente.....	45

<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>49</b>
<b>4 CURVAS FRA Y SRA ONLINE EN TRANSFORMADORES REALES</b> .....	<b>49</b>
4.1 Comparación de los métodos SRA y FRA en Transformadores Piloto .	51
4.2 Comparación de los métodos SRA y FRA empleados en un transformador de distribución .....	64
4.3 Análisis de resultados .....	72
<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>75</b>
<b>5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	<b>75</b>
<b>5.1. Conclusiones del trabajo de grado desarrollado</b> .....	<b>75</b>
<b>5.2. Trabajos Futuros</b> .....	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>77</b>
<b>ANEXO A</b> .....	<b>80</b>
Análisis comparativo de las curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje y corriente en Transformadores Piloto.....	80
I. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de corriente en Transformadores Piloto.....	80
II. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje en Transformadores Piloto.....	83
<b>ANEXO B</b> .....	<b>85</b>
I. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de corriente en un transformador de distribución .....	85
II. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje en untransformador de distribución .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Obtención de IFRA on-line en transformadores .....	14
Figura 2. Montaje experimental transformador piloto .....	17
Figura 3. Etapas para la obtención de FRA on-line .....	18
Figura 4. Prueba experimental en campo de IFRA on-line.....	18
Figura 5. Subestación Sur EMCALI para implementación de prueba IFRA on-line .....	19
Figura 6. Publicaciones Relacionadas Con los Sistemas de Potencia.....	21
Figura 7. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Db4 .....	22
Figura 8. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet .....	22
Figura 9. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet- Modificada .....	23
Figura 10. Coeficientes wavelet en el dominio de la escala .....	26
Figura 11. Esquema de métodos en el tratamiento de señales temporales .....	27
Figura 12. Circuito RLC en ATPDraw.....	28
Figura 13. Simulación temporal del circuito RLC en ATPDraw. ....	29
Figura 14. GUI en Matlab para el tratamiento de señales temporales. ....	30
Figura 15. Variación de los valores de Capacitancia.....	31
Figura 16. Respuesta en frecuencia usando DFT, variando la Capacitancia.....	32
Figura 17. Respuesta en frecuencia usando CWT, variando la capacitancia. ....	33
Figura 18. Respuesta en la Escala (SRA), variando la Capacitancia.....	34
Figura 19. Simulación Circuito RLC en ATPDraw, variación Inductancia del circuito en el dominio temporal. ....	34
Figura 20. Respuesta en frecuencia usando DFT, variación de la Inductancia.....	35
Figura 21. Respuesta en Frecuencia mediante CWT variando la Inductancia del circuito.....	36
Figura 22. Respuesta en la escala (SRA), variando la inductancia.....	36
Figura 23. Simulación Circuito RLC en ATPDraw, Variación Resistencia .....	37
Figura 24. Respuesta en Frecuencia mediante DFT, variación de resistencia .....	37
Figura 25. Respuesta en Frecuencia mediante CWT, variación resistencia del circuito.....	38
Figura 26. Respuesta en la escala mediante Wavelet variando la resistencia del circuito.....	39
Figura 27. Respuesta en la Escala mediante Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la capacitancia del circuito.....	41
Figura 28. Respuesta en la escala usando Wavelet respecto a la corriente, variando la capacitancia del circuito.....	42
Figura 29. Respuesta en la Escala usando Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la Inductancia del circuito. ....	42

Figura 30. Respuesta en la escala mediante Wavelet respecto a la corriente, variando la Inductancia del circuito. ....	43
Figura 31. Respuesta en la Escala mediante Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la Resistencia del circuito .....	44
Figura 32. Respuesta en la escala usando Wavelet respecto a la corriente, variando la resistencia.....	44
Figura 33. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la capacitancia del circuito. ....	45
Figura 34. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la Inductancia del circuito.....	46
Figura 35. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la resistencia del circuito. ....	46
Figura 36. Respuesta en Frecuencia mediante CWT respecto a la corriente, variando la Capacitancia del circuito. ....	47
Figura 37. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto a la corriente, variando la Inductancia del circuito. ....	47
Figura 38. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto a la corriente, variando la resistencia del circuito.....	48
Figura 39. Montaje para llevar a cabo las pruebas experimentales .....	49
Figura 40. Detalles de los pulsos de inyectados (Patente GRALTA). ....	50
Figura 41. Prueba 55 usando el método DFT .....	52
Figura 42. Prueba 55 usando el método CWT .....	53
Figura 43. Prueba 55 usando el método SRA.....	53
Figura 44. Prueba 169 usando el método DFT .....	54
Figura 45. Prueba 169 usando el método CWT .....	55
Figura 46. Prueba 169 usando el método SRA.....	55
Figura 47. Prueba 177 usando DFT .....	56
Figura 48. Prueba 177 usando CWT.....	57
Figura 49. Prueba 177 usando SRA.....	57
Figura 50. Prueba 178 usando DFT .....	58
Figura 51. Prueba 178 usando CWT.....	58
Figura 52. Prueba 178 usando SRA.....	59
Figura 53. Prueba 189 usando DFT .....	59
Figura 54. Prueba 189 usando CWT.....	60
Figura 55. Prueba 189 usando SRA.....	60
Figura 56. Prueba 191(2) usando DFT.....	61
Figura 57. Prueba 191(2) usando CWT .....	62
Figura 58. Prueba 191 (2) usando SRA .....	62
Figura 59. Prueba 210 usando DFT .....	63
Figura 60. Prueba 210 usando CWT.....	63
Figura 61. Prueba 210 usando SRA.....	64

Figura 62. Prueba 215 usando CWT .....	65
Figura 63. Prueba 215 usando SRA.....	65
Figura 64. Prueba 226 usando CWT .....	66
Figura 65. Prueba 226 usando SRA.....	66
Figura 66. Prueba 239 usando CWT .....	67
Figura 67. Prueba 239 usando SRA.....	67
Figura 68. Prueba 245 usando CWT .....	68
Figura 69. Prueba 245 usando SRA.....	68
Figura 70. Prueba 263 usando CWT .....	69
Figura 71. Prueba 263 usando SRA.....	69
Figura 72. Prueba 267 usando CWT .....	70
Figura 73. Prueba 267 usando SRA.....	70
Figura 74. Prueba 292 usando CWT .....	71
Figura 75. Prueba 292 usando SRA.....	71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos iniciales .....	28
Tabla 2. Error Relativo Medio Curvas DFT, CWT y SRA simuladas en ATPDraw.	39
Tabla 3. Análisis MER de las Curvas mediante SRA y CWT .....	48
Tabla 4. Parámetros Prueba 55 .....	51
Tabla 5. Parámetros Prueba 169 .....	54
Tabla 6. Parámetros Prueba 177 .....	56
Tabla 7. Parámetros Prueba 178 .....	57
Tabla 8. Parámetros prueba 189.....	59
Tabla 9. Parámetros prueba 191(2) .....	61
Tabla 10. Parámetros prueba 210.....	62
Tabla 11. MER de la obtención de curvas de un Transformador piloto.....	72
Tabla 12. MER de la obtención de curvas en un Transformador de distribución ..	73
Tabla 13. Resultado análisis comparativo entre los métodos CWT, DFT y SRA ..	74
Tabla 14. Resultados MER de los perfiles de corriente.....	82
Tabla 15. Resultados MER del perfil de voltaje.....	84
Tabla 16. Resultados MER, curvas perfil de corriente .....	86
Tabla 17. Resultados MER, curvas perfil de voltaje .....	88

## RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló el análisis de señales transitorias en el dominio de la escala usando transformada wavelet, en pruebas simuladas y reales en transformadores piloto y distribución. Las pruebas aplicando el método SRA (Análisis de respuesta en la escala) serán comparadas con los métodos DFT (Transformada discreta de Fourier) y CWT (Transformada Wavelet continua).

*Palabras Clave: SRA (Análisis de respuesta en la escala). DFT (Transformada discreta de Fourier). CWT (Transformada Wavelet continua).*

## ABSTRACT

In this paper has developed the analysis of transient signals in the scale domain using Wavelet transform, on simulated and real tests in transformers pilot and distribution. Tests using SRA (Response Analysis on the scale) will be compared with the methods DFT (Discrete Fourier Transform) and CWT (continuous wavelet transform).

*Keywords: SRA (Response Analysis on the scale). DFT (Discrete Fourier Transform). CWT (continuous wavelet transform).*

## INTRODUCCIÓN

Los transformadores son equipos eléctricos de vital importancia para el desarrollo de nuestra sociedad en el campo de la electricidad. Por lo cual es de gran importancia el monitoreo continuo para la detección oportuna de cambios o fallas que puedan afectar la condición de operación y funcionamiento en el sistema eléctrico.

Uno de los métodos que se ha venido implementando para el monitoreo y chequeo del estado del transformador, es el análisis de respuesta en frecuencia (FRA), el cual es una técnica de diagnóstico para detectar deformaciones y desplazamientos principalmente en los devanados y en el núcleo, ésta técnica se lleva a cabo con el transformador fuera de servicio (off-line), sin embargo, se han realizado avances para efectuar la prueba con el transformador en servicio (Luna-Gómez, 2013) (Madrid, España. Patent No. N° P201331592, Ref: UC3M 5183, 2013) donde se han presentado las tendencias actuales y futuras en la aplicación del análisis FRA, logrando realizar el método con el transformador en servicio (on-line). Sin generar pérdidas económicas al sacarlo de funcionamiento.

Actualmente la técnica FRA on-line se viene desarrollando mediante el análisis de respuesta en frecuencia de las señales transitorias que entran y salen del transformador, sin embargo, los resultados obtenidos hasta el momento carecen de repetividad y confiabilidad para llevar a cabo un adecuado diagnóstico, la idea del presente proyecto de grado es complementar los trabajos previos realizados por el Grupo de Investigación en Alta Tensión de la Universidad del Valle, GRALTA (Luna-Gómez, 2013) analizando las señales temporales obtenidas y analizarlas en el dominio de la escala, haciendo uso de la Transformada Wavelet, dado que es donde se tiene la mayor potencialidad para el procesamiento de señales no periódicas y lograr obtener perfiles de curvas que determinen la condición física del transformador y el estado del mismo ante cualquier eventualidad.

## CAPÍTULO I

### 1. MONITOREO FRA ON-LINE EN TRANSFORMADORES

Los transformadores son elementos de suma importancia dentro de los sistemas eléctricos y de sus condiciones operativas depende la integridad del sistema. A menudo se producen anomalías dentro del sistema de potencia que llegan a afectar el estado del transformador. Sucesos tales como corto circuitos, sobretensiones de maniobra, descargas atmosféricas, etc., llegan a producir daños internos en los transformadores tanto en el núcleo como en los devanados que pueden sacarlo de servicio.

Sin embargo, no siempre los daños llegan a ser de alto riesgo, aunque van debilitando la capacidad de soportar fuerzas electromagnéticas futuras, aumentando el riesgo a un daño severo, de aquí parte la necesidad de identificar las posibles anomalías producidas al interior del transformador que prevenga daños del tipo permanente o de muy complicada reparación.

Actualmente las pruebas de rutina no precisan todas las posibles fallas que pueden ocurrir en el transformador y aunque día a día se tengan nuevas técnicas de diagnóstico, aun no existe una que abarque de manera completa el estado del transformador, el complemento de cada una hace posible el análisis de más elementos para realizar un diagnóstico adecuado. La mayoría de estas pruebas requieren de la desconexión del transformador (off-line), lo cual conlleva a una interrupción o disminución del suministro de energía a los usuarios y es aquí donde las pruebas en línea (on-line), se convierten en una poderosa herramienta para el diagnóstico en transformadores.

Existen chequeos estando el transformador en servicio (on-line) (Hassan Abniki, 2010, p.p 1-5, 26-28 Sept. 2010), tal como: análisis de gases disueltos (DGA), análisis de los cambiadores de Tap's, emisión acústica (AE), termografía por infrarrojo, temperatura, descargas parciales (PD), tangente delta (DT) y Capacitancia (C) (Hassan Abniki, 2010, p.p 1-5, 26-28 Sept. 2010). A pesar de contar con estos chequeos, es necesario complementar estas pruebas con otras que permitan determinar el estado de los componentes internos del transformador, como es el caso de la técnica de Análisis de la Respuesta en Frecuencia (FRA).

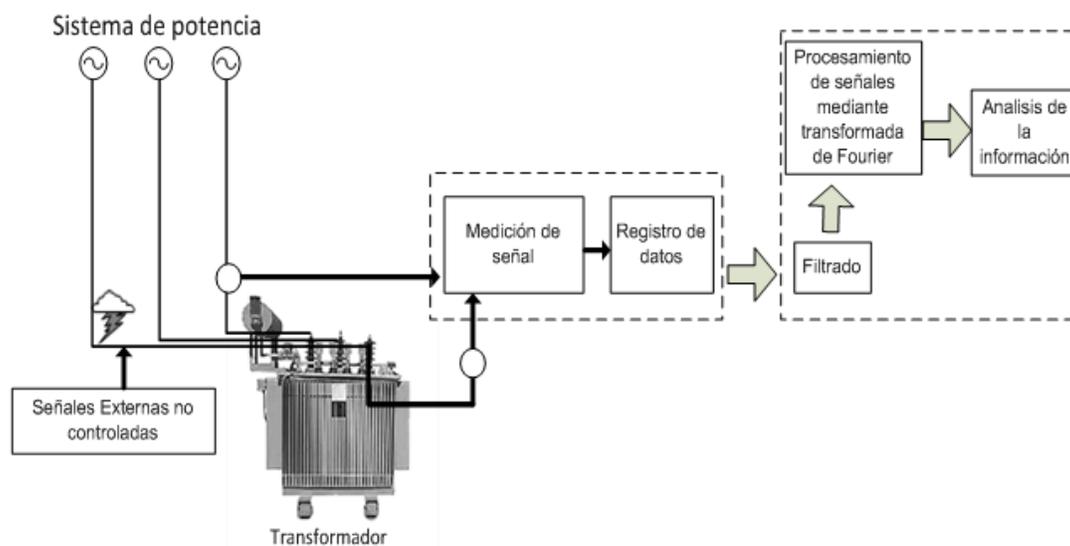
La Prueba FRA (Frequency Response Analysis), es una técnica que actualmente es usada para el diagnóstico de los transformadores; sin embargo, se requiere que el transformador sea desconectado y aislado del sistema, lo que constituye una desventaja a la hora de su implementación.

Recientemente con la aplicación de la prueba estando el transformador energizado (FRA on-line), esta se podría realizar constantemente, permitiendo evaluar la condición del transformador en tiempo real e identificando problemas que puedan llevar a fallos imprevistos, tal como se ha presentado en trabajos de investigación previos (Luna-Gómez, 2013), (Olarte-Olivares, 2014).

## 1.1 FRA ON-LINE

La técnica FRA con el transformador energizado (on-line), ha tenido un gran auge con el método IFRA estando el transformador conectado al resto del sistema de potencia, mediante el uso de señales no controladas provenientes del sistema de potencia (Hassan Abniki, 2010, p.p 1-5, 26-28 Sept. 2010), tal como se muestra de forma esquemática en la Figura 1.

Figura 1. Obtención de IFRA on-line en transformadores



**Fuente.** Figura 3. Obtención de IFRA on-line en transformadores, página 13 (Luna-Gómez, 2013)

Los resultados que se obtienen al realizar la medición bajo condiciones (on-line), son:

- ✓ No se suspendería el suministro de energía al efectuar la prueba.
- ✓ Se analizaría el estado del transformador constantemente, ofreciendo anticipar posibles fallos que lleguen a ser trágicos en el sistema de potencia.
- ✓ Se suprimirían los costos ligados a la desconexión y consecutivamente puesta en funcionamiento del sistema eléctrico.

El alcance de los tres puntos resaltados anteriormente, refleja una mejor explotación del sistema de potencia, destacando la importancia de este tipo de prueba (FRA on-line) para el monitoreo y diagnóstico en los transformadores de potencia en servicio, puesto que la expansión de las redes eléctricas incrementada aceleradamente, ha creado la necesidad de implementar herramientas de

monitoreo on-line que permitan tener características dinámicas del sistema, optimizando las decisiones oportunas para prevenir cualquier tipo falla.

A pesar de los avances y aportes presentados acerca del tema (E. Gómez-Luna G. A.-G., April 2013.), aún se continúan las investigaciones, para perfeccionar el método on-line, ya que es necesario profundizar en temas esenciales como: sistema de inyección on-line, tratamiento de las señales medidas, filtrado de señales y análisis de resultados.

### **1.1.1 Método IFRA on-line**

Actualmente, el principio de la prueba se basa bajo el mismo modelo planteado en la Figura 1, donde el transformador se encuentra conectado al sistema de potencia y la señal de entrada es una tensión no periódica proveniente del sistema de potencia (señales no-controladas).

Las señales no controladas son perturbaciones inherentes a la operación y funcionamiento de la red, como las debidas a maniobras (apertura/cierre de interruptores) o las generadas por descargas atmosféricas. Estas presentan la ventaja de que no es necesario un sistema externo de inyección, pero están sujetas a la aleatoriedad de estos eventos. Adicionalmente, la forma de la perturbación no está controlada por lo que no se puede asegurar un contenido espectral suficiente (Luna-Gómez, 2013).

Tras obtener el sistema de inyección de señales no controladas que entran y salen del transformador, se requiere un proceso de medida para conseguir la función de transferencia del transformador bajo prueba, a continuación se dan a conocer algunos aportes en medidas de este tipo de señales (no-controladas).

La medida de tensión es realizada mediante un Bushing Tap Coupler (BTC) que permite una disminución de la tensión a través de un divisor capacitivo, cuya relación de transformación se mantiene constante en un amplio ancho de banda, tal como se presenta en (M. Melo, 2008), (C. González, 2007).

La medida de la corriente es realizada mediante Bobinas Rogowski, (T. Leibfried, 1994), lo que limita la problemática de la conexión en alta tensión, ya que son no intrusivas y presentan un buen comportamiento en un amplio ancho de banda, de igual manera se utilizan señales no controladas y el mismo sistema de medición.

En los estudios y aportes presentados en (M. Wang A. J., Vancouver, Canada, August 1999)-(R. Malewski, October 1988), se usan de nuevo las señales no controladas y el mismo sistema de medida.

Para el procesamiento de señal se fundamenta en el tratamiento matemático de las señales para adquirir su contenido frecuencial, la Transformada Discreta de Fourier (DFT), ha sido la más usada, sin embargo su uso ha sido cuestionado (D.

C. Robertson, Abril de 1996) ya que la DFT está principalmente definida para señales de duración teóricamente infinita.

Los conflictos y la necesidad de un procesamiento de señal adecuado para el método IFRA on-line han sido tratadas y argumentadas en, (Luna-Gómez, 2013), donde se ha expuesto las grandes ventajas que tienen el procesamiento con Transformada Wavelet para el análisis de señales transitorias superando los métodos tradicionales.

### **1.1.2 Método IFRA on-line mediante Transformada Wavelet**

Debido a las dificultades presentadas al usar Transformada Discreta de Fourier (DFT) en FRA on-line, para el análisis de señales transitorias. Se tiene una opción mediante el uso de la Transformada Wavelet (TW) dado a su versatilidad de aplicaciones y como una nueva alternativa para el análisis de señales transitorias.

La Transformada Wavelet tiene varias ventajas frente al análisis de Fourier, caracterizando eficientemente señales locales no estacionarias y de rápida transitoriedad.

Para superar el inconveniente de la DFT, la transformada Wavelet utiliza ventanas de longitud variable que le permiten obtener, con una ventana amplia, alta resolución en frecuencia y baja resolución en tiempo para bajas frecuencias, y con una ventana estrecha, alta resolución en tiempo y baja resolución en frecuencia para altas frecuencias; es decir, éste método permite el uso de intervalos grandes de tiempo en aquellos segmentos en los que se requiere mayor precisión en baja frecuencia, e intervalos más pequeños donde se requiere información en alta frecuencia.

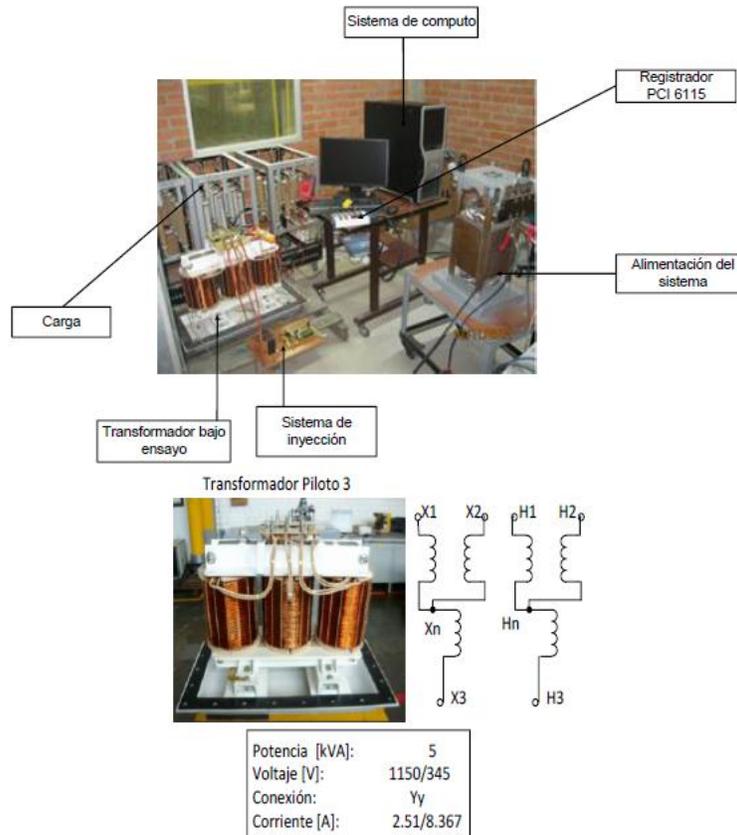
El análisis wavelet es una herramienta matemática que descompone una señal temporal en una suma de señales temporales; cada una de estas tiene diferentes escalas en diferentes niveles de resolución que surgen al dilatar y desplazar una función temporal denominada Wavelet (onda) Madre, esto permite el análisis con diferentes niveles de detalle dando lugar al análisis multiresolución.

Gracias a los trabajos realizados en (Luna-Gómez, 2013), (Martínez, 2002), se estableció que el uso de Wavelet satisface las necesidades para la aplicación de FRA-online. La WT, tal como se usa hoy, presenta dos tipos o clases: La CWT (Transformada Wavelet Continua) y la DWT (Transformada Wavelet Discreta). En (Martínez, 2002), (E. Gómez-Luna G. A., Julio 2013) se establece el uso CWT para la obtención de la impedancia de un transformador desde la respuesta en el tiempo y en la frecuencia, de esta manera se dio paso al uso de WT.

El inicio de las pruebas experimentales en FRA on-line se dio por parte del Grupo de investigación en Alta Tensión GRALTA, (GRALTA, Agosto 2012), a transformadores piloto. En la Figura 2 se presenta el montaje llevado a cabo en un

transformador piloto para la realización de las pruebas FRA on-line, las cuales sirvieron como punto de referencia para continuar con los estudios y pruebas experimentales en transformadores de distribución y actualmente en transformadores de potencia.

Figura 2. Montaje experimental transformador piloto



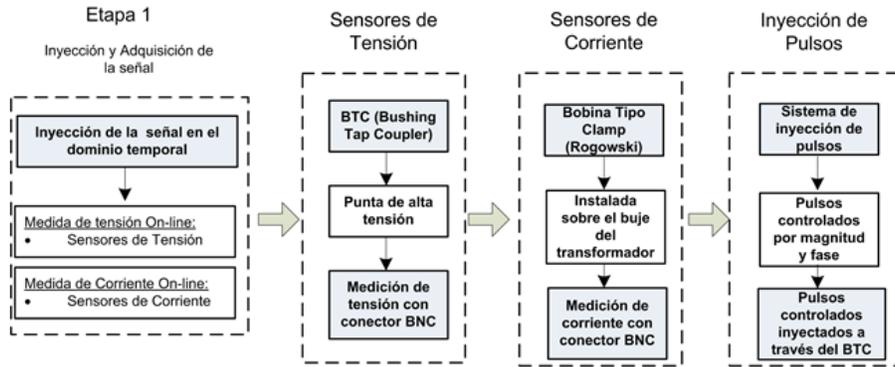
**Fuente:** Figura 55. Montaje experimental en el transformador piloto 3, página 71, (Luna-Gómez, 2013)

Los buenos resultados en las pruebas piloto, propiciaron dar paso a pruebas en un transformador de distribución (llevadas a cabo solo en Colombia), partiendo de (Madrid, España. Patent No. N° P201331592, Ref: UC3M 5183, 2013), (Luna-Gómez, 2013) se presentó y aplicó la propuesta FRA on-line mediante el método IFRA on-line en un transformador de distribución (Olarte-Olivares, 2014).

La prueba experimental en campo se llevó a cabo en un transformador de distribución que alimenta una carga representativa dentro de la Universidad del Valle, (Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas y Circuitos Eléctricos).

En las Figura 3 y Figura 4 se presenta el modelo para llevar a cabo FRA on-line y registros fotográficos de la prueba experimental en campo, en un transformador de distribución, en la cual se tuvo asistencia como auxiliar a cargo de los ingenieros presentes en la prueba.

Figura 3. Etapas para la obtención de FRA on-line



**Fuente:** Figura 4 Etapas para obtener FRA on-line, página 21,(Olarte-Olivares, 2014)

Figura 4. Prueba experimental en campo de IFRA on-line.



La tendencia es aplicar el método en transformadores de potencia en servicio (on-line). Actualmente se lleva a cabo el proyecto por el grupo GRALTA de la Universidad del Valle, titulado “OBTENCIÓN EN CAMPO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA ENERGIZADO”, que se realiza en las instalaciones de la empresa EMCALI, la cual brinda su móvil ubicada en la sede sur para dichas pruebas.

Hasta el momento se ha ejecutado la primera fase del proyecto, la cual compete las pruebas IFRA off-line aplicado en diferentes configuraciones del transformador, en la Figura 5 se dan a conocer algunas imágenes de la primera fase del proyecto.

Figura 5. Subestación Sur EMCALI para implementación de prueba IFRA on-line



La programación de la fase dos (IFRA on-line), se encuentra en desarrollo, se esperan buenos resultados dada la culminación del proyecto, siendo el único vigente a nivel mundial en la aplicación de FRA en un transformador de potencia en servicio.

A pesar que la técnica IFRA- online, es un método nuevo en aplicación y ha dejado buenos resultados experimentales, realizados tanto a transformadores piloto y de distribución, surge un nuevo planteamiento para la aplicación de FRA.

Si trabajar con Wavelet en el dominio de la frecuencia ha dejado excelentes resultados respecto a Fourier en la obtención de FRA on-line, *¿qué resultados se obtendrían si se trabaja con WT, pero en su propio dominio la "escala"? ¿Cómo serían los resultados?*

Partiendo de las preguntas se establece el nuevo método SRA-online (Análisis de Respuesta en la Escala), el cual se trabajará en el presente trabajo de grado, donde se pretende comparar los métodos ya existentes para la obtención de FRA.

Dado que escala es el dominio propio de wavelet, se intuye que al realizar un análisis en el procesamiento de señales no periódicas, la pérdida de información en los resultados sería menor, ya que se evita el paso de cambio a frecuencia.

En el capítulo 2 se abordará el análisis de señales transitorias en el dominio de la escala para describir a profundidad la potencialidad del método planteado.

## CAPITULO II

### 2. ANALISIS DE SEÑALES TRANSITORIAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA Y ESCALA

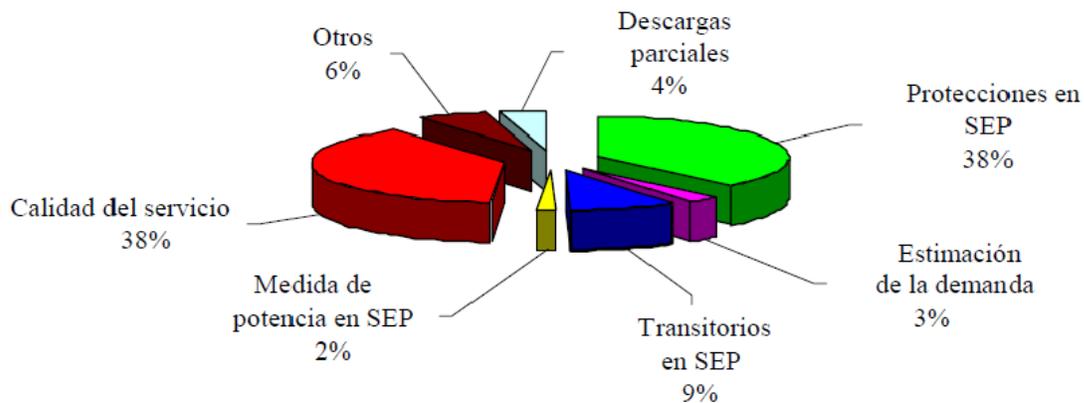
Las señales en el dominio temporal, son variables que se estudian en el área de la ingeniería eléctrica, donde la variable independiente es el tiempo y la variable dependiente es la amplitud. No obstante la información obtenida mediante una señal en el dominio del tiempo en la mayoría de los casos es difícil de comprender, por tal motivo, los análisis se basan en la información que posee la señal en el dominio de la frecuencia, lo que hace necesario el uso de herramientas matemáticas para pasar de la señal temporal al dominio de la frecuencia para un consecutivo análisis.

En los últimos años la Transformada de Fourier ha sido muy utilizada para el análisis de espectros (Aragón, 2009), (V. K. Rai, 2007) el cual consiste en descomponer una señal en términos de componentes sinusoidales, obteniendo la información en el dominio de la frecuencia, sin embargo, cuando se emplea la Transformada Discreta de Fourier, ocurren inconvenientes cuando se requiere el estudio de señales transitorias, puesto que los resultados están limitados a la ventana de análisis de la señal bajo estudio y a la frecuencia de muestreo.

En la actualidad la transformada wavelet ha sobrellevado los inconvenientes de la transformada de Fourier, siendo una herramienta muy ventajosa para el análisis de transitorios, debido a su eficaz análisis local de señales no estacionarias (Luna-Gómez, 2013), (E. Gómez-Luna G. A., Julio 2013), (Zhu., January 2007), (Mallat, 2009), logrando analizar con buena resolución en frecuencia los componentes que oscilan paulatinamente, tales como la frecuencia natural del sistema (60 Hz) y los armónicos. La Transformada Wavelet también brinda buena resolución en tiempo de las componentes que oscilan rápidamente, que por lo general representan eventos transitorios.

El estudio de las Wavelets se ha realizado en diversas áreas, entre ellas, la ingeniería eléctrica, en la cual se ha focalizado en el estudio de transitorios en la red, generados por fallas o aperturas de interruptores. En la Figura 6 se muestra una representación de los campos de la aplicación de Wavelets en la Ingeniería Eléctrica.

Figura 6. Publicaciones Relacionadas Con los Sistemas de Potencia



**Fuente:** (Martínez, 2002)

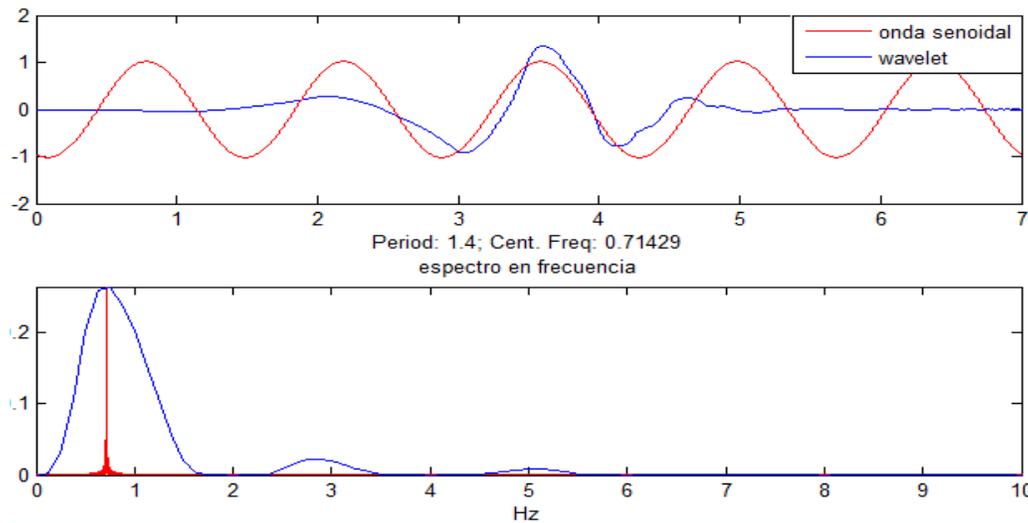
El presente capítulo muestra el tratamiento matemático que se usa para el análisis de señales transitorias mediante transformada wavelet continua en el dominio de la frecuencia y la escala, el objeto de monitorear el transformador.

## 2.1 Análisis en frecuencia mediante Transformada Wavelet

Para el análisis en frecuencia con Transformada Wavelet en (Luna-Gómez, 2013) se establece la selección de la madre wavelet con la cual se obtiene un mejor aprovechamiento para el estudio de señales transitorias, presentando las wavelets que poseen menor dispersión en ancho de frecuencia, aprovechando la riqueza frecuencial que ésta presenta y de esta manera determinar la respuesta en frecuencia de la señal bajo análisis.

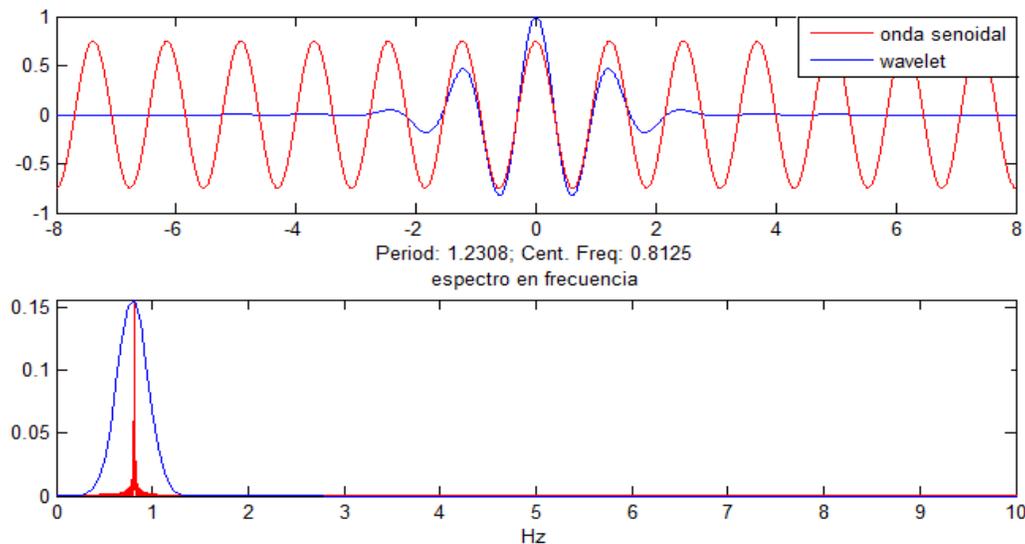
La Figura 7 presenta la dispersión en frecuencia que posee una wavelet madre para este caso se muestra la daubechies 4 (Db4) donde se da a conocer la frecuencia central y el espectro en frecuencia, esto indica la alta dispersión que posee la Db4, por lo tanto, se debe encontrar una wavelet con menor dispersión, de toda la familia de wavelets madre, para un correcto análisis de respuesta en frecuencia, por lo cual en los estudios realizados en (Luna-Gómez, 2013), se mostró la gran selectividad en frecuencia que posee la madre Morlet ante la wavelet Db4, tal como se indica en la Figura 8.

Figura 7. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Db4



**Fuente:** Figura 45. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Db4., página 60 (Luna-Gómez, 2013)

Figura 8. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet



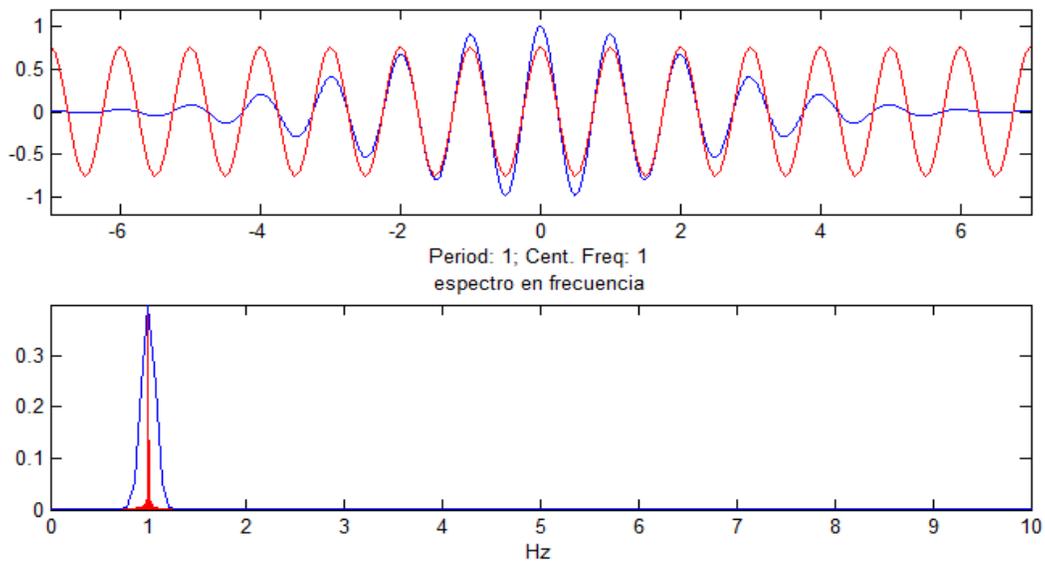
**Fuente:** Figura 46. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet, página 60 (Luna-Gómez, 2013)

Del estudio realizado la madre Morlet es la que presentó un ancho de banda estrecho lo que hace que se tenga una menor dispersión en frecuencia y mayor selectividad para el análisis frecuencial de señales transitorias, Figura 8.

En dicho estudio se realizaron algunas modificaciones a los parámetros de la madre Morlet (1) para el caso IFRA on-line, dándole un tiempo de atenuación más amplio, logrando con esto que el ancho de banda de la wavelet fuera más angosto para el caso de aplicación, generando menos dispersión en frecuencia para el análisis de transitorios.

En la Figura 9 se muestra el espectro en frecuencia y la frecuencia central de la wavelet Morlet-Modificada, lo cual muestra una mejor selectividad en frecuencia que la Morlet básica, cumpliendo con las condiciones necesarias para ser una wavelet madre.

Figura 9. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet-Modificada



**Fuente:** Figura 47. Frecuencia central y espectro en frecuencia de la wavelet Morlet-Modificada, página 61 (Luna-Gómez, 2013)

Sin embargo se puede notar que al permitir que la madre Morlet-Modificada tenga más oscilaciones se logra que el ancho de banda de la wavelet sea más estrecho, pero se continua con una dispersión en frecuencia esto se puede evidenciar en la Figura 9

Una vez definida la wavelet madre con la cual se va a trabajar (Morlet-Modificada) Figura 9, se procede a analizar los transitorios de voltaje y corriente para obtener el espectro en frecuencia.

El método consiste en llevar la información del dominio del tiempo al dominio wavelet y luego al dominio de la frecuencia, por lo cual, es necesario aplicar la relación dada por la ecuación (2).

$$f_a = \frac{f_c}{a \cdot \Delta t} \quad (1)$$

Donde:

$f_a$  es la frecuencia asociada a la escala determinada

$f_c$  es la frecuencia central de la wavelet madre

$a$  es la escala

$\Delta t$  es el periodo de muestreo de la señal a analizar

## 2.2 Análisis en la escala a partir de la energía de los Coeficientes Wavelet

Para este caso no es necesario realizar una transformación del dominio de la frecuencia a la escala dado que al aplicar la transformada wavelet a una señal en el dominio temporal, directamente los coeficientes obtenidos quedan en el dominio de la escala, es decir, el procedimiento en la escala ahorra un proceso de conversión de datos lo cual se puede convertir en un método más exacto, dado que no se tiene el problema de la dispersión en frecuencia.

Para el caso de la selección de la wavelet madre en el dominio de la escala, se debe tener en cuenta que la escogencia de una wavelet madre modifica la respuesta, por lo tanto es necesario que los resultados sean analizados siempre con la misma wavelet madre con el objeto de realizar comparaciones, dado que el método wavelet utiliza la correlación entre la wavelet madre y la señal temporal entonces los resultados cambian si se cambia la wavelet madre.

### 2.2.1 Método de análisis en el dominio de la escala

Una vez se define la conversión del dominio wavelet al dominio de la frecuencia se procede a determinar la manera en que se obtiene el voltaje y la corriente en el tiempo como una serie de la transformada wavelet desde los coeficientes, tal como se indica en (2).

$$f(t) = \sum_a \sum_{\tau} C_f(\tau, a) \Psi_{a,\tau}(t) \quad (2)$$

De acuerdo con (2), el voltaje puede ser obtenido tal como se indica en (3):

$$V(t) = \sum_a \sum_{\tau} C_V(\tau, a) \Psi_{a,\tau}(t) \quad (3)$$

De acuerdo a lo anterior se puede entonces definir  $V_a(t)$  asociado con una escala en particular, y por lo tanto a una frecuencia en particular, tal como se indica en (4) y (5).

$$V_a(t) = \sum_{\tau} C_V(\tau, a) \Psi_{a,\tau}(t) \quad (4)$$

$$V(t) = \sum_a V_a(t) \quad (5)$$

La energía de los coeficientes wavelet se calcula de acuerdo con el teorema de Parseval, donde se plantea que la energía de una señal que se encuentra en un dominio determinado, es igual a la energía de la señal en el dominio de la transformada.

Por lo tanto una vez obtenida la matriz de coeficientes a partir de la transformada wavelet continua (CWT) de una señal temporal, se utiliza (6), para calcular la energía de los coeficientes asociados a cada escala.

$$e_a = \sum_{\tau} (C(\tau, a))^2 \quad (6)$$

Donde  $e_a$  es la energía de los coeficientes para la escala  $a$ .

En (7) se presenta la expresión para determinar el valor RMS de la señal de voltaje a partir de la energía asociada en cada escala de los coeficientes wavelet.

$$\|V_a\| = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} V_a^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{\tau} (C_V(\tau, a))^2} \quad (7)$$

De igual manera se aplica el mismo procedimiento para la señal de corriente, tal como se indica en (8).

$$\|I_a\| = \sqrt{\sum_{\tau} (C_I(\tau, a))^2} \quad (8)$$

Consecuentemente la impedancia obtenida a partir de la señal de voltaje y corriente a partir de los coeficientes wavelet se presenta en (9) y (10)

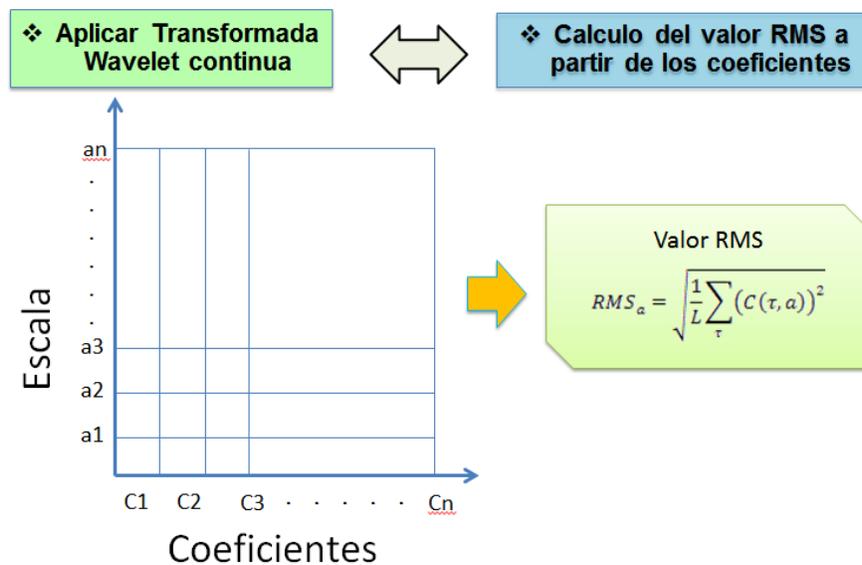
$$\| Z_a \| = \frac{\| V_a \|}{\| I_a \|} \quad (9)$$

$$|Z_a| = \sqrt{\frac{\sum_{\tau} (C_v(\tau, a))^2}{\sum_{\tau} (C_i(\tau, a))^2}} \quad (10)$$

Donde  $Z_a$  es la impedancia para una escala determinada y  $C_v$  y  $C_i$  son las matrices de coeficientes obtenida de las señales de voltaje y corriente, respectivamente. De esta manera usando las ecuaciones (9) y (10) se puede extraer la impedancia en el dominio de la escala desde una respuesta temporal.

La Figura 10 presenta un esquema de la manera como se operan los coeficientes wavelet en el dominio de la escala.

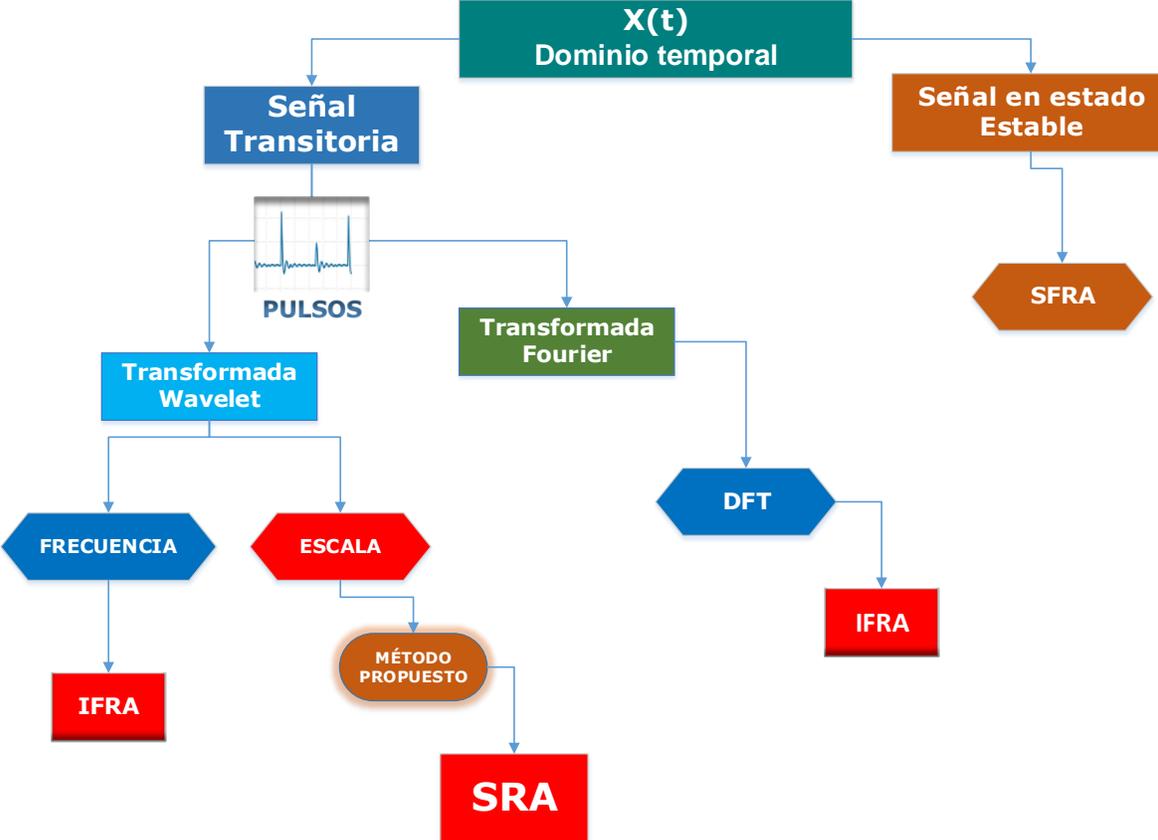
Figura 10. Coeficientes wavelet en el dominio de la escala



**Fuente:** Presentación, página 44 (Luna-Gómez, 2013)

En la Figura 11 se presenta un diagrama de flujo donde se indican los métodos existentes y el propuesto en el tratamiento de señales transitorias y en estado estable.

Figura 11. Esquema de métodos en el tratamiento de señales temporales



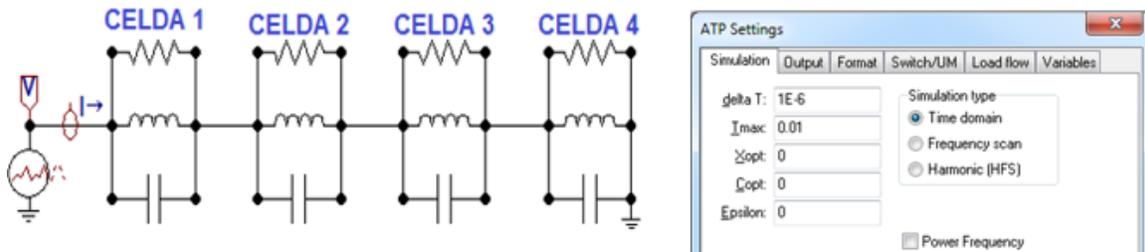
## CAPÍTULO III

### 3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS CURVAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA (FRA) Y LA ESCALA (SRA) ANTE VARICACIONES DE PARÁMETROS RLC

Mediante el programa ATPDraw se realizan diferentes simulaciones de circuitos RLC ante la apertura y cierre de switches para obtener transitorios de voltaje y corriente, esto con el fin de obtener la respuesta en frecuencia y analizar la variación de la curva ante variaciones en los parámetros RLC .

Para analizar los datos en el dominio de la frecuencia y la escala, cada simulación realizada en ATPDraw, era exportada en formato .txt y procesada en una Interfaz Grafica de Usuario (GUI) desarrollada en Matlab, creada para la obtención de IFRA Off-line mediante herramientas matemáticas tales como: Fourier y Wavelet en el dominio de la frecuencia y la escala.

Figura 12. Circuito RLC en ATPDraw



La Figura 12 muestra un conjunto de Celdas compuestas por elementos RLC, las cuales se alimentan con una fuente que inyecta pulsos de voltaje de amplitud de 10 volt y un ancho del pulso de 1 microsegundo ( $t_w$ ) por un lapso de tiempo de 10 milisegundos para obtener una respuesta en frecuencia determinada .

En la Tabla 1 se presentan los datos referencia, como punto de partida para realizar las variaciones de los parámetros del circuito RLC Figura 12.

Valores iniciales	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4		Nombre de archivo
	R( $\Omega$ )	5.805,7767	R( $\Omega$ )	35,1388	R( $\Omega$ )	23,3885	R( $\Omega$ )	1333,7614	Condiciones Iniciales
L(H)	0,11919	L(H)	0,06834	L(H)	0,05035	L(H)	614,4		
C(F)	0,000461	C(F)	0,057452	C(F)	0,74327	C(F)	1,4624		

Tabla 1. Datos iniciales

La Figura 13 muestra la simulación en ATPDraw de la obtención del pulso de voltaje y corriente obtenidos en el dominio temporal.

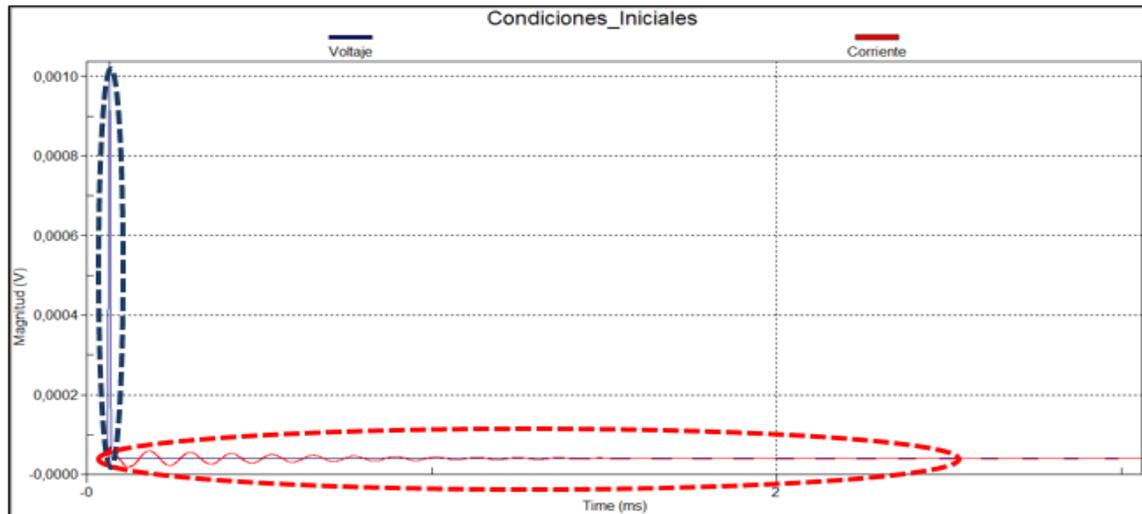


Figura 13. Simulación temporal del circuito RLC en ATPDraw.

### 3.1 Procedimiento para el análisis de la información obtenida.

- a) Se toman como referencia (Tabla 1) los datos del circuito RLC de la Figura 12
- b) Se exportan las señales transitoria de voltaje y corriente desde ATPDraw en el dominio temporal.
- c) Se filtra la onda de 60 Hz., en el caso de que las señales sean on-line.
- d) Se escoge una ventana de análisis para el procesamiento de señal.
- e) Se aplica un proceso de eliminación de ruido en caso de que sea necesario.
- f) Para el caso IFRA-online se trabaja la morlet-modificada y para el caso SRA se trabajó con la morlet clásica definida en Matlab.
- g) Se realiza el procesamiento de señal para obtener las curvas de FRA y SRA mediante la GUI desarrollada en Matlab (3.1.1) con los datos referencia.
- h) Se varían los parámetros de la capacitancia, inductancia y resistencia del circuito RLC de la Figura 12, con el fin de establecer cambios en las curvas obtenidas de acuerdo con la referencia y se repiten los pasos a-b.

- i) Establecer y definir el comportamiento de las curvas analizadas con los métodos existentes implementados en Matlab.
- j) Comparar las curvas obtenidas con el método SRA respecto a las obtenidas con el método FRA.

### 3.1.1 Herramienta de análisis: GUI para IFRA y SRA on-line

La Figura 14 muestra la pantalla de visualización de la versión actualizada de la GUI en Matlab desarrollada para el tratamiento de señales temporales. En ésta se describen 8 zonas, las cuales se describen a continuación.

Figura 14. GUI en Matlab para el tratamiento de señales temporales.



Zona 1: Se establece el valor de ganancia de voltaje y corriente según los equipos usados en la prueba y seguidamente se carga las señales.

Zona 2: Muestra las señales temporales de voltaje y tiempo.

Zona 3: Aplicación de filtro onda de 60 Hz

Zona 4: Elección de la ventana de análisis (duración, tiempo inicial y número de pulsos.)

Zona 5: Elección del método DFT o CWT para obtener las curvas FRA. Opciones de voltaje, corriente e impedancia.

Zona 6: Aplicación del método en la escala para obtener las curvas SRA. Opciones de perfil de voltaje, corriente e impedancia.

Zona 7: Presentación de las curvas obtenidas después del tratamiento de las señales

Zona 8: Se encuentra el botón limpiar (borra todas las curvas graficadas), exportar (mejor visualización de las curvas en una nueva pestaña) y MER (muestra el error relativo de las curvas, tomando como referencia la curva inicial)

### 3.1.2 Variación de la componente Capacitiva

En este caso se varía la capacitancia del circuito RLC (Figura 12) simulado en ATPDraw, incrementando sus valores en 30%, 60% y 90% respecto a los valores de referencia.

La Figura 15 muestra los pulsos obtenidos de voltaje y corriente en el dominio temporal, donde se presenta una mayor oscilación en la respuesta temporal para el caso cuando se varía la capacitancia del circuito en un 90%.

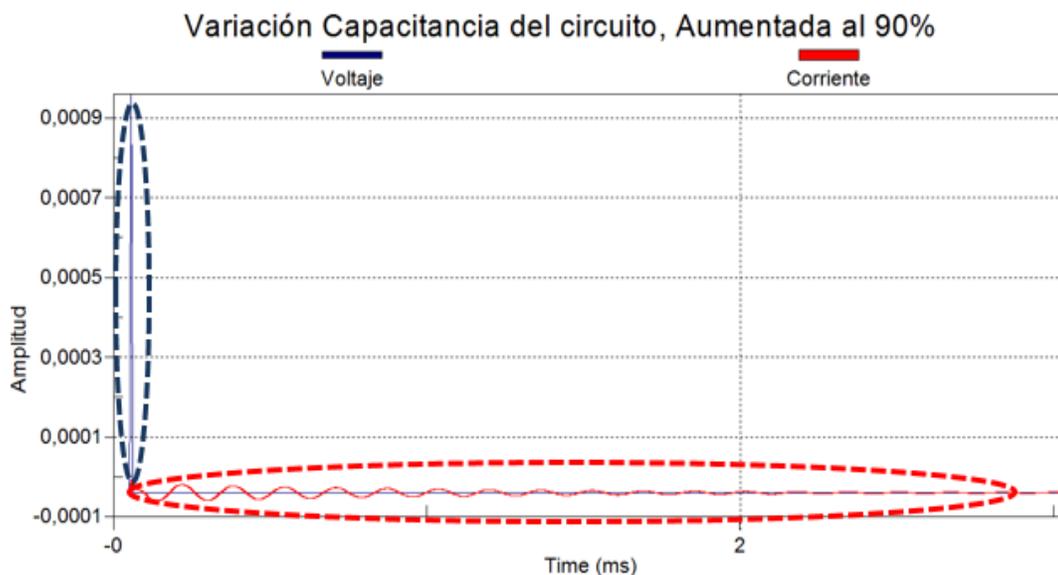


Figura 15. Variación de los valores de Capacitancia.

De esta manera se procede con el tratamiento de la señal en Matlab para obtener la respuesta en frecuencia mediante los métodos DFT, CWT y SRA, con los

cuales se visualiza el comportamiento de las curvas, ante cada variación de capacitancia.

- En la Figura 16 se presenta el método IFRA off-line mediante DFT, donde observa que:
  - ✓ Se produce un desplazamiento en frecuencia de la onda en los rangos de  $10^3$  y  $10^5$  Hz hacia la izquierda, y con un decremento paulatino en la amplitud Z (ohm) a medida que se incrementa el valor de la capacitancia del circuito.
  - ✓ Para que el método sea favorable es necesario un tratamiento de la señal eliminando el ruido numérico.
  - ✓ Se observa que a partir de  $10^5$  Hz la señal presenta una distorsión en frecuencia considerable donde no se podría establecer un análisis.

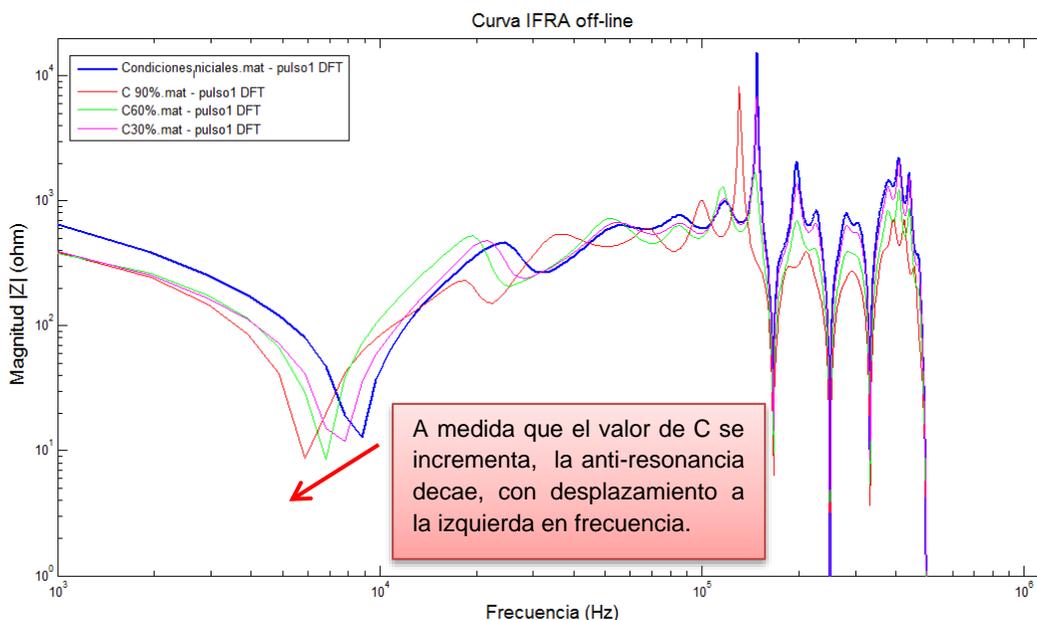


Figura 16. Respuesta en frecuencia usando DFT, variando la Capacitancia.

- La Figura 17 presenta el método IFRA off-line mediante CWT, se observa que:

- ✓ La onda presenta un desplazamiento en frecuencia hacia la izquierda entre 6 kHz y 15 kHz y reducción en magnitud a medida que se incrementa el valor de la capacitancia. Presenta mayor suavidad y menor distorsión respecto a las curvas por medio de DFT.
- ✓ A partir de  $10^5$  a  $10^6$  Hz la onda solo sufre cambios en la magnitud la cual va disminuyendo a medida que crece el valor de capacitancia.
- ✓ La gráfica ofrece un comportamiento suave en la curva entre  $10^3$  y  $10^5$  Hz.

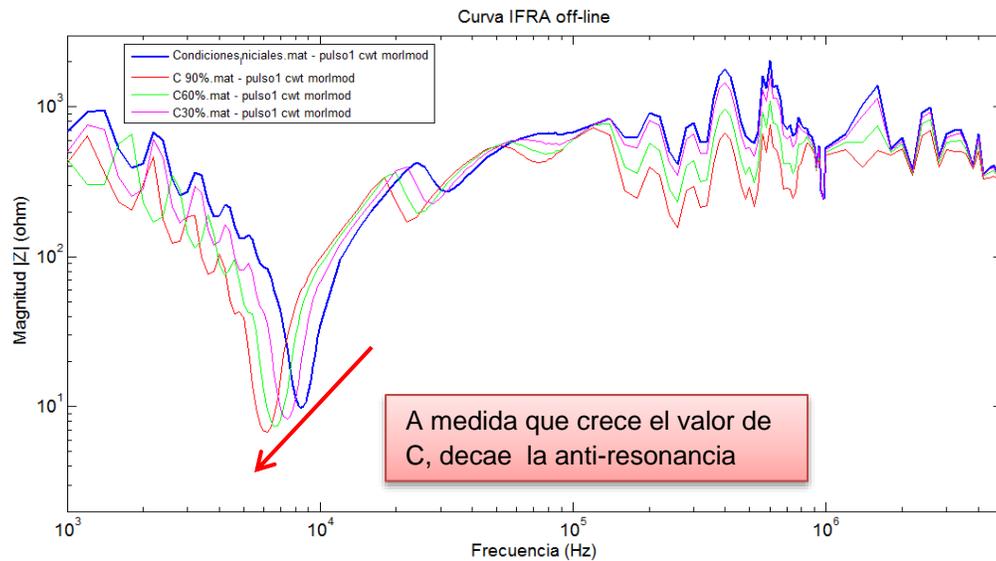


Figura 17. Respuesta en frecuencia usando CWT, variando la capacitancia.

- En la Figura 18 se presenta el método SRA off-line (Análisis de respuesta en el dominio de la escala), con las diferentes variaciones de la capacitancia, donde se observa que:
  - ✓ Se produce un desplazamiento de la onda con tendencia a una mayor escala y decayendo lentamente el coeficiente de energía en la proporción en que se incrementa el valor de la capacitancia del circuito.
  - ✓ Presenta buena resolución entre  $10^0$  y  $10^3$  en escala, además las curvas tienen más suavidad mejorando la visualización ante las variaciones efectuadas.
  - ✓ Antes de dar inicio al estudio se tenía presente que la escala se comportaba inverso a la frecuencia.

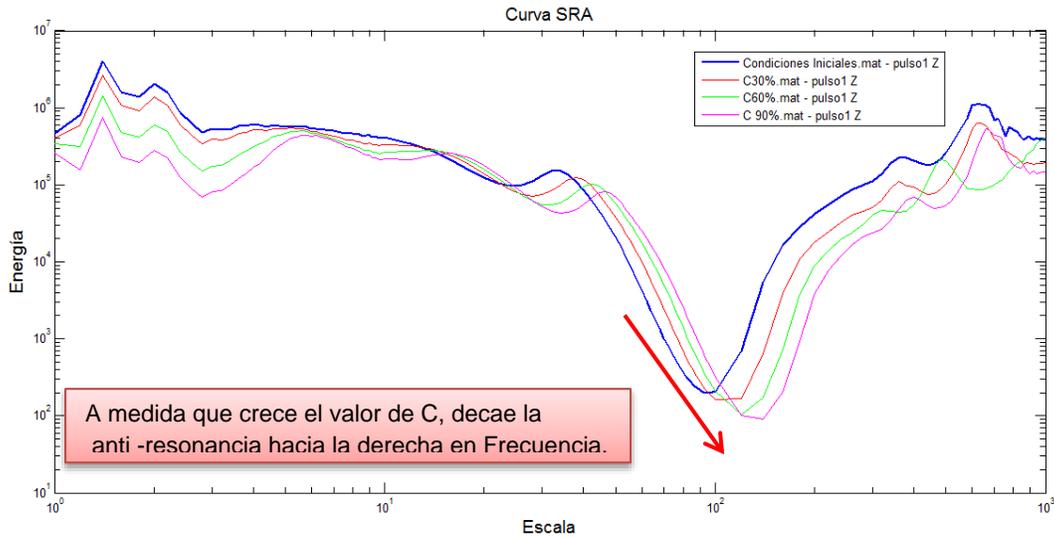


Figura 18. Respuesta en la Escala (SRA), variando la Capacitancia.

### 3.1.3 Variación Componente Inductiva

En este caso se varía la inductancia del circuito, tomando valores referencia del circuito e incrementando en 30%, 60% y 90% la inductancia.

En la Figura 19 se representa la variación de la inductancia respecto a condiciones iniciales en el dominio temporal de la inductancia aumentada al 90%, donde se observa una pequeña atenuación de la respuesta temporal de la corriente.

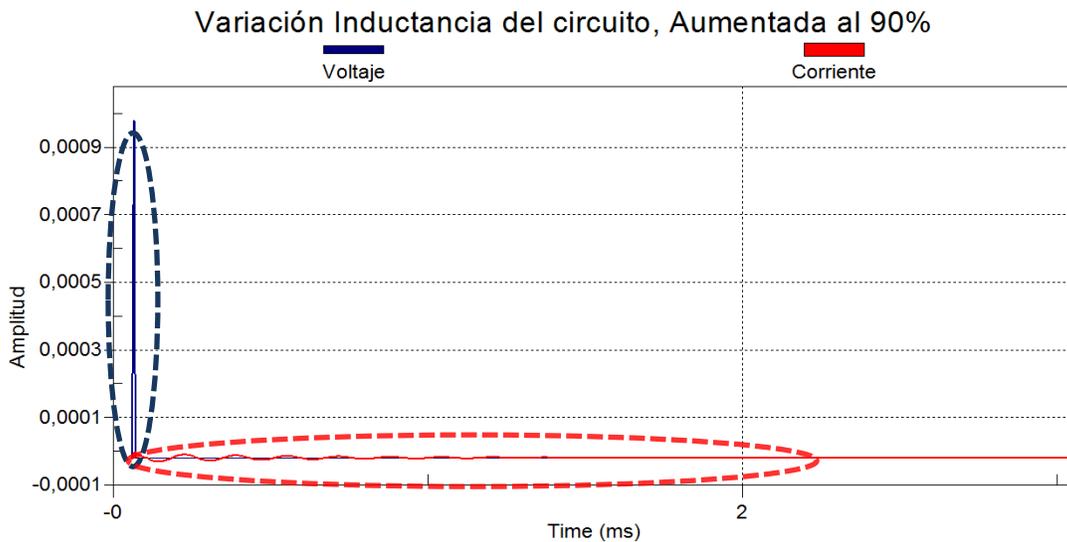


Figura 19. Simulación Circuito RLC en ATPDraw, variación Inductancia del circuito en el dominio temporal.

- En la Figura 20 se presenta el método IFRA off-line mediante DFT, donde:
  - ✓ A medida que la inductancia del circuito es mayor, se presentan desplazamientos en la curvas hacia la izquierda y disminución en la magnitud en los picos donde se genera el desplazamiento.

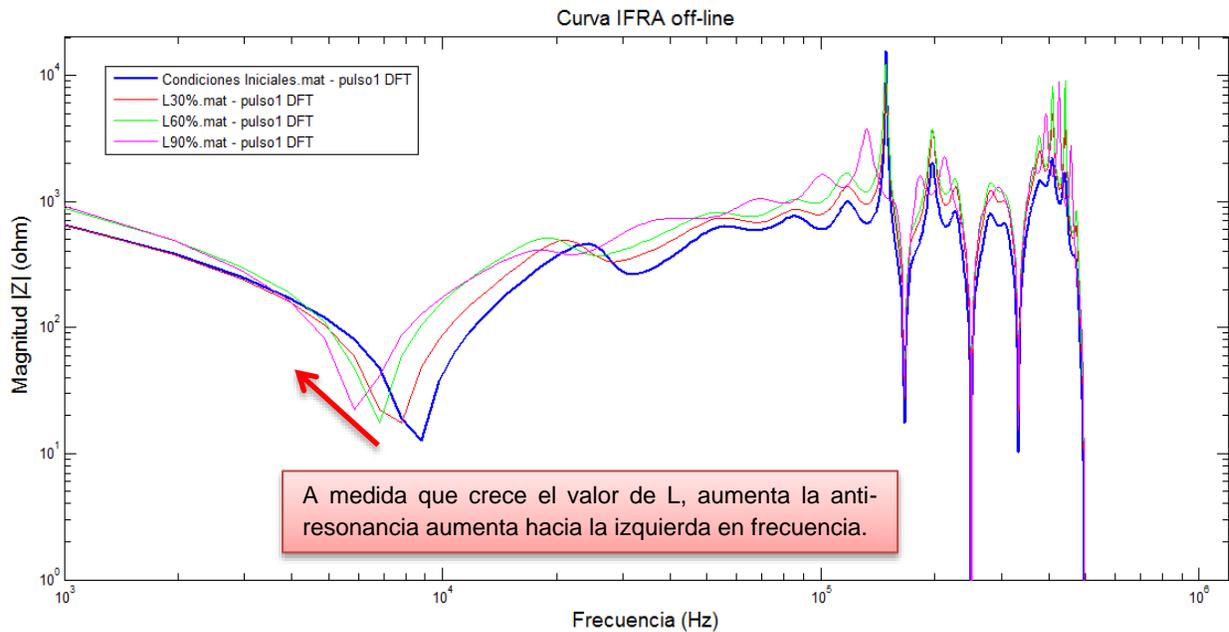


Figura 20. Respuesta en frecuencia usando DFT, variación de la Inductancia

- En la Figura 21 se presenta el método IFRA off-line mediante CWT, donde se observa:
  - ✓ El comportamiento de la onda sufre desplazamientos a niveles menores de frecuencia y presenta una elevación en magnitud en los picos referentes a los cambios generados por la variación de la inductancia.
  - ✓ La anti-resonancia aumenta hacia la izquierda (menores) frecuencias.

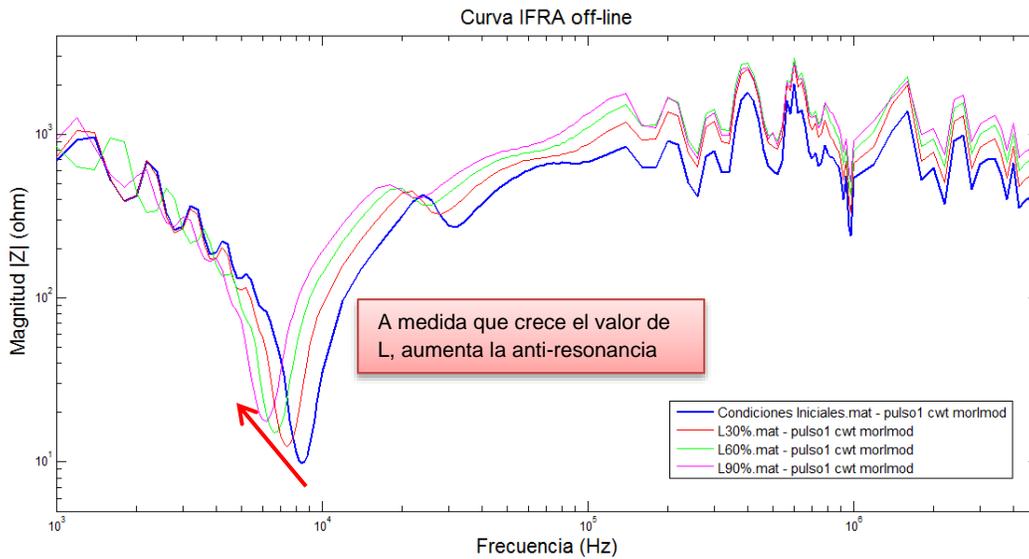


Figura 21. Respuesta en Frecuencia mediante CWT variando la Inductancia del circuito

- Figura 22 presenta el método SRA off-line, donde se varía la inductancia del circuito, donde:
- ✓ Se presenta un patrón de tendencia a medida que se incrementa la inductancia del circuito, con un desplazamiento en las ondas hacia una mayor escala, incrementando lentamente el coeficiente de energía a medida que se eleva el valor de la inductancia.

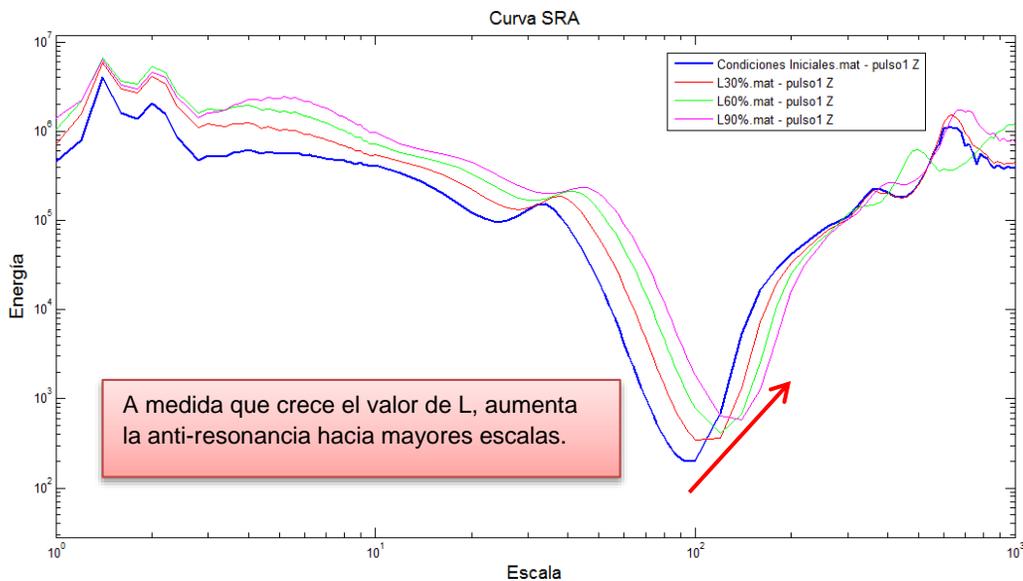


Figura 22. Respuesta en la escala (SRA), variando la inductancia

### 3.1.4 Variación Componente Resistiva

Se varían los parámetros de resistencia del circuito, tomando como referencia condiciones iniciales e incrementando en 30%, 60% y 90% sus valores, obteniendo las curvas con los métodos anteriormente aplicados.

En la Figura 23 se presenta la variación de la resistencia respecto a condiciones iniciales en el dominio temporal (caso 90%).

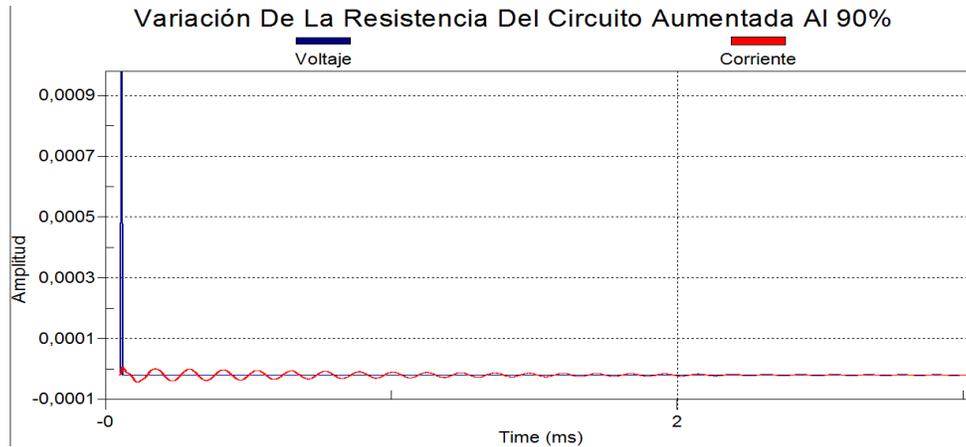


Figura 23. Simulación Circuito RLC en ATPDraw, Variación Resistencia

- Figura 24 se presenta el método IFRA off-line usando DFT ante incrementos de la resistencia del circuito, donde:

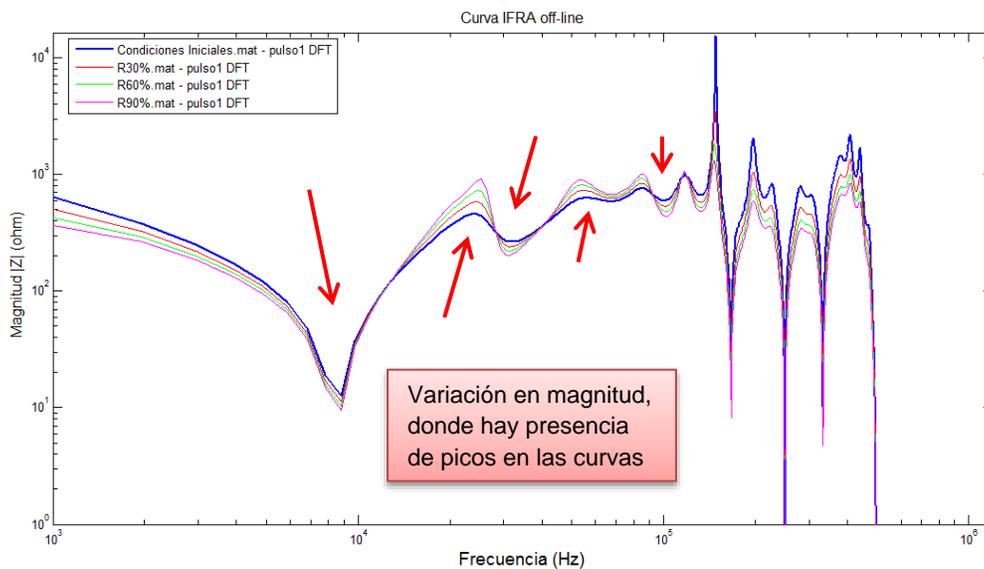


Figura 24. Respuesta en Frecuencia mediante DFT, variación de resistencia

Ante variaciones de resistencia en el circuito, éste solo responde con cambios dados en la amplitud de la curva, pero las oscilaciones tanto del voltaje como de la corriente se mantienen.

- La Figura 25 se presenta el método IFRA off-line mediante CWT, donde:
  - ✓ Los cambios presentados en las curvas se aprecian en la magnitud  $Z$  (ohm), dados en las zonas picos, mientras que en frecuencia permanece relativamente constante.

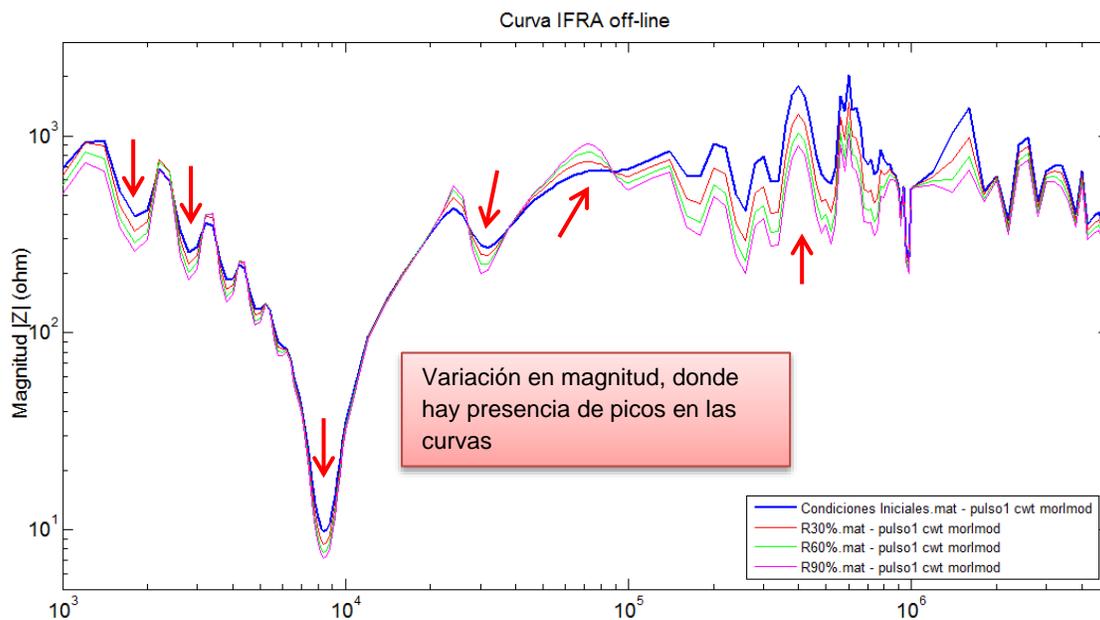


Figura 25. Respuesta en Frecuencia mediante CWT, variación resistencia del circuito.

- En la Figura 26 se presenta el método SRA off-line mediante wavelet en el dominio de la escala ante incrementos de resistencia, donde:
  - ✓ Al igual que los dos métodos anteriores, SRA presenta el mismo comportamiento, a diferencia que este caso se ve afectado el cambio en niveles de energía, aunque en la escala es más notorio los cambios de resistencia reflejados en los puntos picos de las ondas.
  - ✓ En este dominio se puede establecer una mayor sensibilidad ante una variación en resistencia.

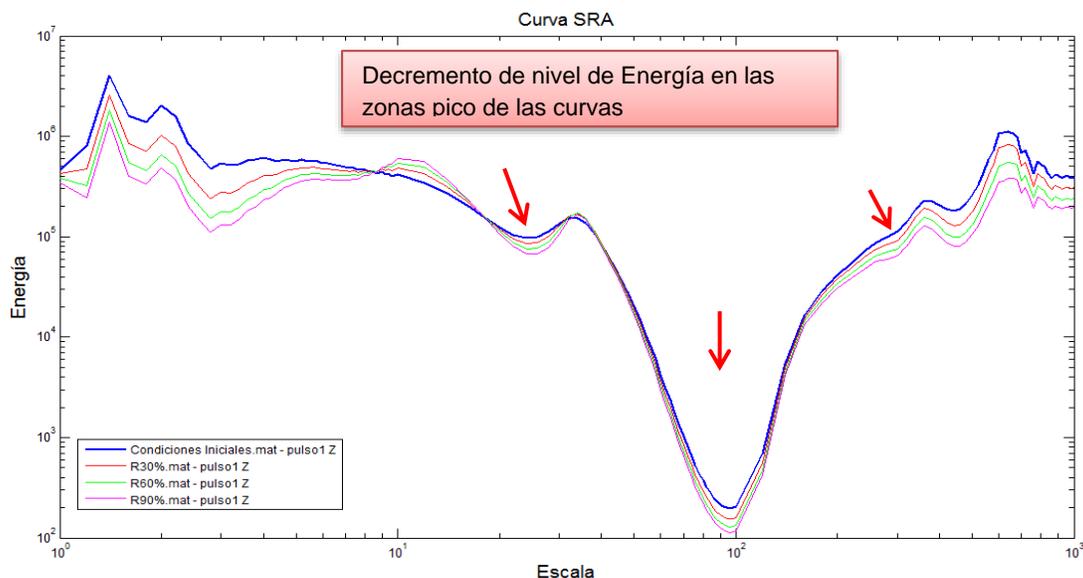


Figura 26. Respuesta en la escala mediante Wavelet variando la resistencia del circuito.

En la Tabla 2 se muestra el MER (Error Relativo Medio) de las curvas obtenidas mediante cada uno de los métodos implementados:

Análisis MER Curvas ATPDraw									
Método	DFT			CWT			SRA		
Parámetro	C=0-30%	C=0-60%	C=0-90%	C=0-30%	C=0-60%	C=0-90%	C=0-30%	C=0-60%	C=0-90%
Capacitancia	15.35%	40.60%	61.11%	25.70%	50.11%	66.33	45.24%	85.67%	132.25%
Método	DFT			CWT			SRA		
Parámetro	L=0-30%	L=0-60%	L=0-90%	L=0-30%	L=0-60%	L=0-90%	L=0-30%	L=0-60%	L=0-90%
Inductancia	46.24%	77.99%	95.63%	42.00%	88.99%	124.64%	90.16%	275.04%	552.57%
Método	DFT			CWT			SRA		
Parámetro	R=0-30%	R=0-60%	R=0-90%	R=0-30%	R=0-60%	R=0-90%	R=0-30%	R=0-60%	R=0-90%
Resistencia	9.19%	15.79%	20.87%	11.44%	18.74%	23.81%	19.32%	31.87%	40.46%

Tabla 2. Error Relativo Medio Curvas DFT, CWT y SRA simuladas en ATPDraw.

En Tabla 2, se aprecia que el análisis mediante SRA presenta mayor sensibilidad ante cambios en los parámetros de resistencia, inductancia y capacitancia, ya que el MER es mayor en cada caso respecto a los métodos DFT y CWT, esto se puede ver como una gran ventaja cuando se tienen pequeñas variaciones de los parámetros RLC y se desean detectar para evitar alguna falla de un equipo eléctrico.

Una vez terminado la obtención de las curvas, mediante cada uno de los métodos respecto a la impedancia (Z), se resalta que:

- ✓ Se corrobora la efectividad a la hora de trabajar con wavelet Figura 18, en relación a las curvas obtenidas con Fourier Figura 16, Fourier presenta debilidades ya que su naturaleza es trabajar con señales periódicas.
- ✓ Al igual que en frecuencia se puede establecer un patrón en la escala para determinar qué elementos del sistema sufrieron cambios, ya sea de capacitancia, inductancia o resistencia, puesto que se presenta una tendencia en las curvas al variar dichos parámetros (Figura 26, Figura 28, Figura 30).
- ✓ El comportamiento en la escala es inverso respecto a los métodos en frecuencia, para altas frecuencias se tiene una escala baja donde se presenta buena resolución y para bajas frecuencias se tiene una alta escala (Figura 26- Figura 32 )
- ✓ La obtención de las curvas en la escala arrojaron buenos resultados (Figura 18, Figura 26- Figura 32), dado que sin aplicar la eliminación de ruido matemático, presentan suavidad en la curva.
- ✓ Siendo la escala el dominio propio de wavelet se podría estipular que al pasar al dominio en frecuencia se presente pérdidas de información al usar una transformada pasando al dominio de la frecuencia, por eso es necesario continuar con los análisis comparativo de pruebas escala-frecuencia, buscando evidenciar las ventajas y desventajas de cada método.

### **3.2.1 Análisis del Comportamiento de las Curvas SRA y CWT Respecto a Voltaje y Corriente**

Adicionalmente, se presenta el comportamiento de las curvas obtenidas con wavelet en el dominio de la escala y frecuencia, tomando por separado el perfil de corriente y el voltaje para establecer un comportamiento patrón.

Partiendo del mismo circuito que se trabajó anteriormente (Figura 12), se procede a identificar el comportamiento de las curvas, variando las componentes del circuito RLC, anteriormente se hizo el análisis respecto a impedancia ( $Z$ ), en este caso se realiza respecto a voltaje y corriente, comparando los métodos de wavelet en frecuencia y escala.

### 3.2.2 Obtención curvas SRA respecto a Voltaje y Corriente

En la Figura 27 se da a conocer el comportamiento de las curvas obtenidas al variar la capacitancia del circuito RLC, tomando la señal de voltaje mediante wavelet en el dominio de la escala.

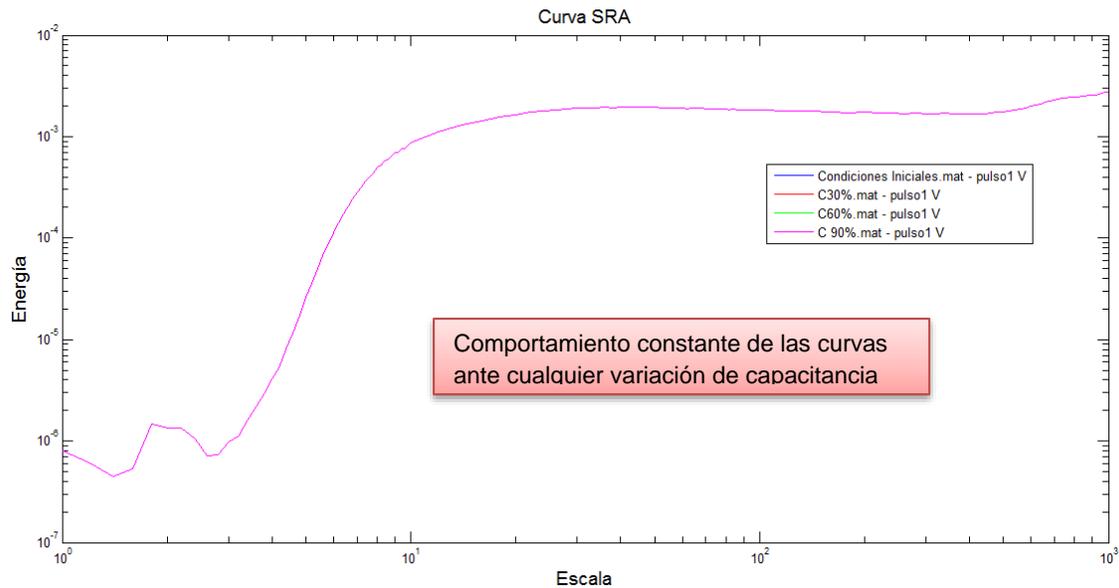


Figura 27. Respuesta en la Escala mediante Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la capacitancia del circuito.

- ✓ Tras obtener las curvas SRA en relación al voltaje, variando los parámetros de las capacitancias en las celdas, el comportamiento de las curvas fue el mismo ante cada variación, sin presentar cambios respecto a condiciones iniciales como se observa en la Figura 27. Esto era algo que se suponía dado que el pulso de voltaje no cambia debido a que es inyectado por una fuente externa de voltaje, por lo tanto se espera que la corriente presente variación dado que es la respuesta al pulso inyectado.

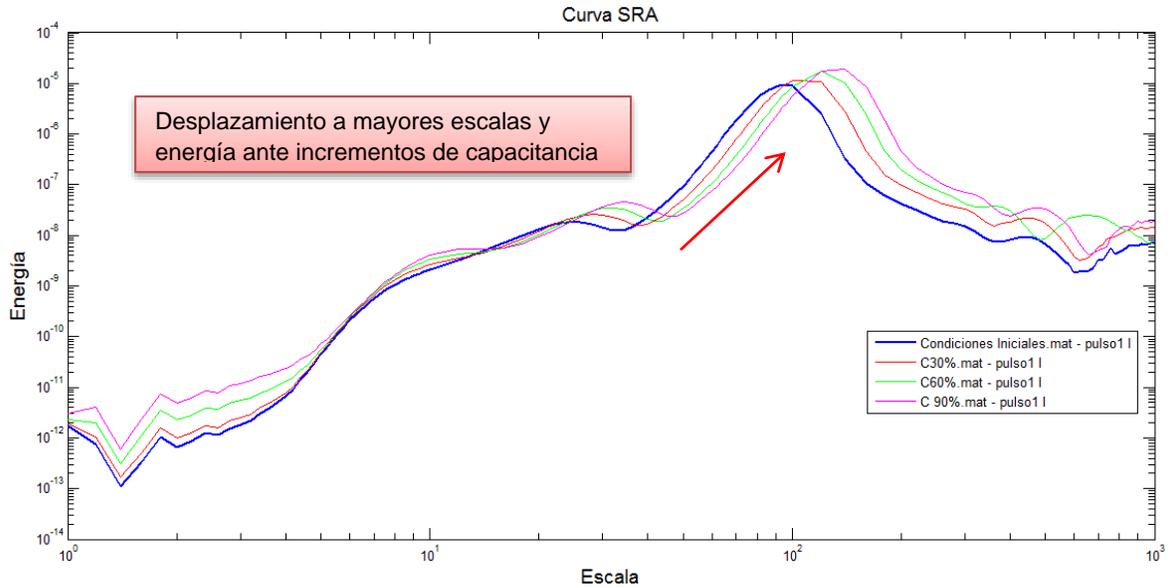


Figura 28. Respuesta en la escala usando Wavelet respecto a la corriente, variando la capacitancia del circuito

- ✓ Cuando las curvas se obtienen respecto a la corriente, notoriamente se ve una variación con un patrón establecido respecto a condiciones iniciales, donde ocurre un desplazamiento de la onda en la escala hacia la derecha (menores escalas) y una elevación en energía a medida que incremento el valor de la capacitancia (Figura 28).

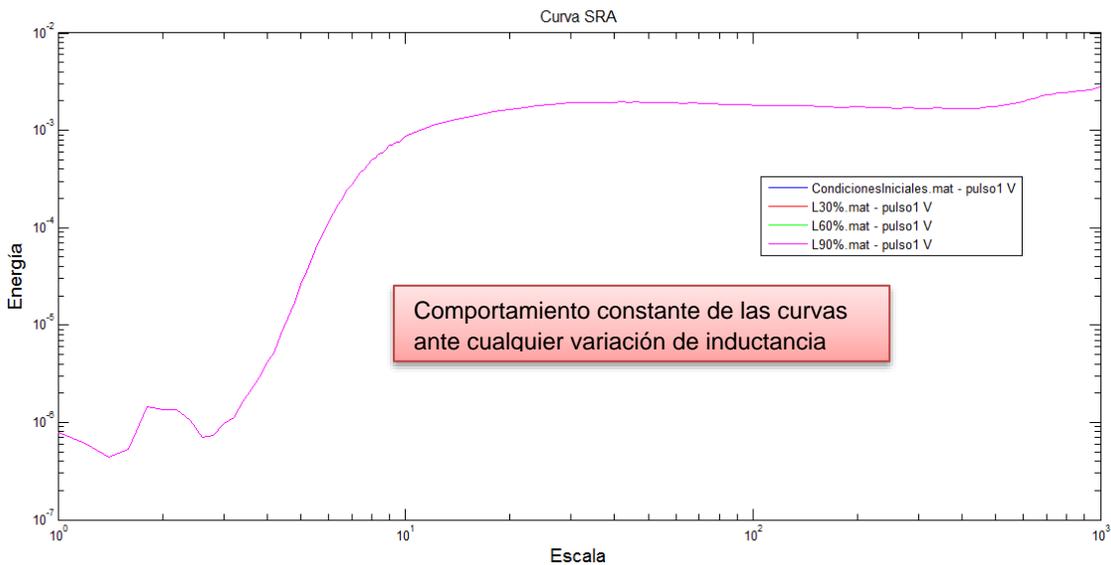


Figura 29. Respuesta en la Escala usando Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la Inductancia del circuito.

- ✓ En la Figura 29, al igual que en la Figura 27, no se presenta ningún cambio como se habría premeditado para los casos respecto al voltaje.

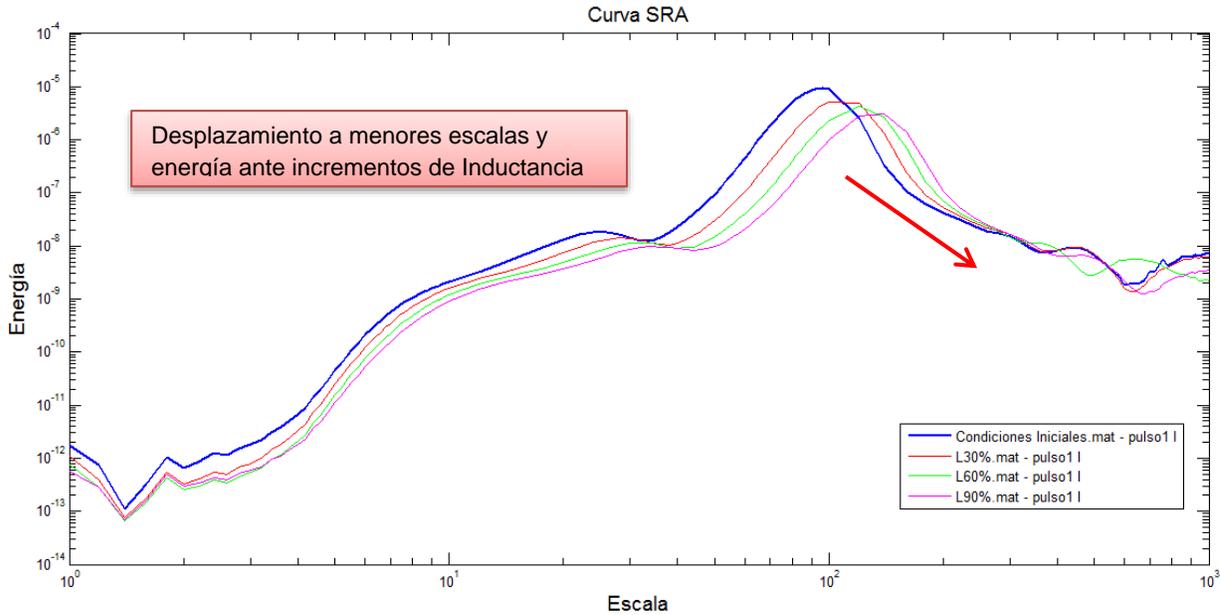


Figura 30. Respuesta en la escala mediante Wavelet respecto a la corriente, variando la Inductancia del circuito.

En la Figura 30 se observa una variación en las curvas, con un desplazamiento hacia la derecha (en escala) y disminución en los picos (energía) a medida que se va incrementando el valor de las inductancias.

La Figura 31 muestra el comportamiento de las curvas respecto al voltaje, ante una variación de resistencia en el circuito mediante SRA, donde no se aprecia ningún cambio en comparación a la curva en condiciones iniciales.

De esta manera se corrobora que no importa el parámetro a variar en el circuito, puesto el comportamiento de las curvas será el mismo cuando se realiza el análisis respecto al voltaje, dado que el pulso es el mismo.

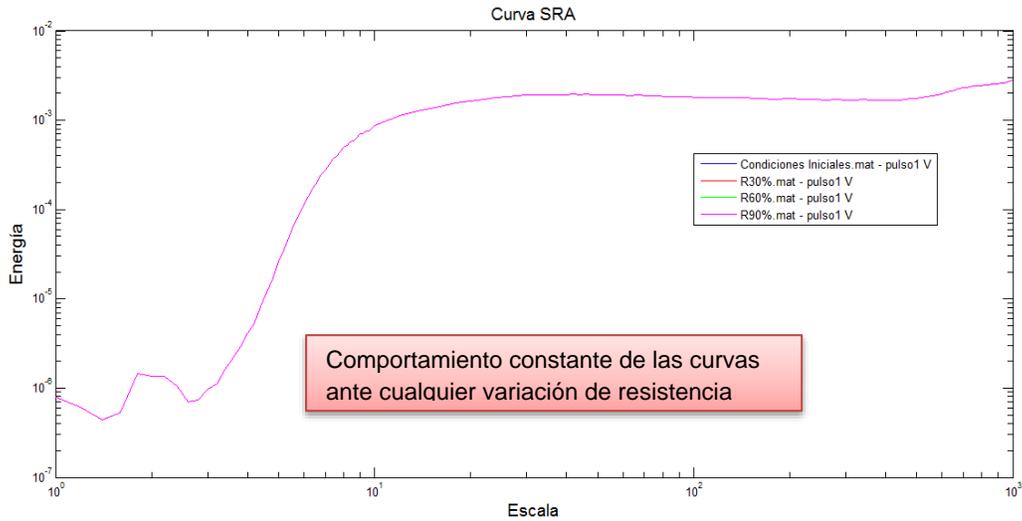


Figura 31. Respuesta en la Escala mediante Wavelet respecto al pulso de voltaje, variando la Resistencia del circuito

En los puntos donde la Figura 32 se presenta variación respecto a la curva en condiciones iniciales, ostenta un comportamiento de crecimiento de la onda en energía a medida que el valor de la resistencia incrementa en las celdas del circuito

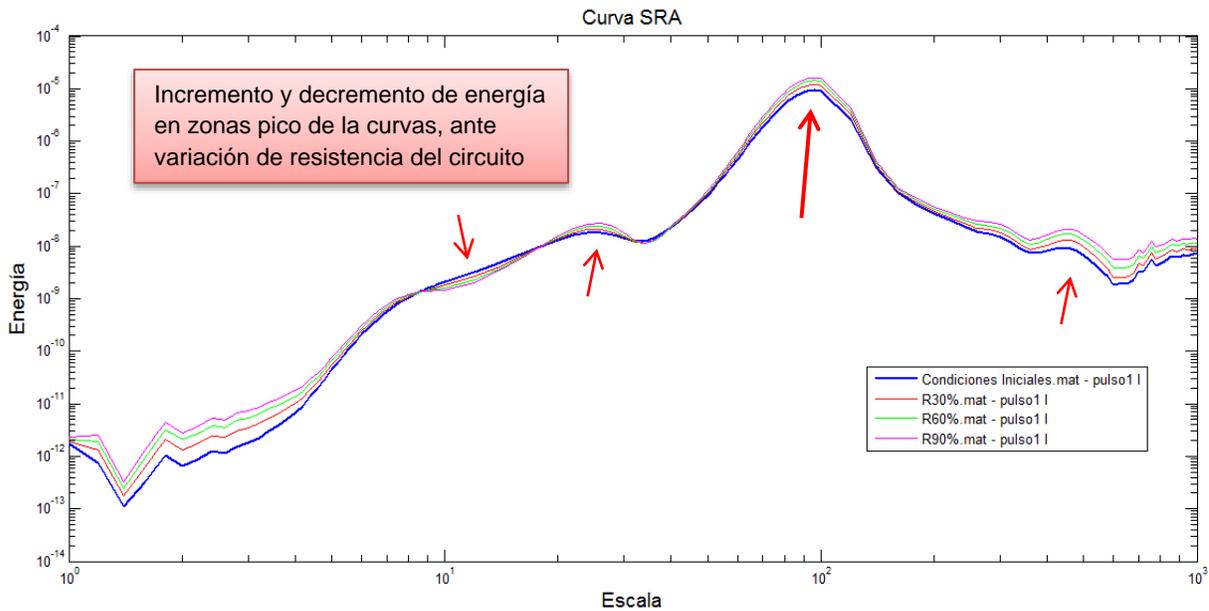


Figura 32. Respuesta en la escala usando Wavelet respecto a la corriente, variando la resistencia.

Dado el análisis mediante el método SRA, respecto a voltaje y corriente se puede decir que:

- ✓ Se encontró un patrón de comportamiento de las curvas en la escala para identificar un determinado cambio de una de sus componentes ya sea de capacitancia, inductancia o resistencia, todo esto cuando se trabaja respecto a la corriente.
- ✓ Se corroboró que cuando se obtienen las curvas respecto al voltaje, sin importar el cambio de parámetros a las componentes del circuito estas presentan el mismo comportamiento ya que el pulso de voltaje es el mismo.
- ✓ Las curvas presentan alta suavidad y son adecuadas para el análisis de sensibilidad planteado ante variaciones de los parámetros RLC.

### 3.2.3 Obtención Curvas CWT respecto a Voltaje y Corriente

En las Figura 33 - Figura 35 se presentan las curvas respecto al voltaje, obtenidas mediante CTW, las cuales presentan el mismo proceder que se dio mediante SRA, debido a que pulso de voltaje no cambia, a pesar de las variaciones presentadas en el sistema.

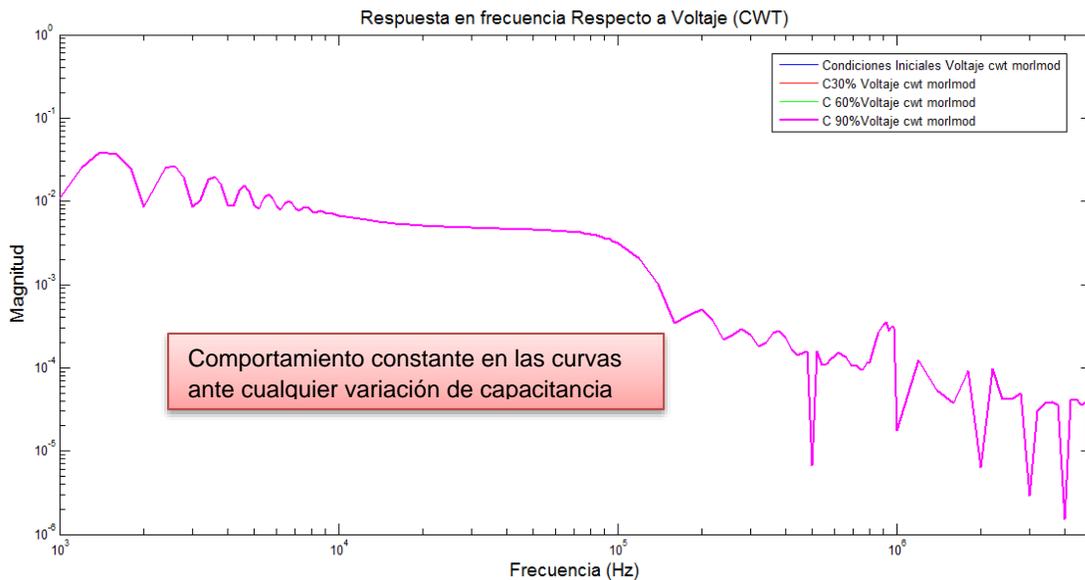


Figura 33. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la capacitancia del circuito.

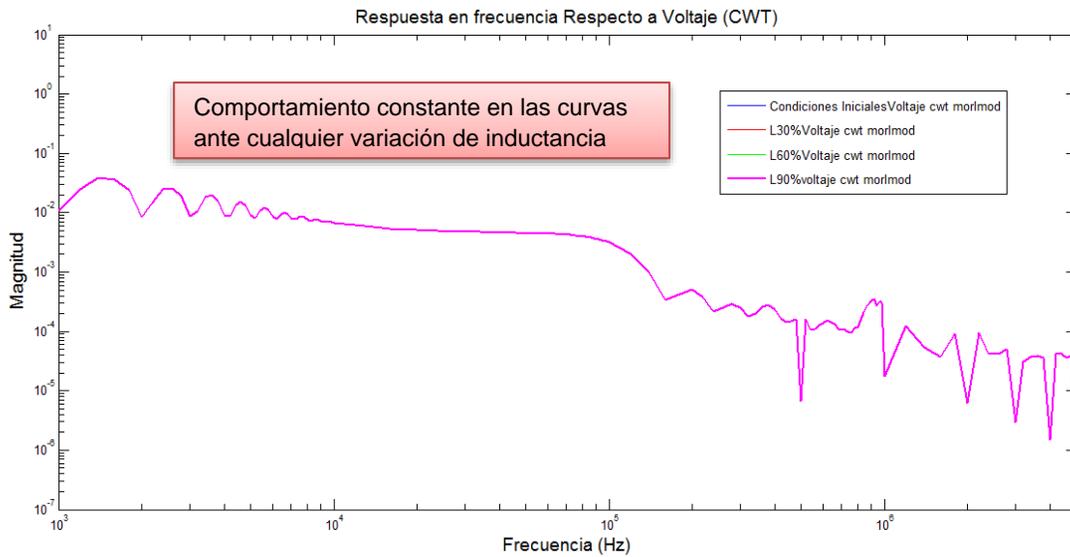


Figura 34. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la Inductancia del circuito.

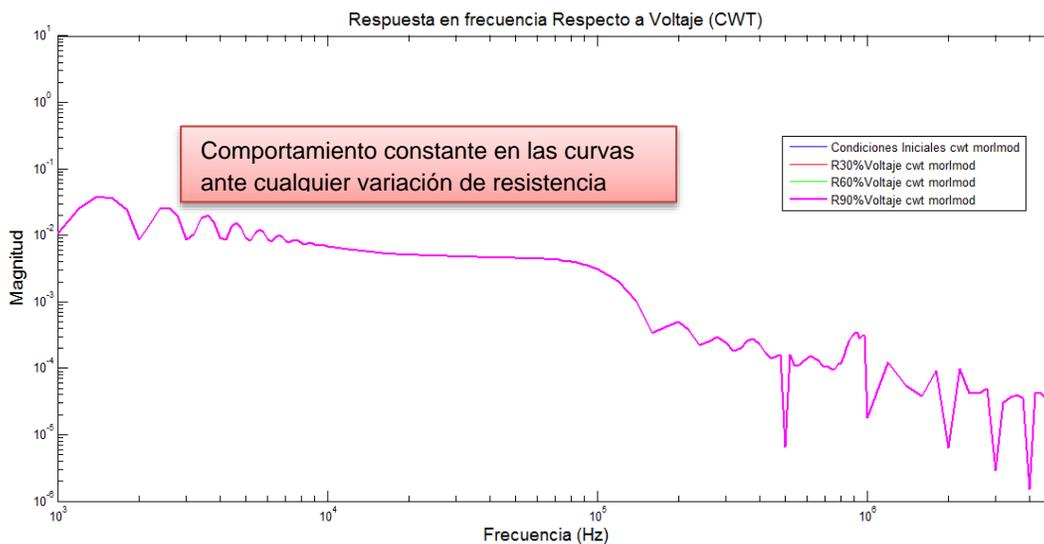


Figura 35. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto al voltaje, variando la resistencia del circuito.

La Figura 36 muestra la respuesta en frecuencia respecto a la corriente mediante CWT variando C; a medida que crece el valor de la capacitancia, se produce un desplazamiento hacia la izquierda (menores frecuencias) entre  $5 \times 10^3$  y  $1 \times 10^4$  Hz aumentando en magnitud.

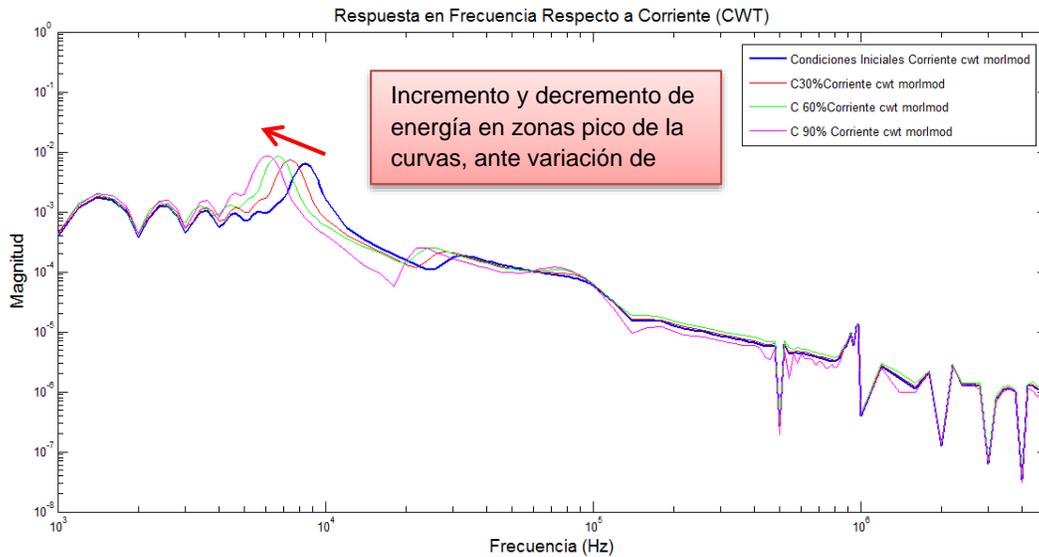


Figura 36. Respuesta en Frecuencia mediante CWT respecto a la corriente, variando la Capacitancia del circuito.

La Figura 37 presenta la respuesta en frecuencia respecto a la corriente mediante CWT variando L; a mayor inductancia, se produce un desplazamiento hacia la izquierda (menores frecuencias) entre  $5 \times 10^3$  y  $1 \times 10^4$  Hz disminuyendo su magnitud.

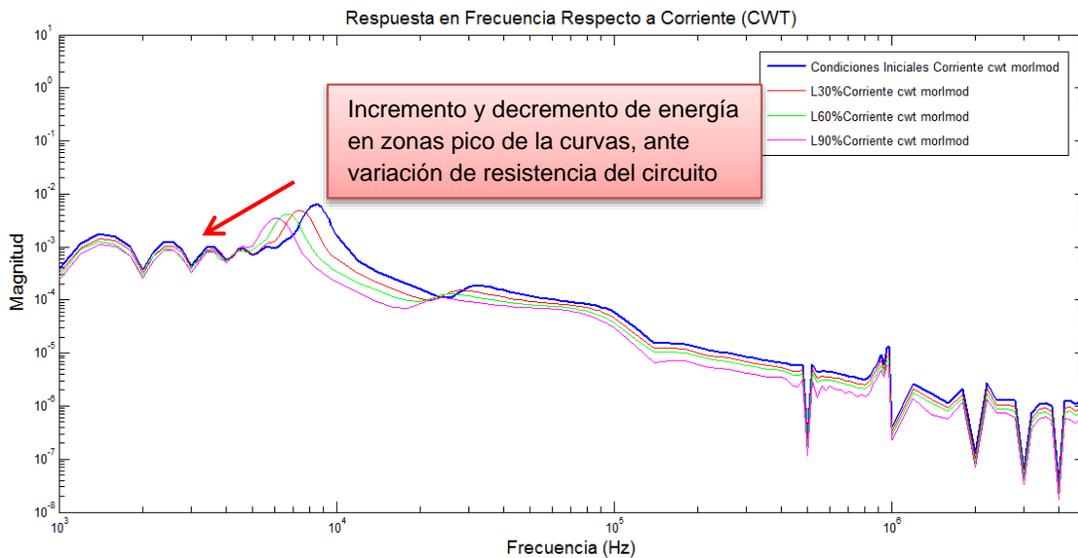


Figura 37. Respuesta en Frecuencia usando CWT respecto a la corriente, variando la Inductancia del circuito.

La Figura 38 da a conocer la respuesta en frecuencia respecto a la corriente del circuito RLC ante variaciones de resistencia. Las curvas presentan cambios leves donde hay picos, en donde a mayor resistencia se da elevación en magnitud.

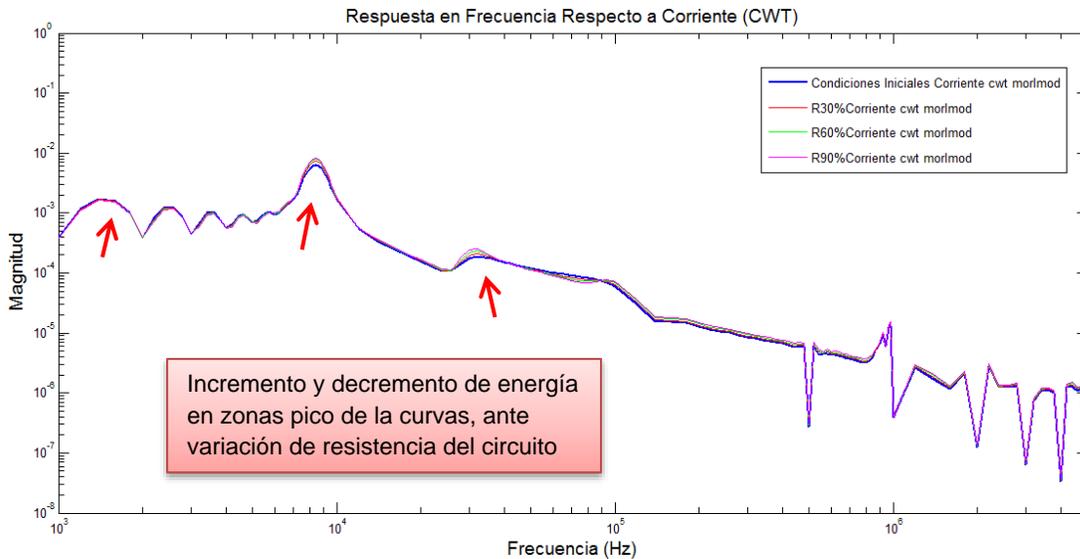


Figura 38. Resposta em Frequência usando CWT respeito a la corrente, variando la resistencia del circuito.

La Tabla 3 da a conocer el resultado del error relativo medio presentado ante la variación de sus parámetros, usando los métodos CWT y SRA respecto a los perfiles de corriente que presenta el circuito RLC.

Tabla 3. Análisis MER de las Curvas mediante SRA y CWT

Análisis MER Curvas ATPDraw circuito RLC respecto a perfil de Corriente						
Método	CWT			SRA		
Parámetro	C=0-30%	C=0-60%	C=0-90%	C=0-30%	C=0-60%	C=0-90%
Capacitancia	24.4115%	47.0590%	63.60%	66.4262%	195.5601%	309,4183%
Método	CWT			SRA		
Parámetro	L=0-30%	L=0-60%	L=0-90%	L=0-30%	L=0-60%	L=0-90%
Inductancia	26.7187%	41.7700%	50,1709%	39.9565%	73.0343%	79.3733
Método	CWT			SRA		
Parámetro	R=0-30%	R=0-60%	R=0-90%	R=0-30%	R=0-60%	R=0-90%
Resistencia	4.0259%	6.8890%	9.9358%	27.0823%	57.9456 %	89.7637%

Las curvas obtenidas en la Tabla 3 empleando el método CWT, cada caso presenta un menor error en comparación a los arrojados por SRA sabiendo que se dispone del mismo circuito para la obtención de las curvas, dado este fenómeno se puede establecer que SRA brinda mayor sensibilidad ante cambios en los parámetros del circuito RLC, especialmente al variar la capacitancia del circuito.

## CAPÍTULO IV

### 4 CURVAS FRA Y SRA ONLINE EN TRANSFORMADORES REALES

En este capítulo se desarrollará el análisis de pruebas reales, que se ejecutaron en el laboratorio de alta tensión (GRALTA) a transformadores piloto y en campo a un transformador de distribución que alimenta el laboratorio de máquinas eléctricas de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica (EIEE) de la Universidad del Valle.

Para la selección de las pruebas piloto, se tomó como referencia las seleccionadas en (Luna-Gómez, 2013), las cuales presentan resultados adecuados para establecer un estudio comparativo usando los métodos IFRA y SRA.

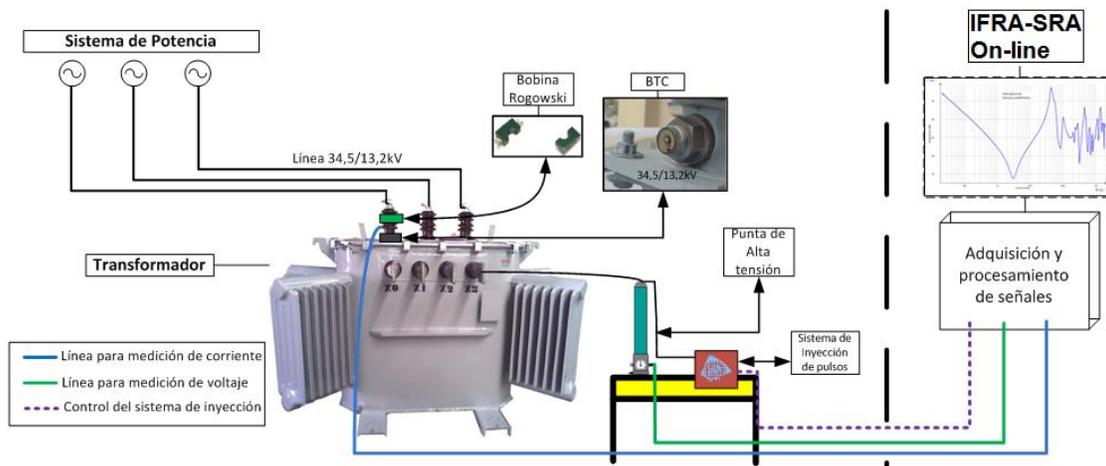
Las pruebas realizadas al transformador de distribución se realizaron en conjunto con el autor del trabajo de pregrado (Olarte-Olivares, 2014), del cual se tomó las pruebas más representativas en donde se pueda transmitir mejores resultados en el estudio realizado.

En este capítulo ,se usa nuevamente la GUI en matlab para la obtención y análisis de las curvas SRA y FRA en transformadores piloto y distribución.

En la sección 4.3 del capítulo se presenta los resultados obtenidos de las curvas de los diferentes tipos de transformadores analizados.

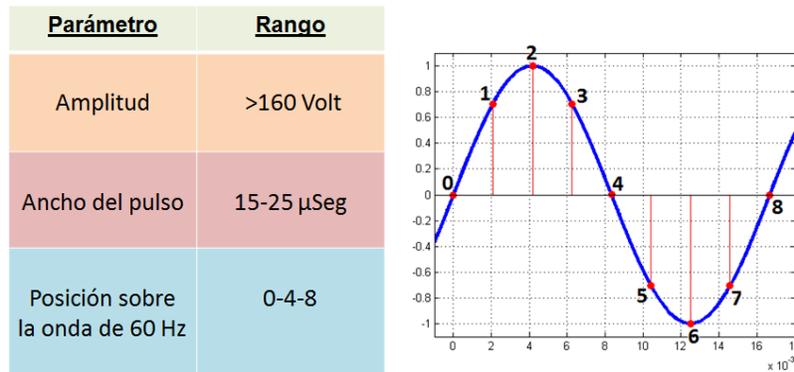
El montaje para llevar a cabo las pruebas experimentales se presenta en la Figura 39.

Figura 39. Montaje para llevar a cabo las pruebas experimentales



En la Figura 40 se dan a conocer las características de los pulsos de voltaje inyectados mediante el equipo de inyección, para llevar a cabo las pruebas experimentales en los transformadores piloto y distribución.

Figura 40. Detalles de los pulsos de inyectados (Patente GRALTA).



Los equipos usados para llevar a cabo las pruebas experimentales como se presento en el esquema de la Figura 39 son:

- **Punta de alta Tensión Ross Engineering VMP60EA-6.2Y-H-ABA-DAU-F**

La punta de alta tensión Ross Engineering Corp. no se ha usado a nivel de campo como elemento sensor de tensión en la prueba IFRA on-line, la cual es muy importante ya que nos permite llegar a niveles de 60kV, tiene las características eléctricas y mecánicas adecuadas para un montaje en campo y amplio ancho de banda permite que sea ideal para la aplicación.

- **Equipo de inyección de pulsos (Patente grupo de investigación GRALTA)**
- **Bobina Rogowski tipo clamp**

Es de fácil manejo y montaje ya que sus ventanas permiten que abrace el conductor al cual se quiere sensar su corriente, su amplio ancho de banda y su adecuado montaje en campo permiten que sea ideal para el uso en campo

- **Tarjeta de adquisición de datos**

Los registradores PCI 6115 y PCI 5105 son aptos para la prueba dado que los sensores de medida poseen cables coaxiales con entradas y salidas BNC que van al registrador, sin embargo se debe evitar señales de alta tensión dado que los

valores de tensión máximo permitidos a la entrada de los registradores están entre +/- 60 Vpp.

#### 4.1 Comparación de los métodos SRA y FRA en Transformadores Piloto

Las pruebas seleccionadas se realizaron a diferentes tipos de transformadores piloto, teniendo en cuenta que cada fabricante presenta determinadas particularidades en su construcción y se pretende corroborar si el patrón de comportamiento es semejante.

Se presenta mediante tablas las características de la configuración usada en cada prueba y el tipo de transformador piloto.

En cada prueba se busca realizar un análisis comparativo entre las curvas obtenidas empleando los métodos IFRA y SRA determinando patrones de comportamiento en las curvas; finalizado el análisis de las pruebas de la sección 4.1, se muestra una tabla con el ERM (error relativo medio) de cada una de las curvas obtenidas.

Para realizar el análisis de las pruebas en transformadores piloto, se tomaron las mismas pruebas 55,176,169,177,178,189,191(2) y 210 que se utilizaron en (Luna-Gómez, 2013).

- **Prueba 55.**

La Tabla 4 muestra los parametros con los cuales se realizó la prueba 55 (enumerada según la información recibida), en este caso se compara los métodos en régimen off-line.

Tabla 4. Parámetros Prueba 55

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
55	ELECTRIC POWER	1 $\phi$	OFF-LINE	ABIERTO	ABIERTO	X1X4_AA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
NO APLICA	---	---	---	---	---	---
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	70V	20us	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
52;1	100	PCI-6115	10 MHz			

En la Figura 41 se emplea el método IFRA off-line mediante DFT a la prueba 55, Se observa que a medianas y altas frecuencias se presenta una mayor distorsión en las curvas.

Cada prueba realizada se compone de tres pulsos de voltaje en las mismas condiciones sin variar el setup de medida, con el fin de determinar la repetitividad de la respuesta en frecuencia.

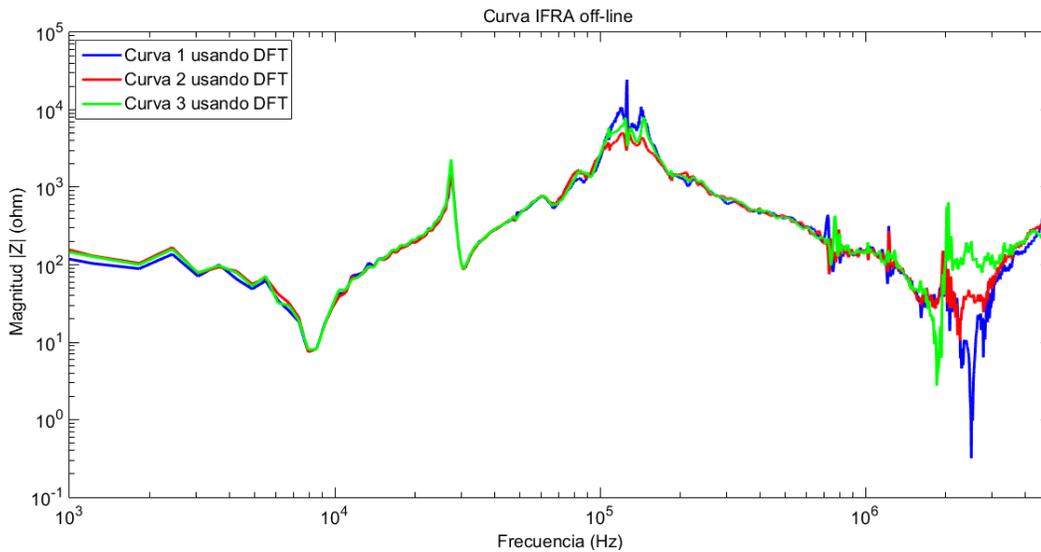


Figura 41. Prueba 55 usando el método DFT

En la Figura 42 se presenta el método IFRA off-line aplicando el método CWT, en altas frecuencias mayores a 1 MHz las curvas pierden repetitividad, aunque respecto al método usando DFT se presenta un cambio notorio en tanto a la suavidad en las curvas.

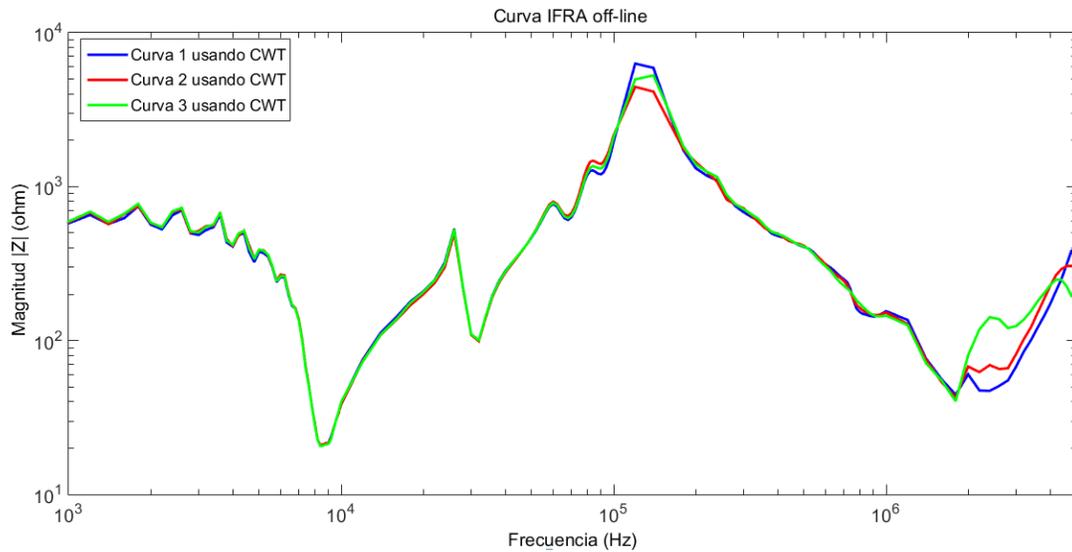


Figura 42. Prueba 55 usando el método CWT

La Figura 43 muestra el método SRA off-line aplicando transformada Wavelet en el dominio de la escala a la prueba 55. Se observa que a bajas escalas menores a 10, el comportamiento de las curvas presenta mayor dispersión, sin embargo la curva es suave, es decir posee pocas resonancias producto del procesamiento de señal, en relación con los casos anteriores.

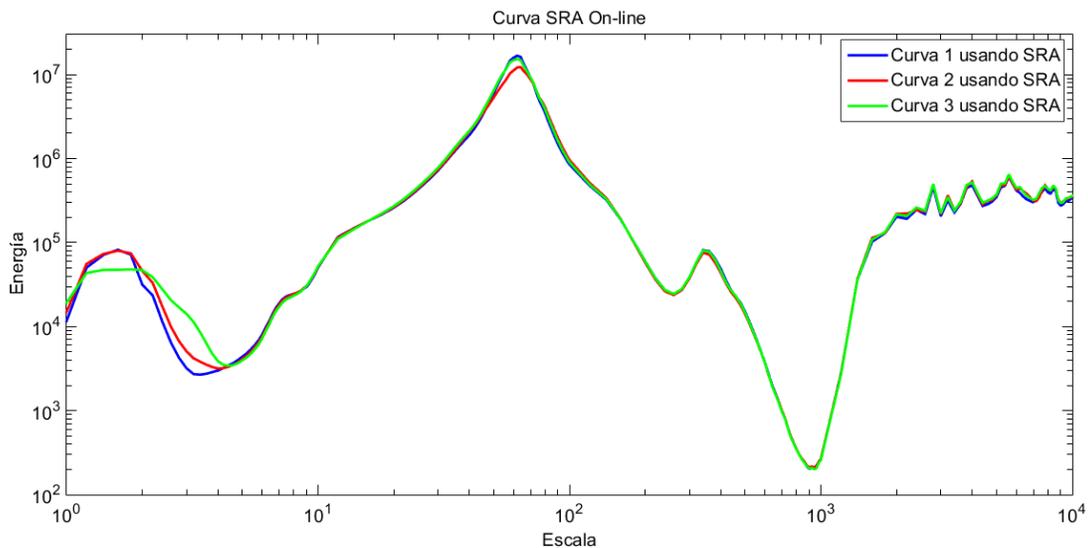


Figura 43. Prueba 55 usando el método SRA

- **Prueba 169 (P169)**

En la Tabla 5, se presentan los parámetros tenidos en cuenta en la ejecución de la prueba 169. Las pruebas 169 hasta la 210 se realizaron en regimen online (transformador energizado).

El propósito es explorar la nueva herramienta para el procesamiento de señales transitorias aplicando transformada wavelet en el dominio de la escala (SRA), con el fin de que las curvas obtenidas en regimen on-line, presenten buena repetitividad, suavidad y buena atenuación para realizar un buen analisis .

Tabla 5. Parámetros Prueba 169

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
169	EXPLORER	R	ON-LINE	ENERGIZADO	ABIERTO	X1Xn_AC
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
NO APLICA	---	---	---	1110	---	317
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20us	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-6115	10 MHz	BAJA SIN CARGA		

Figura 44 se emplea el método IFRA on-line aplicando DFT, se observa poca repetitividad y alta cantidad de ruido en las curvas, al igual que la prueba en régimen off-line aplicando el mismo método.

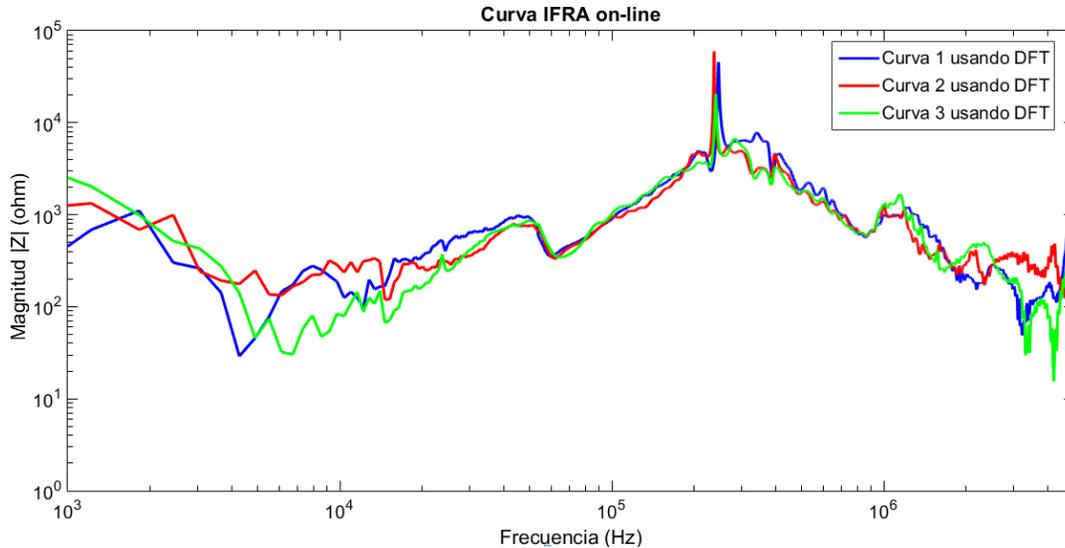


Figura 44. Prueba 169 usando el método DFT

En la Figura 45 se emplea el método IFRA on-line aplicando CWT a la prueba 169, se observa que aplicando wavelet la repetitividad entre curvas mejora, pero se presenta poca suavidad en todo el rango de frecuencia analizado.

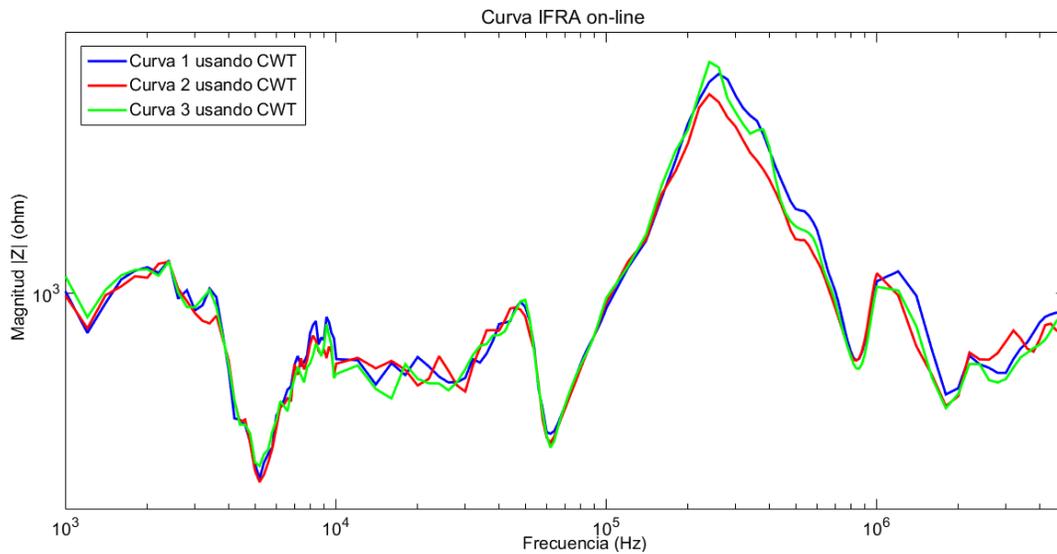


Figura 45. Prueba 169 usando el método CWT

En la Figura 46 se emplea el método SRA en la prueba 169. Aplicando éste método la suavidad en las curvas mejora notoriamente en gran parte del rango de escala analizado, en comparación a las curvas usando los métodos en frecuencia.

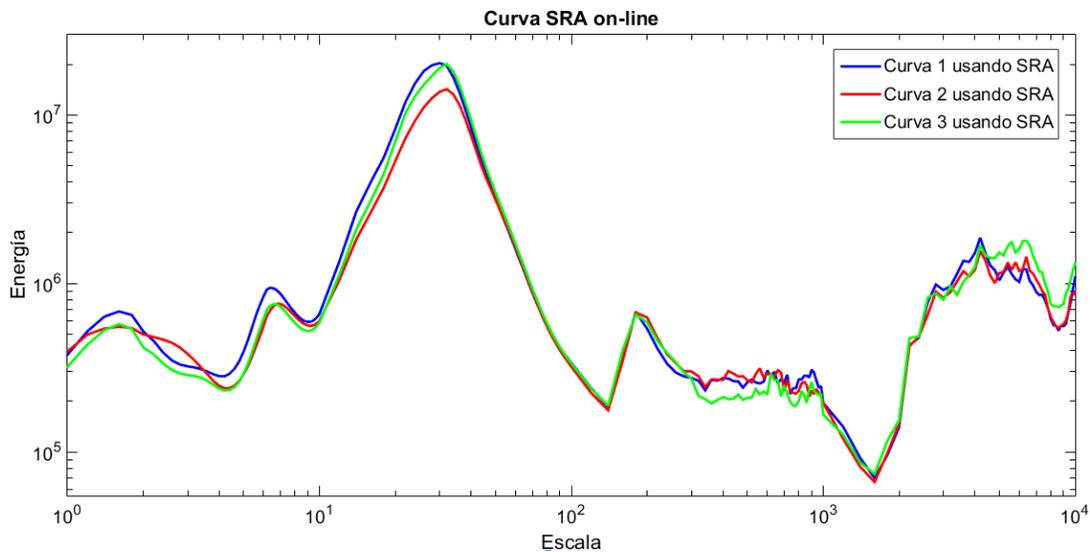


Figura 46. Prueba 169 usando el método SRA

- **Prueba 177**

En la Tabla 6 se presentan los parámetros con los cuales se realizó la prueba 177.

Tabla 6. Parámetros Prueba 177

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
177	Rymel	1 $\phi$	ON-LINE	ENERGIZADO	ABIERTO	B_AA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
NO APLICA	---	---	---	2416	---	60
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20 $\mu$ s	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-6115	10 MHz			

En la Figura 47 se emplea el método DFT a la prueba 177, se evidencia que en altas frecuencias se siguen presentando distorsiones (ruido) en las curvas, como igualmente ocurrió en la Figura 41 y Figura 44.

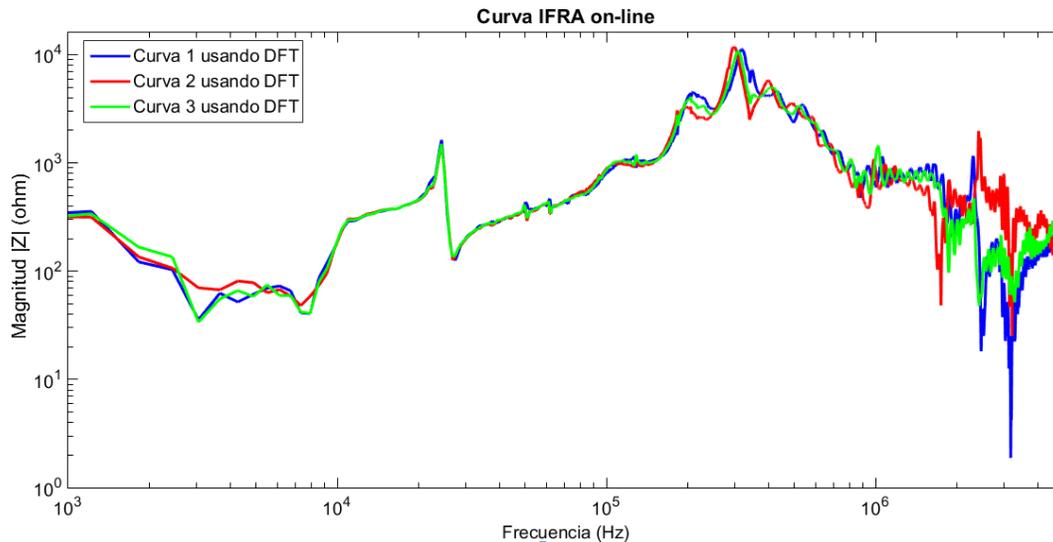


Figura 47. Prueba 177 usando DFT

En la Figura 48 y Figura 49 se emplean los métodos CWT y SRA a la prueba 177 respectivamente, los métodos presentan buena repetitividad, aunque se resalta la suavidad obtenida usando wavelet dada su respuesta en escala, ya que presenta una curva tenue y menos picos de resonancia.

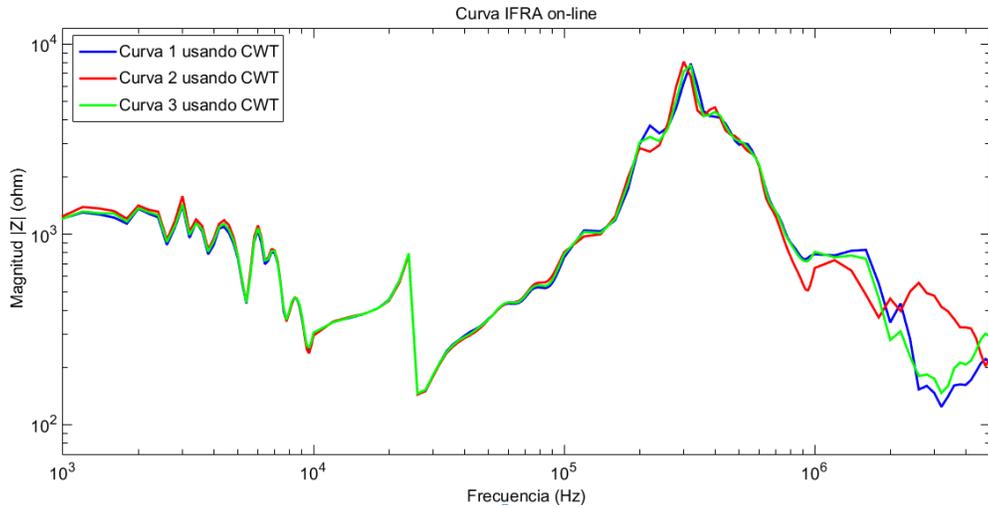


Figura 48. Prueba 177 usando CWT

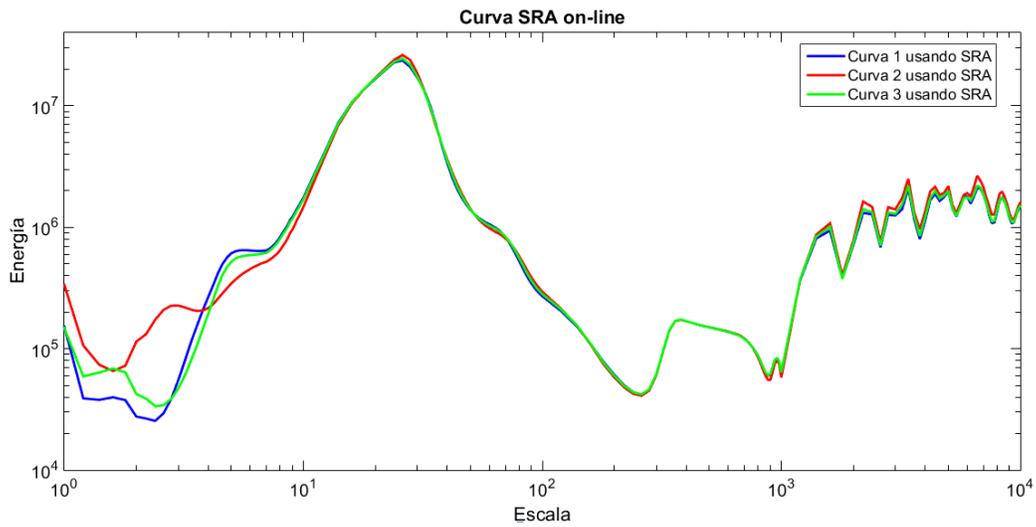


Figura 49. Prueba 177 usando SRA

- **Prueba 178**

En la Tabla 7 se muestran los parametros con los cuales se realizó la prueba 178

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
178	Rymel	1 $\phi$	ON-LINE	ENERGIZADO	CON CARGA	B_AA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
RESISTIVA	0,1	46 $\Omega$	---	2425	1,25	60,5
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20us	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-6115	10 MHz			

Tabla 7. Parámetros Prueba 178

A pesar del cambio en las configuraciones en cada prueba y tipo de transformador los resultados en las curvas que tienden al mismo patrón de comportamiento según el metodo empleado en las anteriores pruebas (Figura 41 - Figura 52) .

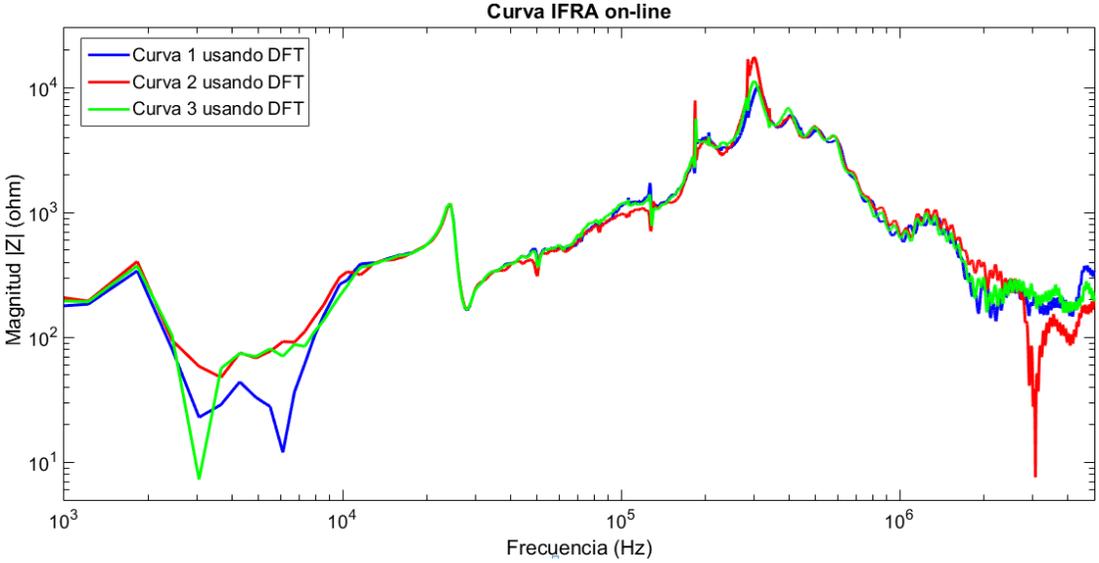


Figura 50. Prueba 178 usando DFT

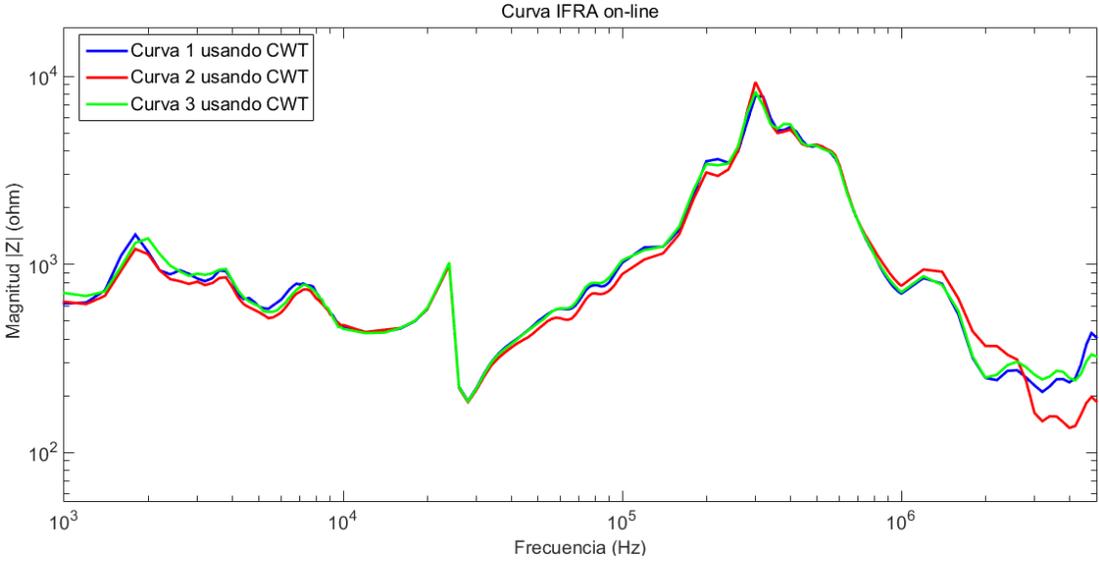


Figura 51. Prueba 178 usando CWT

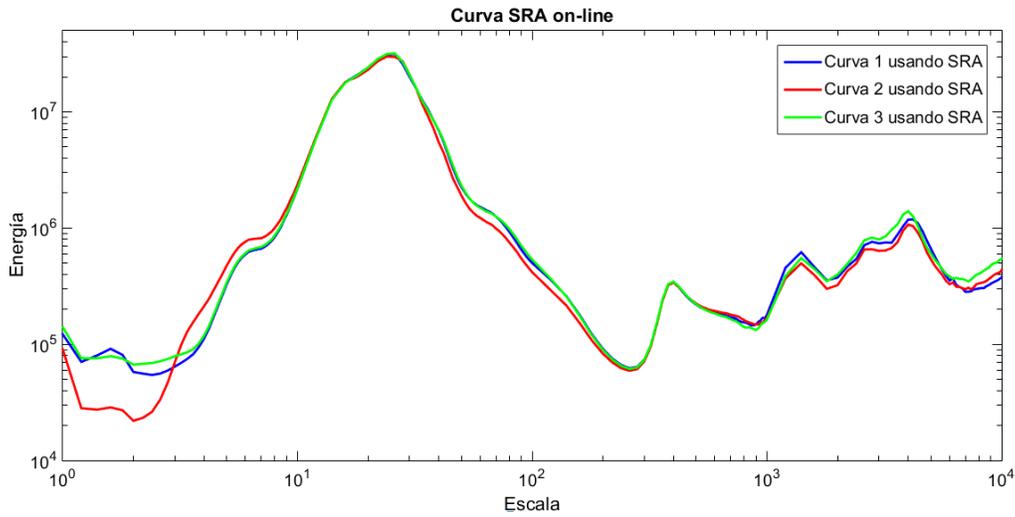


Figura 52. Prueba 178 usando SRA

- **Prueba 189**

En la Tabla 8, se dan a conocer los parámetros con los cuales se realizó la prueba 189.

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
189	400VA	1φ	ON-LINE	ENERGIZADO	ABIERTO	B_AA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
NO APLICA	0	---	0,07	123,7	---	44,44
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20us	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-5105	10 MHz			

Tabla 8. Parámetros prueba 189

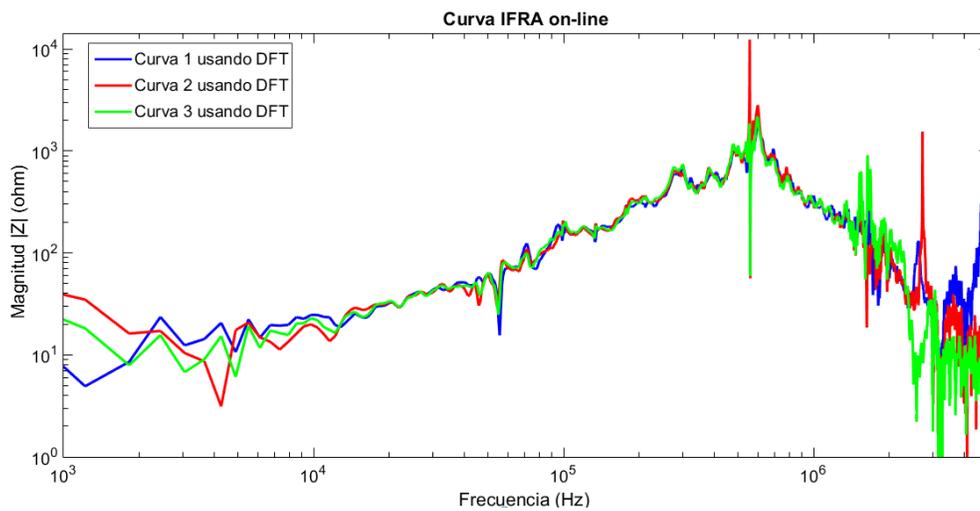


Figura 53. Prueba 189 usando DFT

La Figura 53, Figura 54 y Figura 55 muestran los métodos DFT, CWT y SRA correspondientemente empleados en la prueba 189.

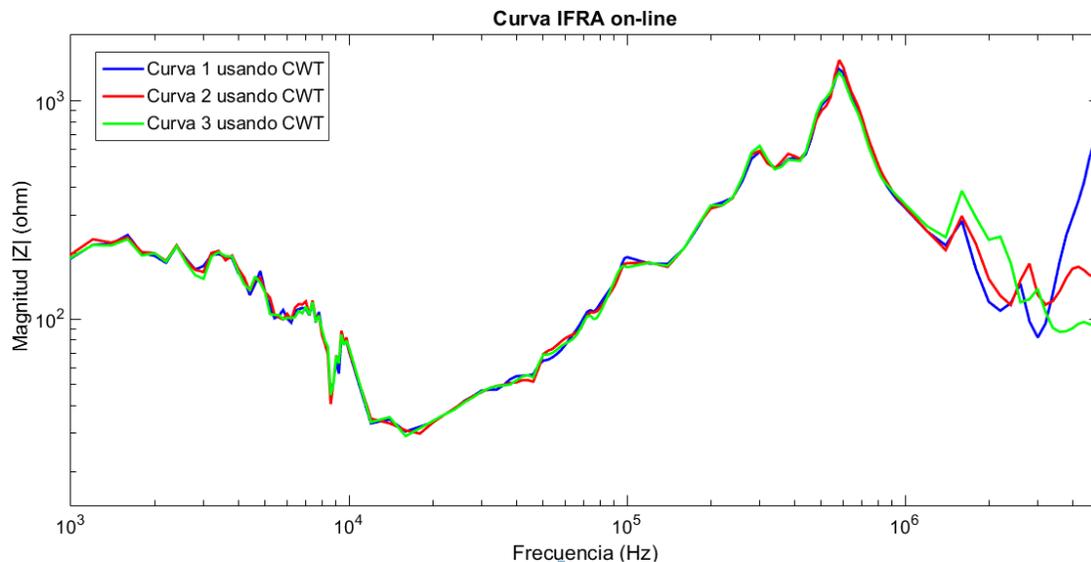


Figura 54. Prueba 189 usando CWT

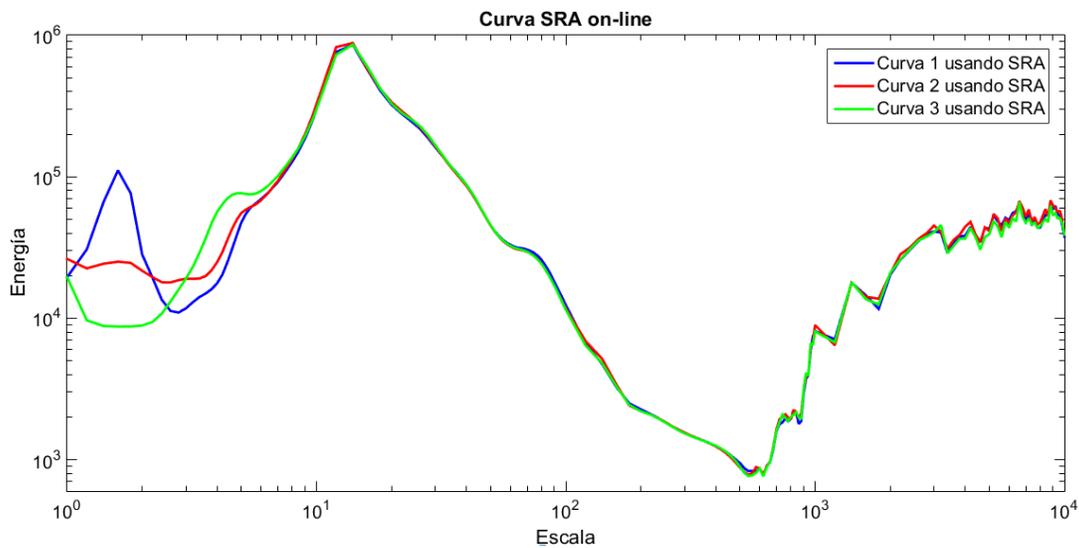


Figura 55. Prueba 189 usando SRA

- **Prueba 191(2)**

En la Tabla 9, se dan a conocer los parámetros con los cuales se realizó la prueba 191(2) , en este caso se compara los métodos en régimen on-line.

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
191(2)	400VA	1 $\phi$	ON-LINE	ENERGIZADO	CON CARGA	B_AA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
RESISTIVA	0,22	23.2 $\Omega$	0,73	120,8	1,91	44,32
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20 $\mu$ s	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-5105	10 MHz			

Tabla 9. Parámetros prueba 191(2)

En la Figura 56, Figura 57 y Figura 58 se emplean los métodos DFT, CWT y SRA respectivamente aplicados en la prueba 191(2).

En esta prueba las curvas resultantes usando cada método se vieron afectados notoriamente, tanto la repetitividad y suavidad, ya que se presenta mayor distorsión entre cada curva arrojada; en los métodos en frecuencia se presenta a altas frecuencias y en escala, a bajas escalas.

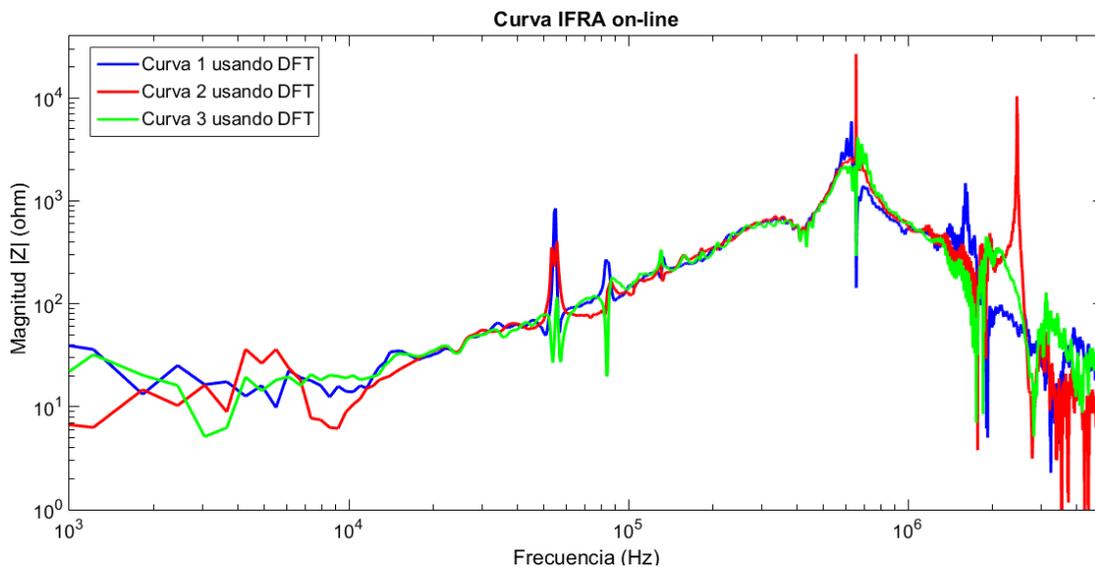


Figura 56. Prueba 191(2) usando DFT

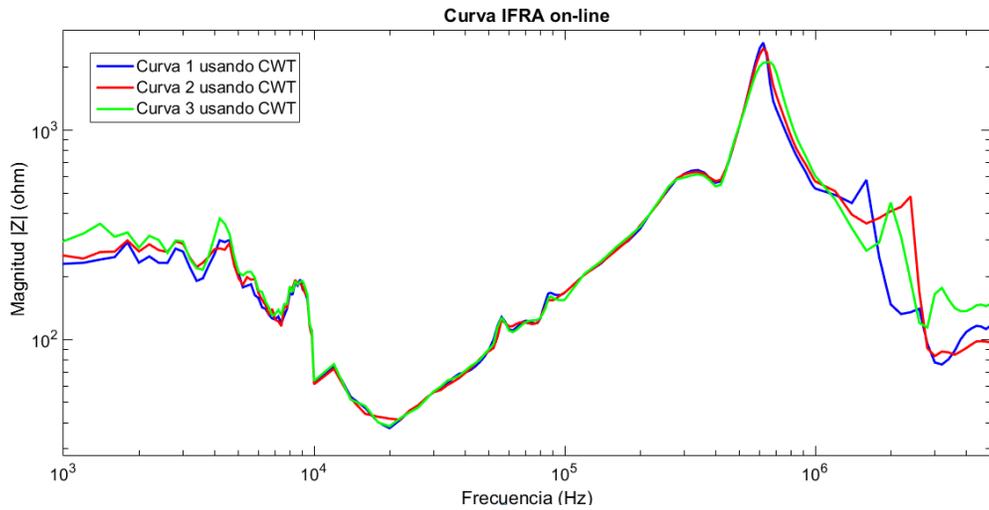


Figura 57. Prueba 191(2) usando CWT

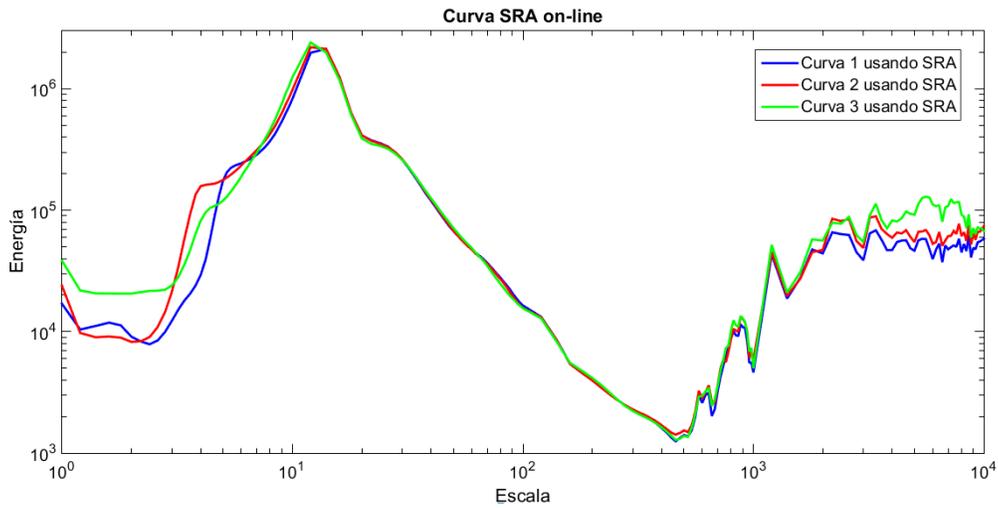


Figura 58. Prueba 191 (2) usando SRA

- **Prueba 210**

En la Tabla 10, se dan a conocer los parámetros de la prueba 210.

PRUEBA	TRANSFORMADOR	FASE	REGIMEN	ALTA	BAJA	COMPARABLE
210	400VA	1φ	OFF-LINE	ABIERTO	ABIERTO	A_BA
CARGA	K	CARGA	I_ALTA	V_ALTA	I_BAJA	V_BAJA
NO APLICA						
INYECCIÓN	TIPO	AMPLITUD	DURACIÓN	POSICIÓN	MEDICIÓN	VARIABLES
BAJA	MICRO	300V	20us	NO APLICA	BAJA	V,I
GANANCIAS	TIEMPO	REGISTRADOR	FREC.MUESTREO	OBSERVACIÓN		
1000;1	100	PCI-6115	10 MHz			

Tabla 10. Parámetros prueba 210

En la Figura 59, Figura 60 y Figura 61 se muestran los métodos DFT, CWT y SRA respectivamente empleados en la prueba 210. Las curvas arrojadas en cada método, presentan la misma tendencia en comportamiento de las pruebas piloto anteriormente analizadas en esta sección.

En la sección 4.3 se presenta el análisis de resultados para las pruebas piloto.

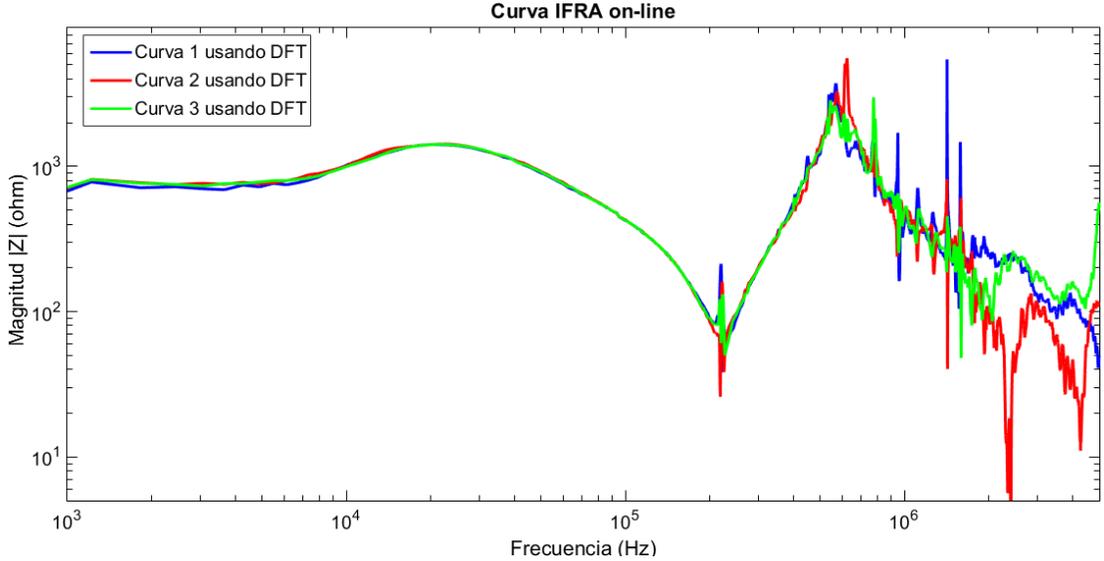


Figura 59. Prueba 210 usando DFT

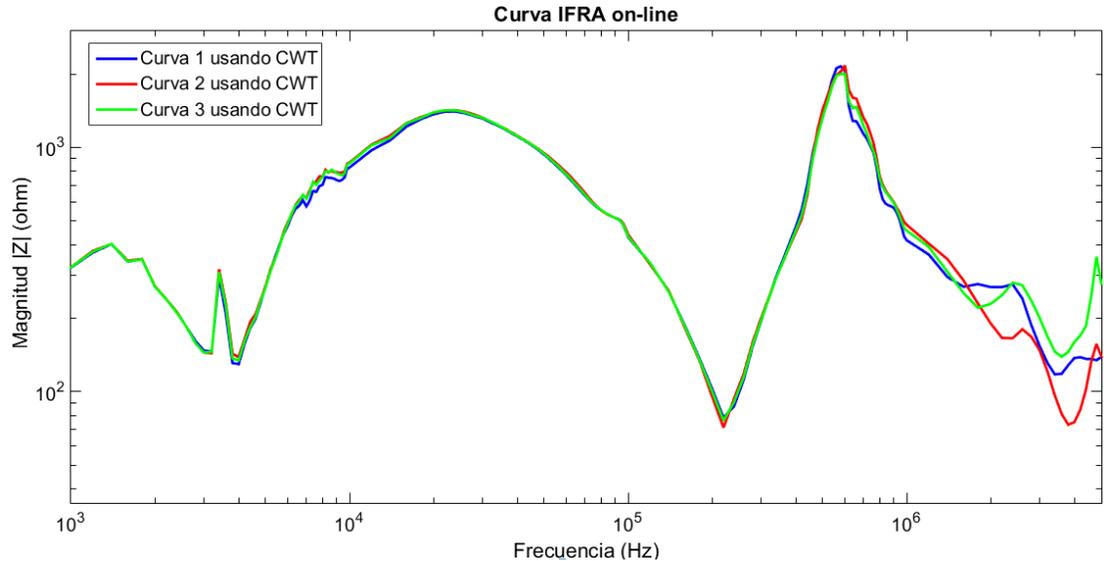


Figura 60. Prueba 210 usando CWT

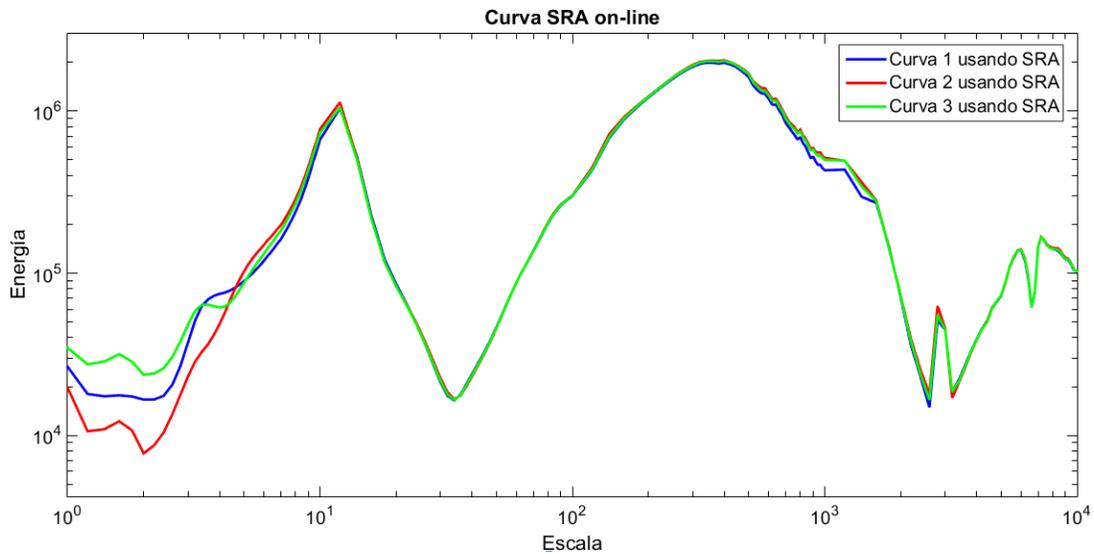


Figura 61. Prueba 210 usando SRA

#### 4.2 Comparación de los métodos SRA y FRA empleados en un transformador de distribución

En esta sección se realizará la comparación de los métodos SRA y FRA, tomando las pruebas realizadas a un transformador de distribución de 150 kVA, éste alimenta el laboratorio de máquinas de la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica de la Universidad del Valle.

La ejecución de las pruebas, el correspondiente análisis de señales transitorias y el procesamiento de señal para obtener la respuesta en frecuencia con el transformador en servicio usando transformada wavelet se deben al aporte de los trabajos (Luna-Gómez, 2013) (Olarte-Olivares, 2014).

Se constató y corroboró en 4.1, que aplicando transformada de Fourier para el tratamiento de señales transitorias, no es el más adecuado, dado que la naturaleza matemática de ésta, se enfoca en señales estacionarias, y por ende en la sección 4.2 solo se realiza el análisis de las curvas aplicando transformada wavelet en dominio de la frecuencia y la escala.

- **Prueba 215.**

La Figura 62 corresponde a la prueba 215 empleando CWT, la cual presenta los resultados de la obtención de las curvas del transformador de distribución.

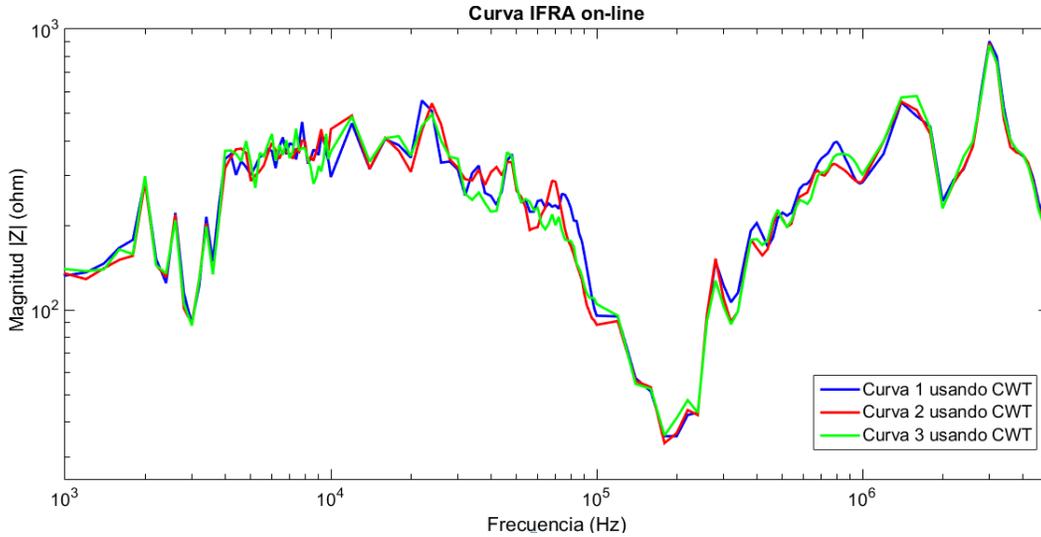


Figura 62. Prueba 215 usando CWT

La Figura 63 corresponde a la prueba 215 empleando SRA, muestra los resultados de las curvas del transformador de distribución.

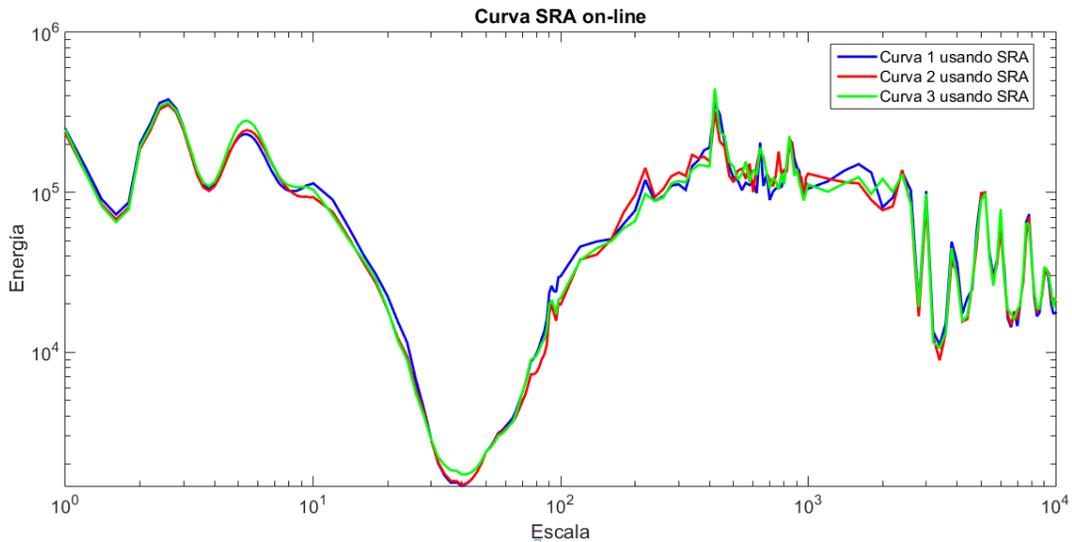


Figura 63. Prueba 215 usando SRA

- **Prueba 226.**

En la Figura 64 y Figura 65 se muestran los métodos CWT y SRA on-line respectivamente, aplicados en la prueba 226.

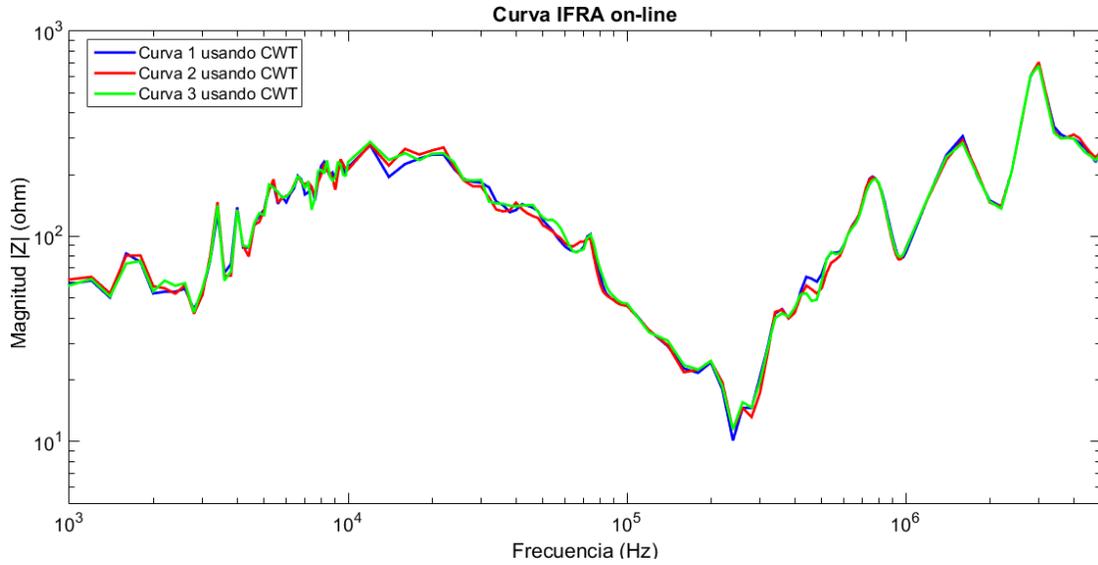


Figura 64. Prueba 226 usando CWT

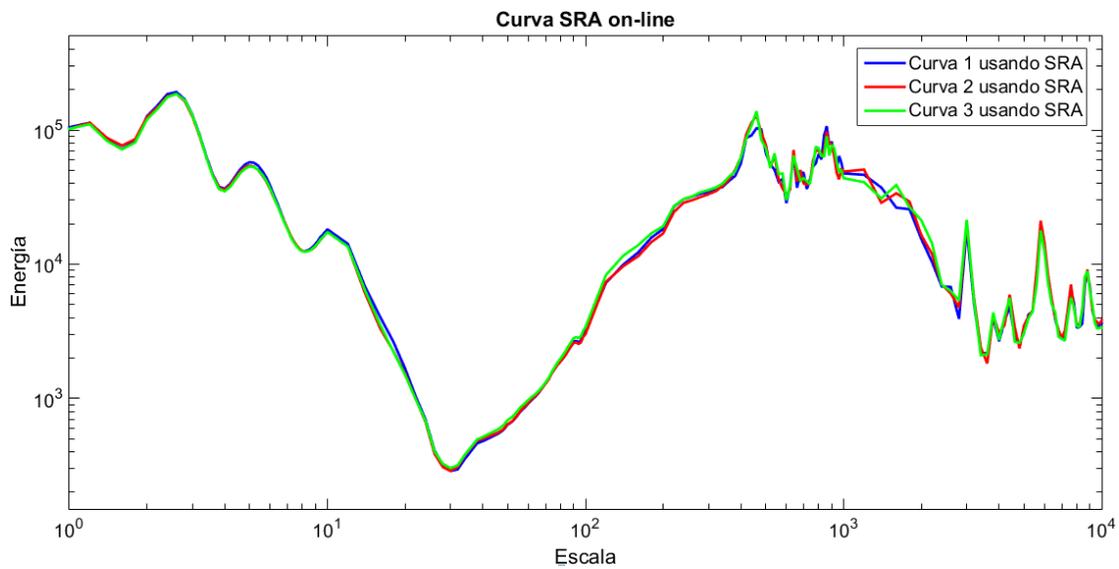


Figura 65. Prueba 226 usando SRA

- **Prueba 239.**

En la Figura 66 y Figura 67 se muestran los metodos CWT y SRA empleados en la prueba 239 .

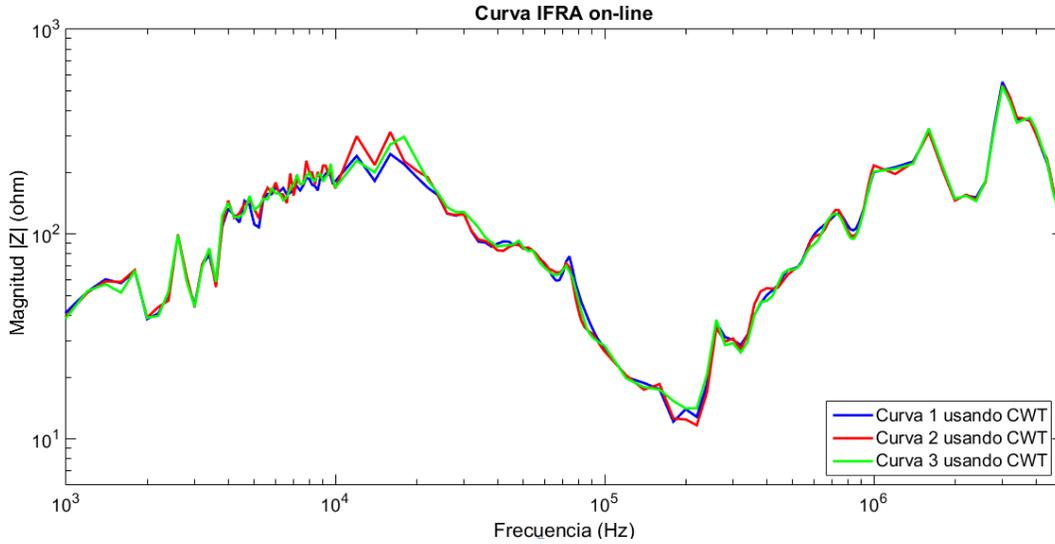


Figura 66. Prueba 239 usando CWT

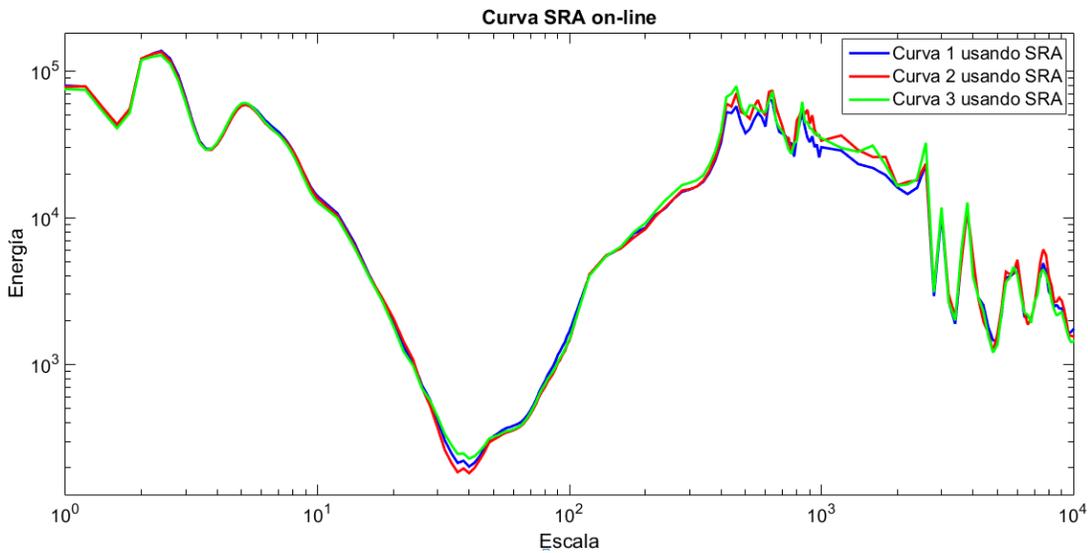


Figura 67. Prueba 239 usando SRA

- **Prueba 245.**

En las Figura 68 y Figura 69 se emplean los métodos IFRA y SRA respectivamente, los dos métodos usados presentan buena repetitividad en todo su rango de analisis.

Usando el método SRA las curvas presenta mayor suavidad en el rango de escala de 1 a 500, como sucedio igualmente en las anteriores pruebas (Figura 63, Figura 65 y Figura 67).

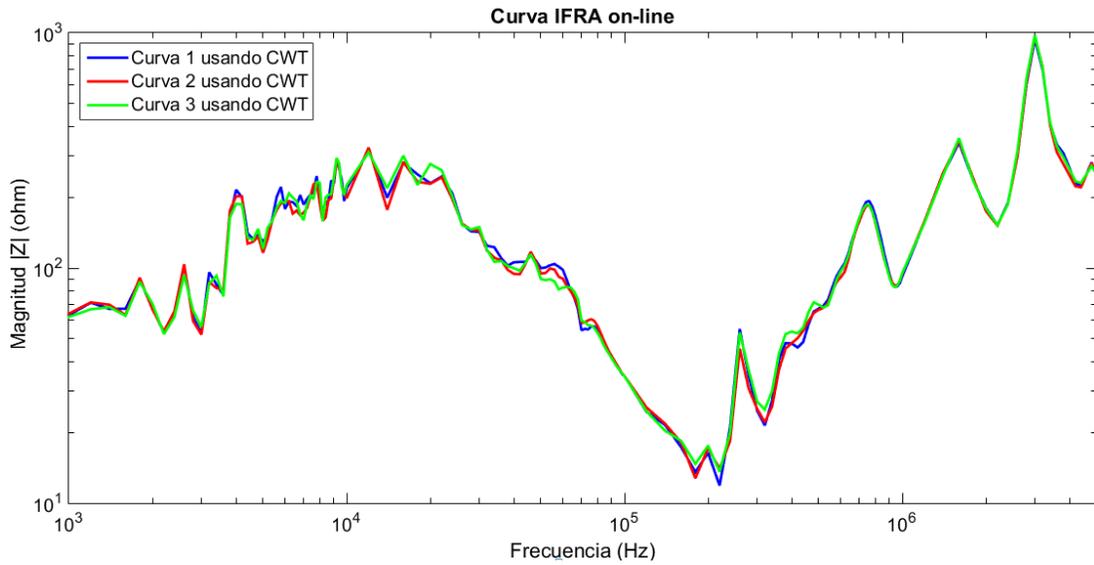


Figura 68. Prueba 245 usando CWT

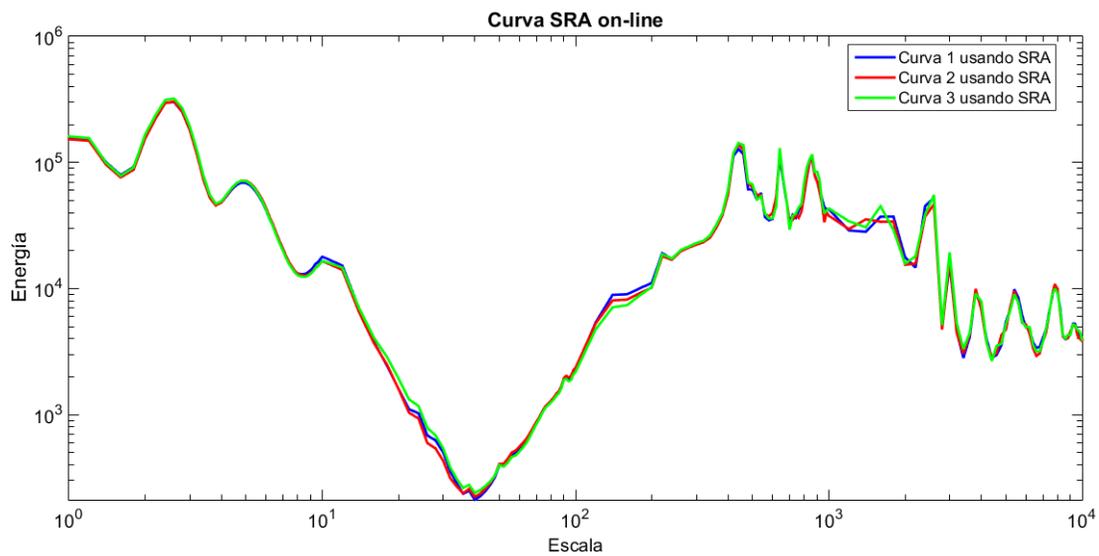


Figura 69. Prueba 245 usando SRA

- **Prueba 263.**

La Figura 70 y Figura 71 muestran los métodos CWT y SRA en la prueba 263. En esta prueba analizada usando SRA, al igual que las anteriores pruebas sigue presentando mejor suavidad respecto a CWT, sin embargo en todos los casos los dos metodos presentan buena repetitividad.

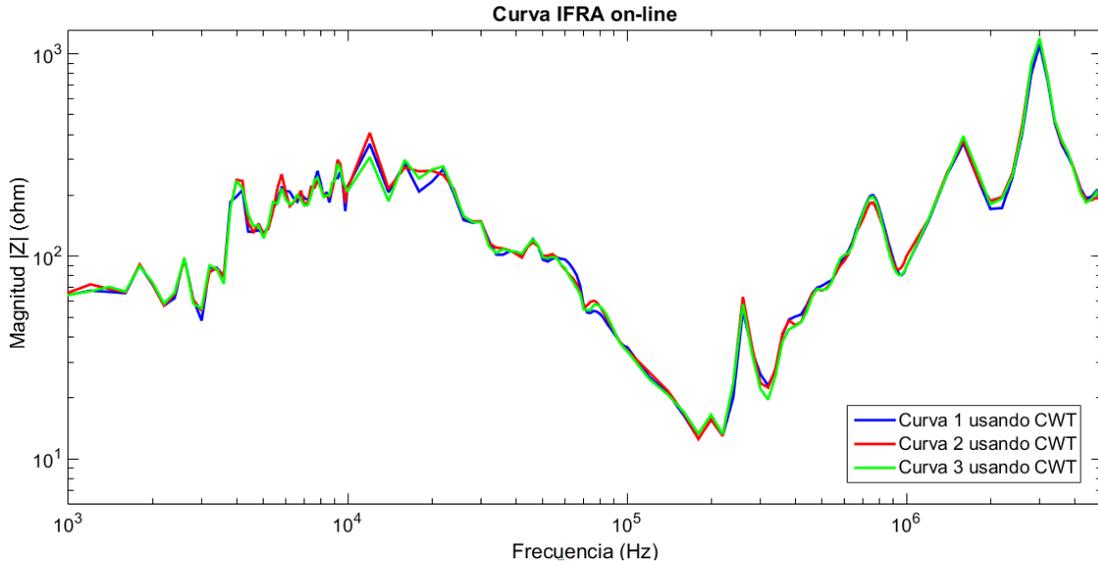


Figura 70. Prueba 263 usando CWT

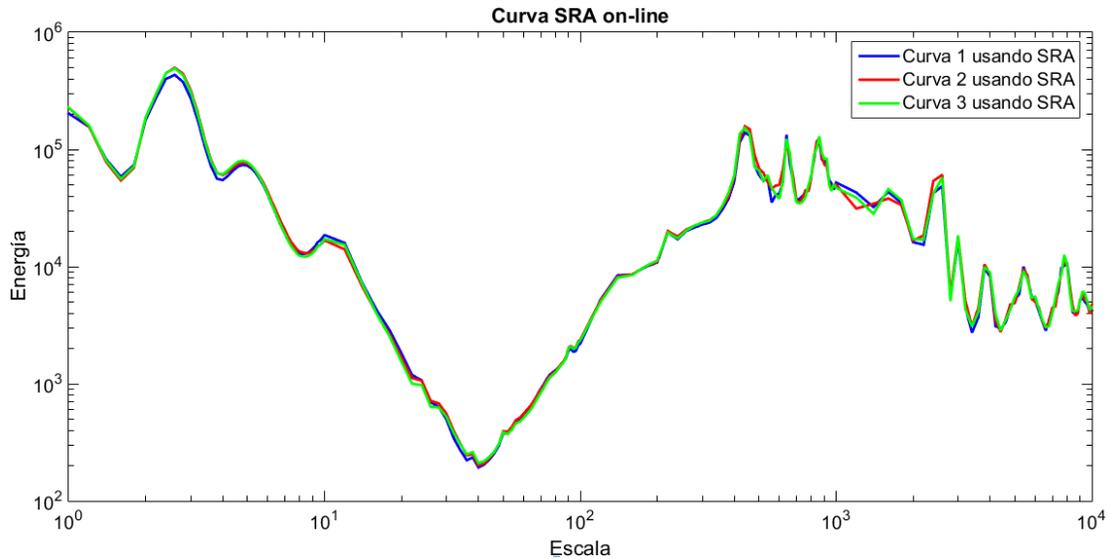


Figura 71. Prueba 263 usando SRA

- **Prueba 267.**

La Figura 72 y Figura 73 dan a conocer los metodos CWT y SRA usados respectivamente en la prueba 267.

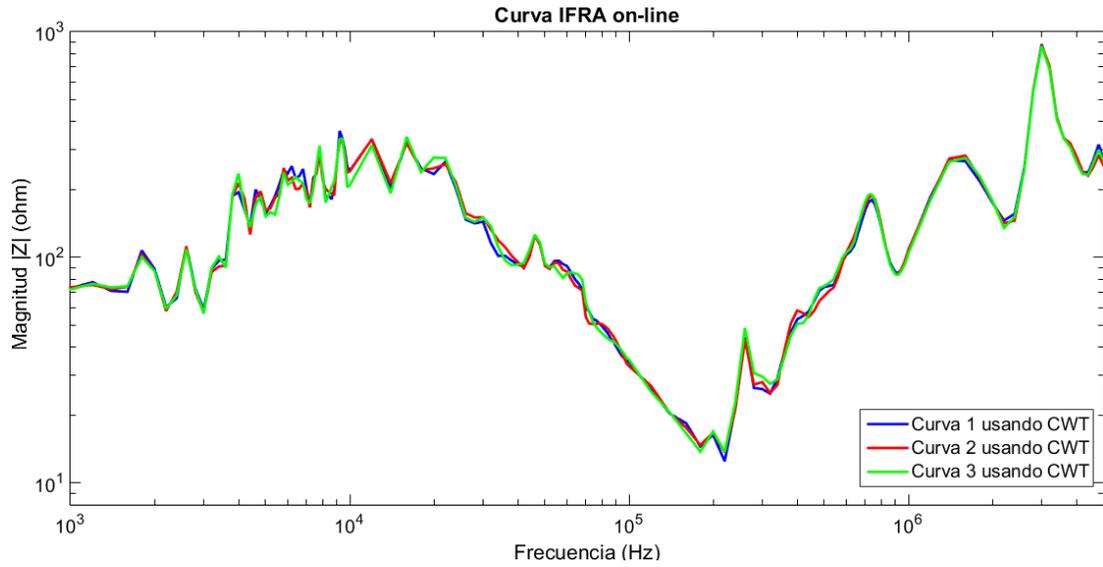


Figura 72. Prueba 267 usando CWT

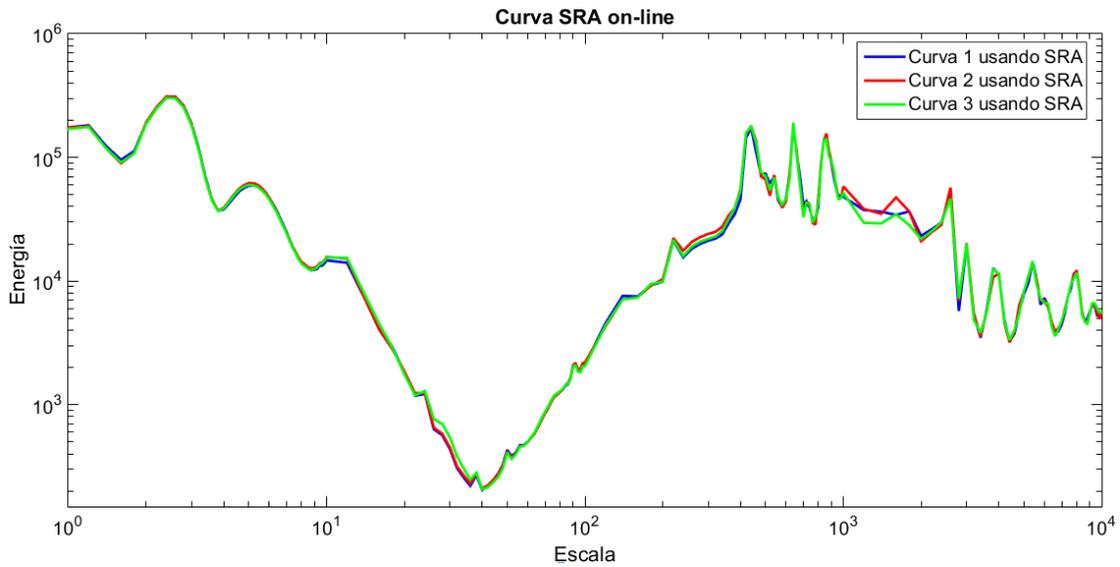


Figura 73. Prueba 267 usando SRA

- **Prueba 292.**

La Figura 74 y Figura 75 muestran los metodos CWT y SRA usados en la prueba 292. Los resultados obtenidos en esta prueba presentan la misma tendencia que se dio en las pruebas anteriores pruebas que se analizo en esta sección.

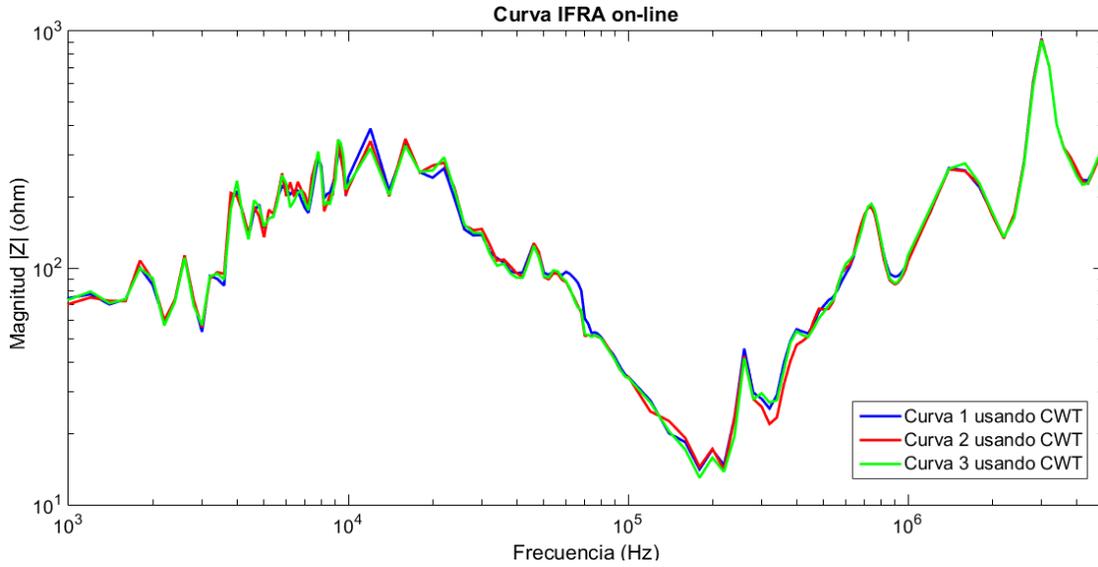


Figura 74. Prueba 292 usando CWT

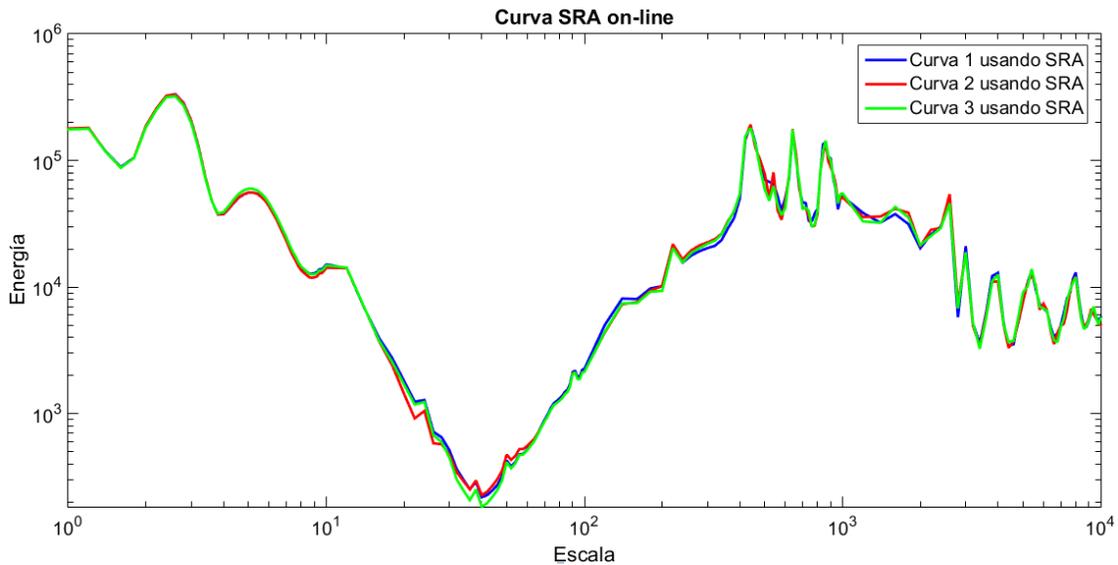


Figura 75. Prueba 292 usando SRA

### 4.3 Análisis de resultados

Así como en el método FRA existe un rango de análisis, para el caso SRA y de acuerdo con los resultados obtenidos podemos estipular un rango de trabajo en la escala, desde 1 hasta 10000 unidades de escala para las pruebas transformadores piloto y distribución.

ERROR RELATIVO MEDIO CURVAS TRANSFORMADOR PILOTO						
Prueba	MÉTODO					
	IFRA USANDO DFT		IFRA USANDO CWT		SRA ON-LINE	
	Curva 1= Referencia					
	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
<b>P55</b>	59.1492%	118.2512%	6.1445%	10.404%	9.2904%	19.515%
<b>P169</b>	138.0636%	122.5443%	8.8932%	7.1764%	11.7403%	13.2858%
<b>P177</b>	187.4937%	61.3396%	17.7262%	4.8845%	34.7599%	7.1771%
<b>P178</b>	52.2096%	52.1061%	10.4379%	4.1839%	19.258%	4.6383%
<b>P189</b>	186.9654%	185.0241%	7.8083%	10.0961%	9.7006%	18.9823%
<b>P191(2)</b>	189.4928%	148.0045%	10.5435%	15.6353 %	24.2861%	26.4249%
<b>P210</b>	59.3863%	119.1226%	6.8204%	6.7471%	12.1292%	9.0326%

Tabla 11. MER de la obtención de curvas de un Transformador piloto

Adicional se analizan las señales transitorias de voltaje y corriente para determinar la potencialidad del método FRA usando wavelet en frecuencia y escala, dado que se ha demostrado que Fourier no es la herramienta más idóneas para el análisis de señales transitorias (Luna-Gómez, 2013)

La Tabla 11 presenta los resultados obtenidos del error relativo medio de las curvas en transformadores piloto. En cada caso la curva inicial (curva 1) se tomo como referencia para encontrar el porcentaje de error (MER) de la curva 2 y 3 en cada prueba.

Al obtener las curvas empleando las técnicas DFT (Transformada de Fourier Discreta), CWT (Transformada Wavelet Continua) y SRA (Análisis de respuesta en Escala) se confirmó que aplicando los métodos usando transformada wavelet se obtiene mayor repetitividad, curvas más suaves y buena respuesta en la atenuación del ruido, ya que wavelet se especializa en trabajar con señales no-estacionarias.

Los curvas empleando el método CWT presentaron menor error relativo medio seguido de SRA, este porcentaje en error se asocia a la repetitividad de las

curvas; a pesar que SRA no presento los mejores resultados en este aspecto, se resalta la suavidad que obtuvo en las curvas (Figura 43, Figura 46 y Figura 49).

En la Tabla 12 se presenta el error relativo medio (MER) de las curvas obtenidas en cada prueba usando los métodos CWT y SRA en el transformador de distribución.

ERROR RELATIVO MEDIO CURVAS TRANSFORMADOR DISTRIBUCIÓN				
Prueba	Método			
	CWT		SRA	
	Curva 1 =Referencia			
	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
P215	9.25%	9.57%	11.82%	11.03%
P226	4.53%	4.65%	6.39%	7.67%
P239	5.69%	5.69%	9.18%	9.23%
P245	4.58%	5.47%	5.06%	6.31%
P263	5.60%	5.53%	7.41%	7.04%
P267	4.50%	5.03%	4.84%	5.03%
P292	5.33%	4.69%	6.65%	5.72%

Tabla 12. MER de la obtención de curvas en un Transformador de distribución

Los resultados de las curvas en los transformadores de distribución arrojaron mejores resultados en los porcentajes de error relativo medio, y por ende buena repetitividad en sus curvas.

A pesar de que el MER obtenido en pruebas en el transformador de distribución disminuyó considerablemente respecto a los piloto usando SRA, los resultados usando CWT nuevamente arrojaron menores errores en las curvas. Sin embargo usando el método SRA se tiene la facilidad de escoger cualquier madre wavelet para realizar el diagnostico, siempre y cuando se siga usando la misma wavelet.

En el anexo A se muestran los perfiles de voltaje y corriente en el dominio de la escala en transformadores piloto.

Adicional se obtuvo los perfiles de voltaje y corriente en el dominio de la escala y frecuencia del transformador de distribución, se presentan en el anexo B.

En la Tabla 13 se presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos empleando cada método.

Condición	CWT (Frec.)	SRA (Escala)	DFT (Frec.)	Curvas		
				CWT	SRA	DFT
<b>Suavidad</b>	media	alta	baja	Figura 42 Figura 45 Figura 48 Figura 51 Figura 57 Figura 64	Figura 43 Figura 46 Figura 49 Figura 52 Figura 58 Figura 65 Figura 69	Figura 41 Figura 44 Figura 47 Figura 50 Figura 56
<b>Repetitividad</b>	Alta 10 kHz hasta 1 MHz	Alta 10 Hasta 10000	media	Figura 42 Figura 45 Figura 48 Figura 51 Figura 57	Figura 43 Figura 46 Figura 49 Figura 52 Figura 58	Figura 41 Figura 44 Figura 47 Figura 50 Figura 56
<b>Atenuación al ruido</b>	alta	alta	baja	Figura 42 Figura 45 Figura 48 Figura 51 Figura 57 Figura 64	Figura 43 Figura 46 Figura 49 Figura 52 Figura 58 Figura 65 Figura 69	Figura 41 Figura 44 Figura 47 Figura 50 Figura 56
<b>Sensibilidad</b>	media	alta	baja	Figura 17 Figura 21 Figura 25	Figura 18 Figura 22 Figura 26 Figura 28	Figura 16 Figura 20 Figura 24

Tabla 13. Resultado análisis comparativo entre los métodos CWT, DFT y SRA

Como se presentó en la Tabla 13, el método SRA se destaca en todos los aspectos puestos en comparación, esto brinda seguridad para continuar con estudios futuros en el tema, visto como una propuesta alterna, ya que hasta el momento es un campo poco explorado.

De los aspectos en comparación se resalta la sensibilidad y suavidad que presenta SRA respecto a los otros métodos (Tabla 2).

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1. Conclusiones del trabajo de grado desarrollado

- ❖ El trabajo de grado presenta un avance con el método **SRA (*Análisis de la respuesta en la escala*)** en transformadores, dejando las bases teóricas para futuros estudios, garantizando repetitividad, suavidad y atenuación al ruido, en las curvas obtenidas, a partir de simulaciones y pruebas experimentales.
- ❖ El método **SRA** se destaca respecto a los métodos comparados (CWT y DFT), dado que presenta mayor sensibilidad en las curvas bajo análisis ante variaciones en los parámetros de un circuito RLC simulado, el cual se asemeja a una falla o avería de un transformador, lo cual se convierte en una herramienta muy potente para el diagnóstico en transformadores.
- ❖ Se cuenta con una GUI en Matlab, la cual permite realizar el procesamiento de señales temporales para obtener los diferentes perfiles en la escala del voltaje, corriente o impedancia.
- ❖ Dado que la repetitividad del método SRA propuesto es buena, se puede tener como alternativa de método para diagnóstico en transformadores de potencia.
- ❖ Se recomienda usar la misma wavelet a la hora de realizar un análisis mediante el dominio de la escala, dado que a la hora de pensar en diagnóstico se debe tener en cuenta, la repetitividad del método y esto se obtiene cuando se tome la misma wavelet madre.

## 5.2. Trabajos Futuros

Del trabajo realizado surgen varias opciones como trabajos futuros:

- Realizar un estudio de análisis en pruebas ejecutadas en Transformadores de Potencia, verificando repetitividad y suavidad en las curvas obtenidas bajo el método SRA.
- Actualizar la GUI en Matlab, desarrollada en el presente trabajo de grado, donde se brinde diferentes opciones en el tratamiento de las señales para un análisis en escala vs energía, mostrando gráficos de coeficientes de energía y Escala vs Tiempo.
- Realización de pruebas en transformadores piloto variando sus parámetros constructivos, con el fin de verificar su comportamiento ante cada variación, usando el método SRA, esperando obtener resultados similares a los presentados en el Capítulo III.
- Estudio de la viabilidad del método SRA, para implementarse como una opción alterna de herramienta de diagnóstico on-line en transformadores.
- Análisis de los coeficientes obtenidos en la escala, procesados con una red neuronal o un sistema inteligente, para lograr realizar diagnóstico off-line/on-line en transformadores.

## BIBLIOGRAFÍA

- A. Setayeshmehr, A. A. (June,2006). "On-line Monitoring and Diagnoses of Power Transformer Bushings". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 13, No. 3.
- Aragón, H. (2009). "Análisis de señales con las transformadas de Fourier, Gabor y Onditas". Colombia: Primera edición, ITM.
- C. González, J. P. (2007). "On-line measurements of the Frequency Response of the Transformer by means of the Bushing Tap Coupler". *Advanced Research Workshop on Transformers*, pp. 1-6.
- Coffeen, L. (2003). "On-line Frequency Response Analysis System". California, USA: Technical Progress, Research Program No. 1001770.
- Coffeen, L. (Apr.15, 2003). *Estados Unidos Patente nº 6549017 B2*.
- E. Gómez-Luna, G. A. (Julio 2013). "Application of Wavelet Transform to obtain the Frequency Response of a Transformer from Transient Signals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 3, pp. 1709-1714.
- E. Gómez-Luna, G. A.-G. (April 2013.). "Current Status and Future Trends in the Frequency Response Analysis (FRA) with the Transformer in Service". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28 No.2, pp. 1024-1031.
- E. Zheng, Z. L. (2010). "Study on Harmonic Detection Method Based on FFT and Wavelet Transform". *2nd International Conference on Signal IEEE* , Pp. 1-4.
- GRALTA, G. d. (Agosto 2012). "Desarrollo de una prueba piloto para obtener la respuesta en frecuencia de un transformador en servicio". Cali, Colombia: Reporte Técnico No. 2653, Escuela de Ingeniería Eléctrica y.
- GRALTA.Eduardo. (2013). *Madrid, España. Patente nº N° P201331592,Ref: UC3M 5183*.
- Hassan Abniki, H. A. (2010, p.p 1-5, 26-28 Sept. 2010). "Effective On-line Parameters for Transformer Monitoring and Protection". North American Power Symposium (NAPS).
- J. C. Gonzales, E. M. (Latin America 2010). "Diagnosis of power transformers through frequency response analysis applying multiresolution analysis and pattern classification". *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*.

- KRWong, V. P. (Mayo 1999.). "Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms". *IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib*, Vol. 146. No. 3.
- L. Coffeen, J. M. (2009). "An on-line frequency response analysis (FRA) update,". *TechCon*, pp. 129-151.
- Luna-Gómez, E. (2013). "Obtención de la Respuesta en Frecuencia de Tranformadores en servicio a partir de la medida de Senales Transitorias" . Valle, Cali, Colombia,.
- M. Karimi, H. a. (October 2000). "Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications". *IEEE Transactionson Powerdelivery*, Vol. 15, No. 4.
- M. Melo, M. A. (2008). "Experience with on-line monitoring of capacitance and tangent delta of condensive bushings". *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-6.
- M. Wang, a. J. (Nov. 2002). "Review of condition assessment of power transformers in service". *IEEE Electrical Insulation*, vol. 18, no. 6, pp. 12-25.
- M. Wang, A. J. (Vancouver, Canada, August 1999). "Condition monitoring of transformers in service by the low voltage impulse method". *IEE High Voltage Engineering Symposium*.
- Mallat, S. (2009). *a wavelet tour of signal processing*. Elsevier,Ed. 3.
- Olarte-Olivares, J. (2014). "Validación y verificación de IFRA on-line en Transformadores de potencia mediante el método de Señales Controladas". Cali,Colombia.
- Pagina web visitada ABB. (2014). Obtenido de <http://www.abb.co.uk/industries/us/9AAC30300695.aspx>.
- R. Malewski, J. D. (October 1988). "Measurement of Switching Transients in 735 kV Substations and Assessment of their Severity for Transformer Insulation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 3, No.4.
- Spiess, S. R. (Switzerland, Febrero 2006.). "El canto de las líneas eléctricas". *Revista ABB*.
- T. Leibfried, K. F. (1994). "On-line Monitoring of Transformers by Means of the Transfer Function Method". *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, June 5-8.

- V. K. Rai, A. R. (2007). "Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert–Huang transform". *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, 2607–2615.
- Vandermaar, A. (2001). "On-line Frequency Response Analysis System". Palo Alto, Canada: No. 1001942, EPRI.
- Z. Leonowicz, T. L. (2003). "Spectrum Estimation of Non-Stationary Signals in Power Systems". USA: IPST in New Orleans.
- Zhu., S. C. (January 2007). "Wavelet transform for processing power quality disturbances". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2007 pp. 176-176.

## ANEXO A

### Análisis comparativo de las curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje y corriente en Transformadores Piloto

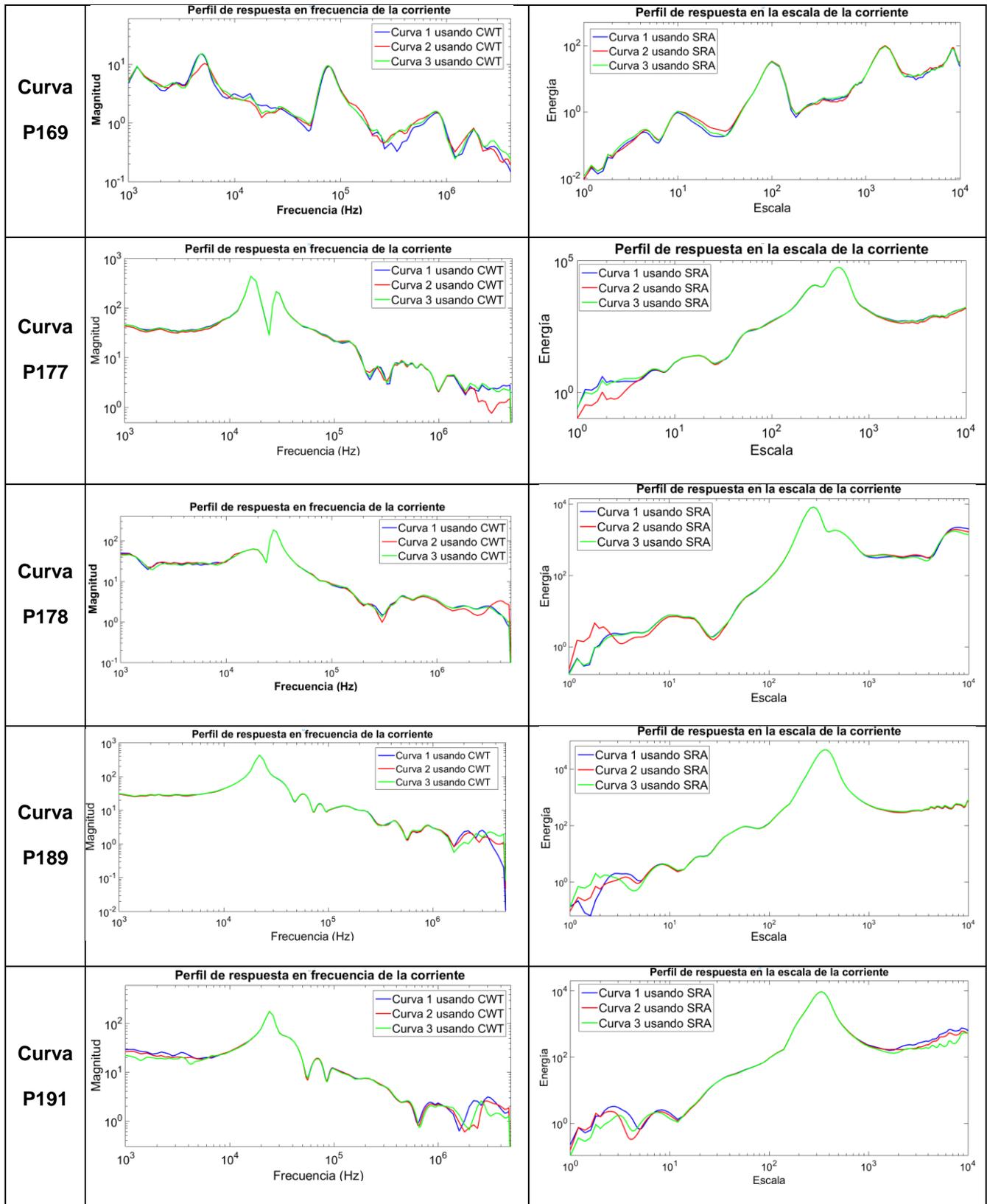
Semejante al capítulo 3, se realiza un análisis comparativo de las curvas obtenidas mediante los perfiles de voltaje y corriente arrojados de las pruebas realizadas en transformadores piloto.

Se aplican los métodos mediante DFT, IFRA y SRA buscando establecer patrones de comportamiento.

#### I. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de corriente en Transformadores Piloto

Para éste análisis se disponen de las pruebas piloto tomadas en la sección 4.1 donde se presenta el comportamiento de la respuesta en frecuencia y escala de la corriente en cada prueba.

	Wavelet (CWT) Perfil de Corriente	Wavelet (SRA) Perfil de Corriente
<b>Curva P55</b>	<p style="text-align: center;">Perfil de respuesta en frecuencia de la corriente</p>	<p style="text-align: center;">Perfil de respuesta en la escala de la corriente</p>
Descripción		



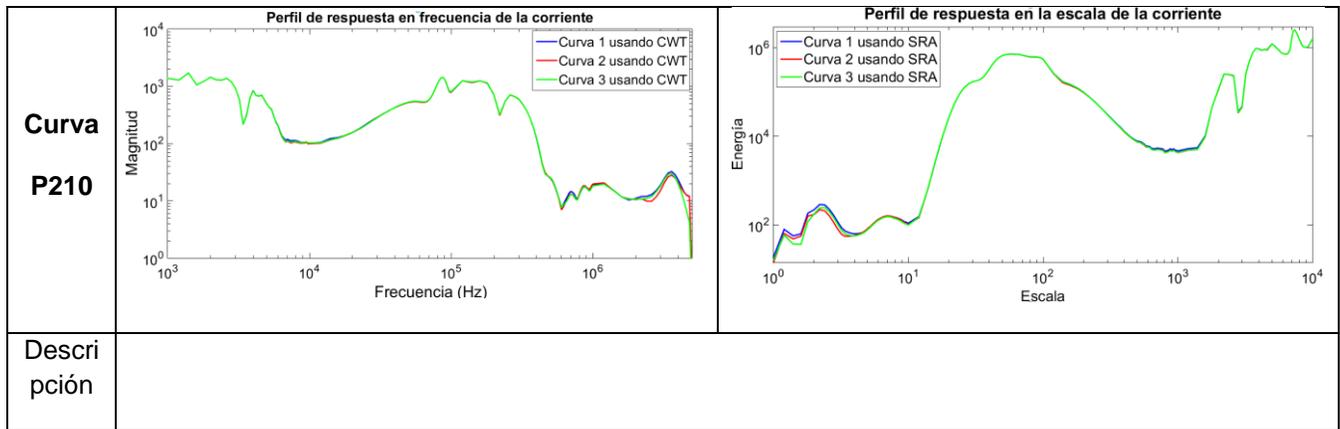
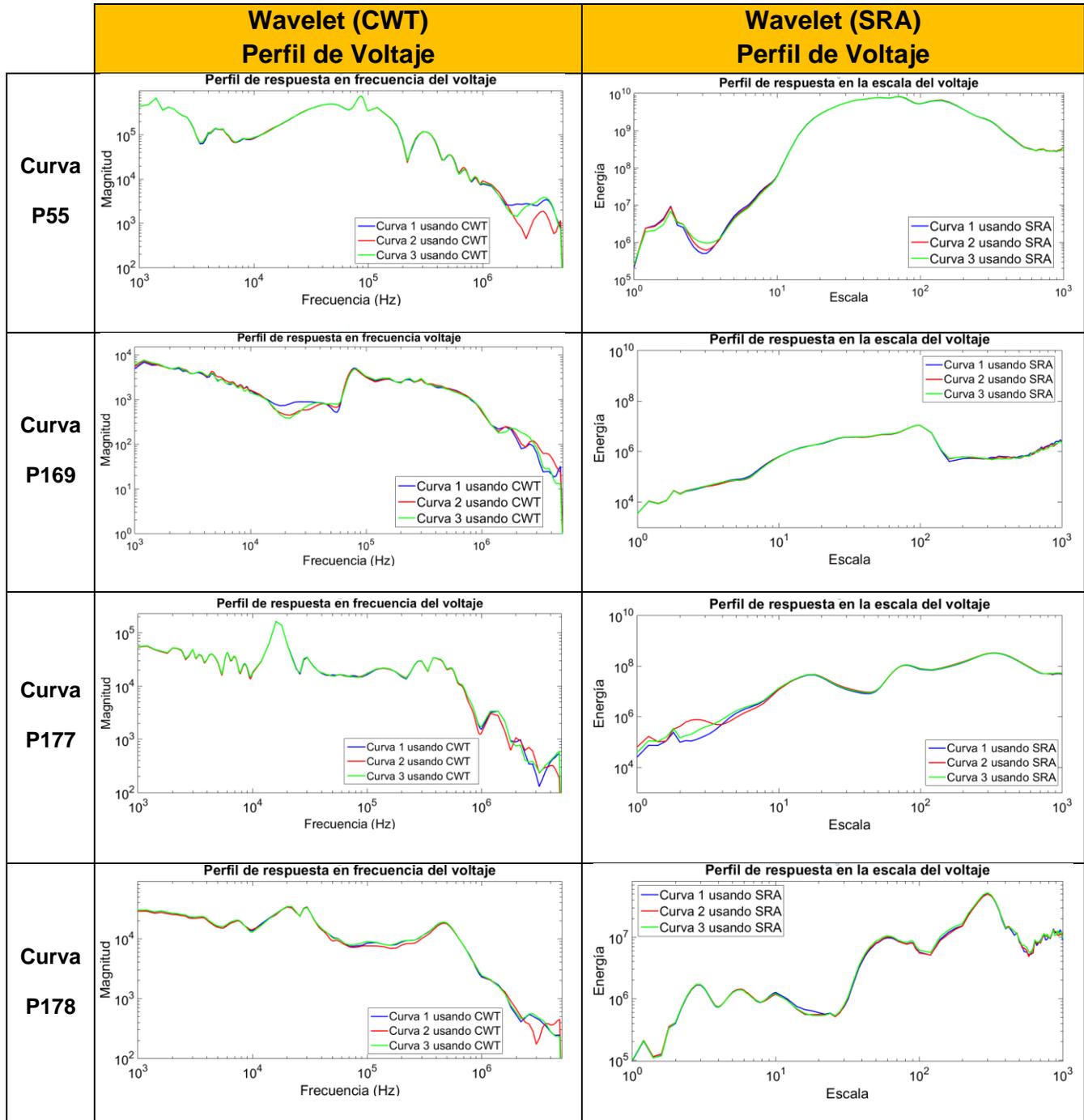


Tabla 14. Resultados MER de los perfiles de corriente

Análisis MER Curvas Transformadores Piloto respecto a perfil de Corriente				
Método				
Prueba	CWT		SRA	
	Curva 1= Referencia			
	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
P55	2.9255%	6.6193%	8.191%	8.473%
P169	18.2477%	15.9464%	11.985%	9.628%
P177	9.3793%	3.6218%	10.549%	5.834%
P178	13.6847%	4.1960%	22.17%	2.27%
p189	12.7212%	24.9816%	10.28%	30.01%
P191(2)	48.93%	37.49%	8.66%	13.74%
P210	43.33%	23.68%	4.74%	4.75%

## II. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje en Transformadores Piloto



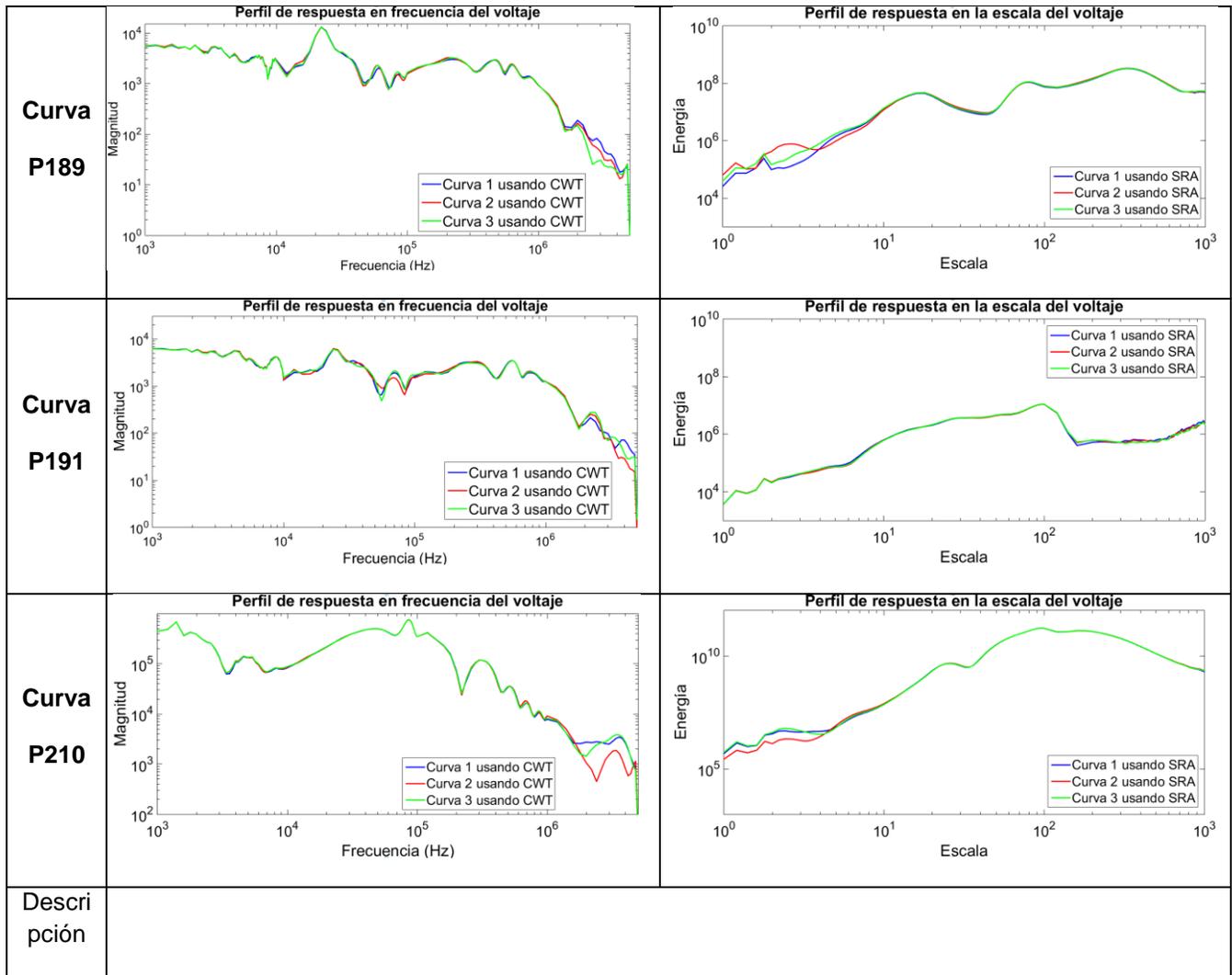
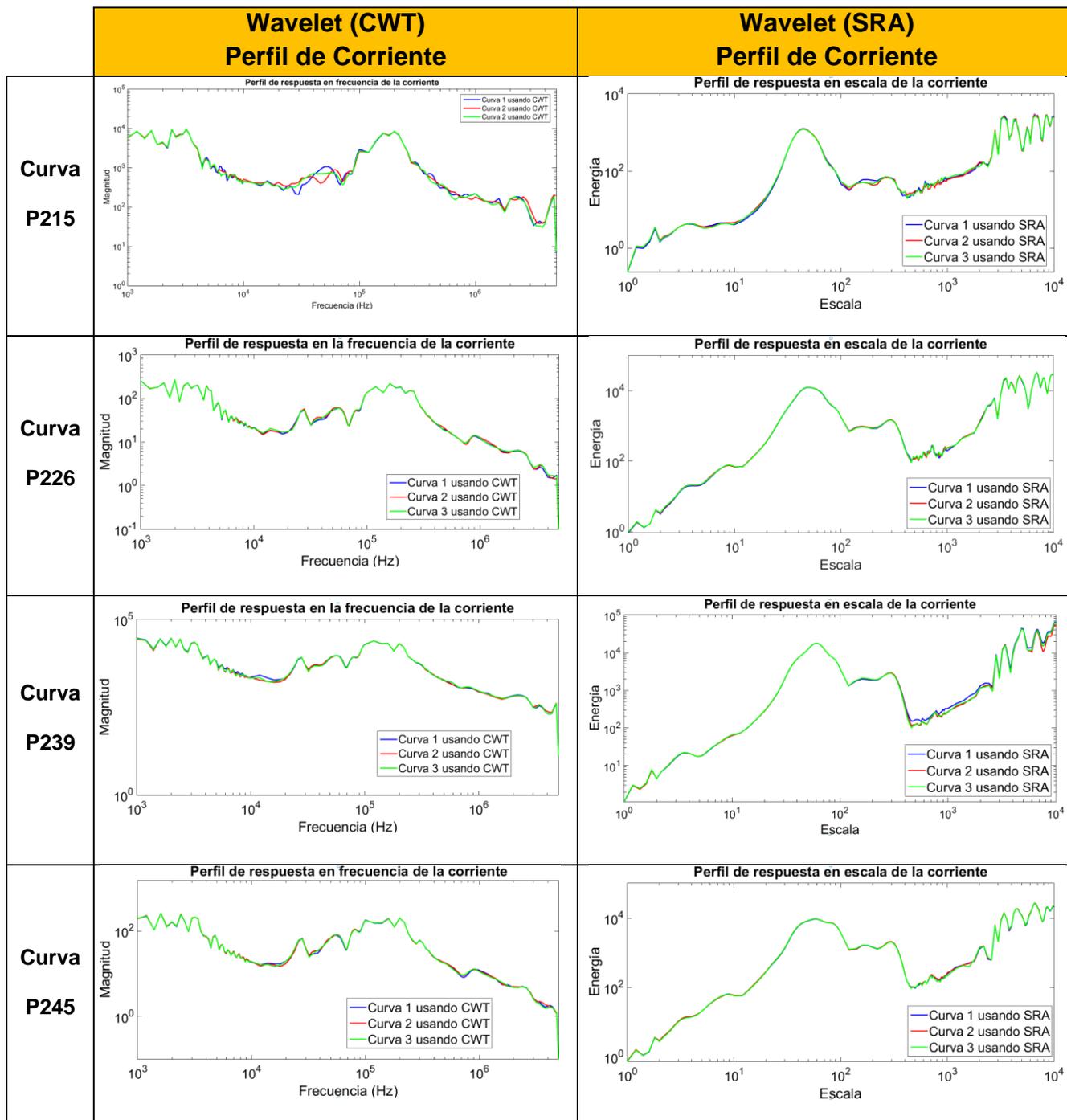


Tabla 15. Resultados MER del perfil de voltaje

Análisis MER Curvas Transformadores Piloto respecto a perfil de Voltaje				
Método				
Prueba	CWT		SRA	
	Curva 1= Referencia			
	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
P55	4.1392%	9.7638%	4.626%	8.432%
P169	13.8313%	12.1802%	5.964%	7.252%
P177	8.9478%	3.5349%	10.74%	3.26%
P178	8.5070%	2.5077%	11.52%	2.82%
p189	6.7239%	7.3085%	3.03%	2.76%
P191(2)	10.2352%	8.3935%	4.73%	4.43%
P210	7.9717%	3.8335%	11.83%	4.16%

## ANEXO B

### I. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de corriente en un transformador de distribución



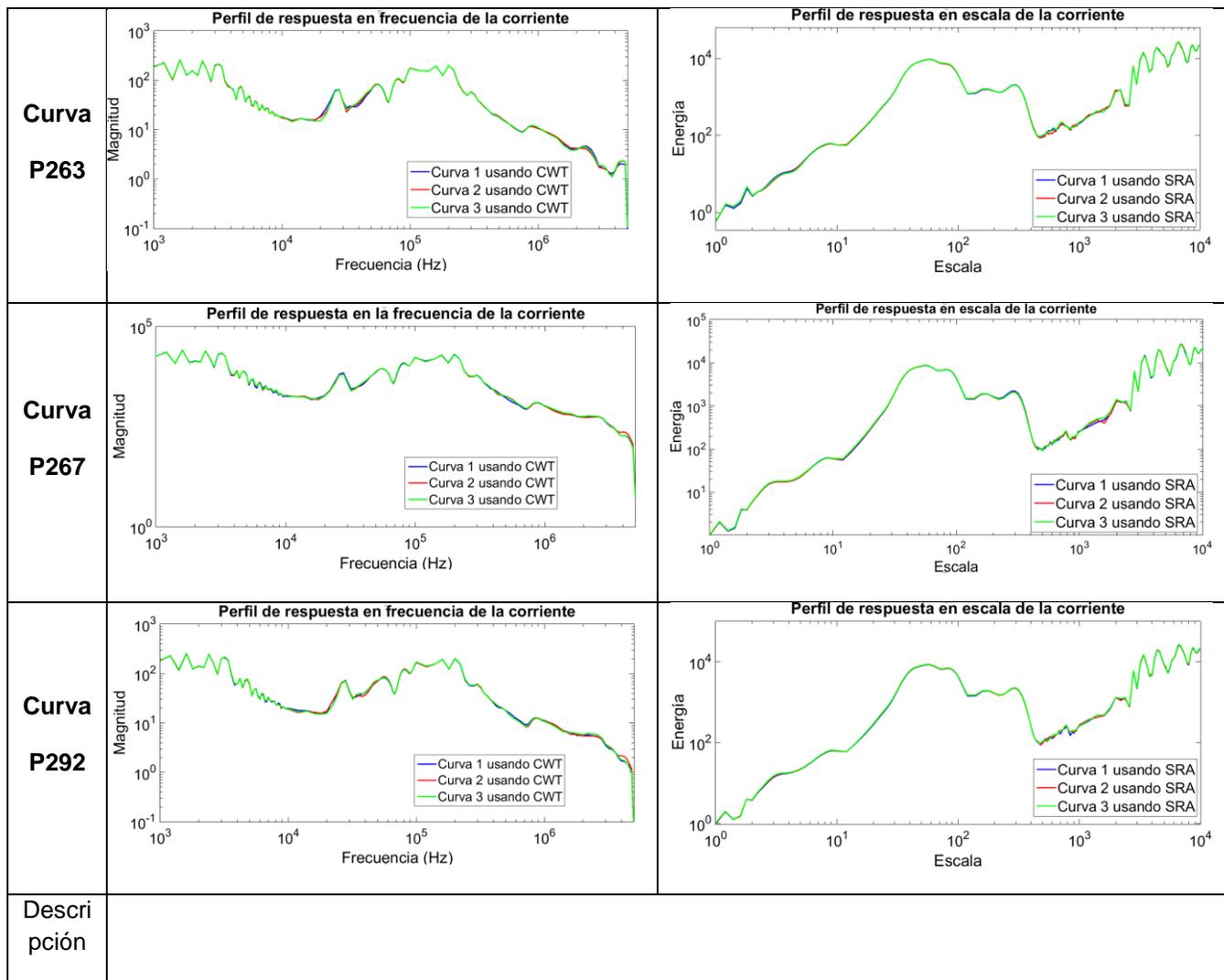
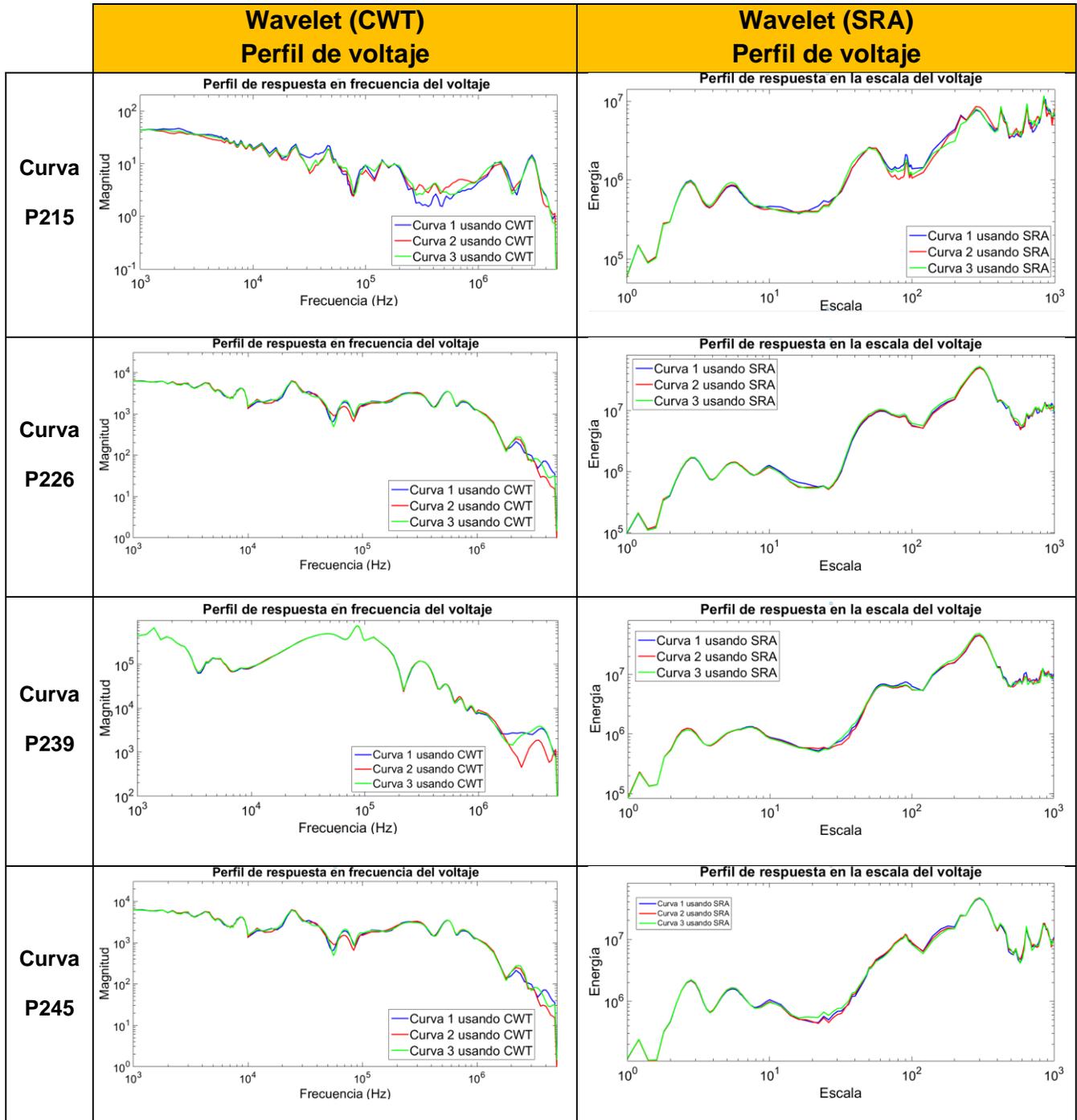


Tabla 16. Resultados MER, curvas perfil de corriente

Análisis MER Curvas Transformador Distribución respecto a perfil de Corriente				
Método	CWT		SRA	
Prueba	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
215	15.529%	11.496%	6.90%	6.49%
226	3.938%	3.702%	3.63%	4.21%
239	4.395%	4.033%	7.87%	6.76%
245	3.774%	3.346%	2.63%	2.84%
263	3.134%	3.143%	3.60%	2.80%
267	4.558%	3.534%	2.62%	3.18%
279	8.929%	18.615%	36.84%	28.30%
292	4.351%	3.056%	3.20%	3.18%

## II. Obtención Curvas FRA y SRA On-line respecto a perfiles de voltaje en un transformador de distribución



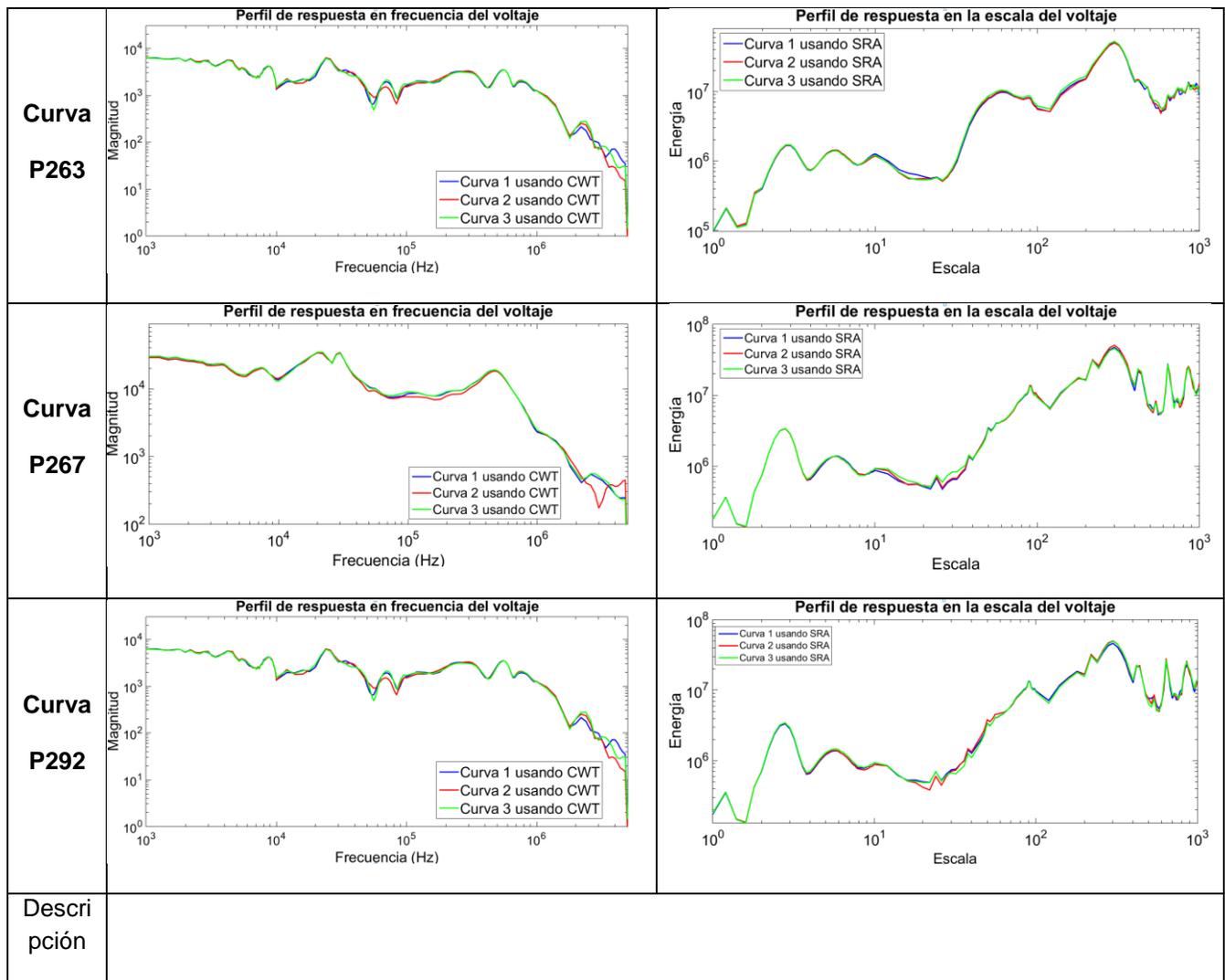


Tabla 17. Resultados MER, curvas perfil de voltaje

Análisis MER Curvas Transformador Distribución respecto a perfil de voltaje				
Método	CWT		SRA	
Prueba	Curva 2	Curva 3	Curva 2	Curva 3
215	24.615%	17.926%	8.05%	7.69%
226	11.798%	9.324%	4.13%	5.35%
239	10.657%	11.986%	4.80%	5.69%
245	11.389%	8.189%	4.41%	5.41%
263	8.056%	8.034%	4.95%	5.42%
267	9.163%	6.349%	3.84%	4.56%
279	10.284%	14.161%	4.99%	6.17%
292	8.085%	7.194%	5.33%	5.37%